

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ ДВО РАН



ВУЛКАНИЗМ и СВЯЗАННЫЕ С НИМ процессы

XXVII ежегодная научная конференция,
посвященная Дню вулканолога
27-29 марта 2024 г.

Материалы конференции



Петропавловск-Камчатский
2024

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ДАЛЬНЕВОСТОЧНОЕ ОТДЕЛЕНИЕ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
ИНСТИТУТ ВУЛКАНОЛОГИИ И СЕЙСМОЛОГИИ ДВО РАН



ВУЛКАНИЗМ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ПРОЦЕССЫ

XXVII ежегодная научная конференция,
посвященная Дню вулканолога
27-29 марта 2024 г.

Материалы конференции

Петропавловск-Камчатский
2024

УДК 551.21+552+550.34

Научное издание

Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-29 марта 2024 г. – Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2024. – 336 с.

Volcanism and related processes. Proceedings of the XXVII annual scientific conference dedicated to the Volcanologist Day, March, 27-29, 2024. – Petropavlovsk-Kamchatsky: IVS FEB RAS, 2024. – 336 p.

ISBN 978-5-902424-41-3

В материалах XXVII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, представлены результаты исследований в области вулканологии, сейсмологии, геотермии, геохимии и геодинамики зон перехода океан-континент. Конференция проводится в рамках празднования 300-летия Российской академии наук.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Утверждено к печати
Ученым советом
Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН

Главный редактор, председатель организационного комитета:
член-корреспондент РАН А.Ю. Озеров

Организационный комитет:
академик РАН Е.И. Гордеев, д.г.-м.н. А.И. Кожурин, д.г.-м.н. С.Н. Рычагов,
к.г.-м.н. Н.В. Горбач, к.г.н. О.В. Дирксен, к.ф.-м.н. А.А. Долгая,
к.г.-м.н. Е.Г. Калачева, к.т.н. В.А. Рашидов, к.б.н. Т.Ю. Самкова,
Е.В. Волошина, А.Ф. Сашенкова

Издание осуществлено при финансовой поддержке Дальневосточного отделения РАН

На обложке:
Фумарольная деятельность экструзии Каран (вулкан Шивелуч), сентябрь 2023 г.
Фото И.А. Нуждаева

ISBN 978-5-902424-41-3

© ИВиС ДВО РАН, 2024
© ДВО РАН, 2024

Содержание

Кузнецова М.В. Неутомимый характер (к 140-летию со дня рождения А.Н. Заварицкого)	15
Секция I. Вулканизм	
Бабанский А.Д., Толстых М.Л., Мельников Д.В., Кириленко А.С., Овсянников Г.Н. Характерные особенности пепла извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 года	18
Белоусов А.Б., Белоусова М.Г., Двигало В.Н., Шакирова А.А., Давыдова В.О., Басанина А.Е. Сильная эксплозивная активность вулкана Карымский в 2022 г.: отложения, механизм	22
Белоусов А.Б., Озеров А.Ю., Белоусова М.Г., Демянчук Ю.В. Пароксизмальные извержения Ключевского вулкана в 1945, 1994, 2023 гг.: динамика, отложения, механизм	26
Бергаль-Кувикас О.В., Смирнов С.З., Агатова А.Р., Дегтерев А.В., Разжигаева Н.Г., Пинегина Т.К., Портнягин М.В., Карманов Н.С., Тимина Т.Ю. Голоценовое эксплозивное извержение на перешейке Ветровой как индикатор активного вулканизма на о. Итуруп (Курильская островная дуга)	30
Большаков И.Е., Нуждаев А.А., Житова Е.С. К вопросу о формировании «радиаторной» столбчатой отдельности	33
Большаков И.Е., Нуждаев А.А., Житова Е.С., Кузнецов Р.А., Аникин Л.П. Общая характеристика продуктов извержения вулкана Алаид 2022 г. и некоторые данные о фумарольной деятельности в кратерной части	37
Будилов Д.И. Акустический мониторинг извержения вулкана Ключевской в июне 2023 – январе 2024 года	41
Быкасов В.Е. Некоторые замечания по поводу обособления вулканогенных ландшафтов	44
Гирина О.А. Вулкан Шивелуч: 60 лет со дня катастрофического извержения в 1964 г.	48
Гирина О.А., Маневич А.Г., Лупян Е.А., Уваров И.А., Романова И.М., Сорокин А.А., Королев С.П., Крамарева Л.С. Термальная активность вулканов Северной группы Камчатки в 2015-2022 гг.	52
Гирина О.А., Маневич А.Г., Мельников Д.В., Нуждаев А.А., Романова И.М., Лупян Е.А., Сорокин А.А., Крамарева Л.С., Королев С.П., Демянчук Ю.В. Активность вулканов Камчатки и Курил в 2023 г. и их опасность для авиации	56
Горбач Н.В., Философова Т.М. Состав ювенильных андезитов и ассоциирующих с ними мафических включений, изверженных вулканом Шивелуч в апреле 2023 г.	60
Горбач Н.В., Философова Т.М., Рогозин А.Н., Овсянников Г.Н., Портнягин М.В., Щербаков В.Д. Первые данные об эксплозивной активности вулкана Кроноцкий (Восточная Камчатка) в голоцене	64
Зарипов Т.Р. Сопоставление вулканической активности вулкана Шивелуч с сейсмичностью в 2016-2023 гг.	68
Иванов В.В. Вклад научной школы к.ф.-м.н. П.И. Токарева в развитие методов прогноза вулканических извержений и изучение их механизмов	71

Кирьянов В.Ю., Карпов Г.А. Прошлые суперизвержения вулканов мира и возможное мегаизвержение Йеллоустона в Северной Америке	75
Кирюхин А.В., Бергаль-Кувикас О.О., Лемзиков М.В. Магматическая активность Ключевского вулкана, предшествующая извержениям вулкана Безымянный	79
Кожемяко Н.В., Кепежинская П.К., Бердников Н.В. Микровключения металлов, сплавов и минералов в андезито-дацитах вулкана Бакенинг (Камчатка)	83
Костровицкий С.И. Происхождение и алмазность кимберлитовых пород	87
Малик Н.А. Фумаролы Корякского вулкана: состояние и состав газа в 2023 г.	90
Низаметдинов И.Р., Шевко А.Я., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З., Секисова В.С., Тимина Т.Ю. Фантомные ренит-содержащие парагенезисы высокоглиноземистых дочерних фаз расплавных включений в оливине голоценовых вулканов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова)	94
Овсянников Г.Н., Горбач Н.В., Рогозин А.Н., Тобелко Д.П. Ксенолиты оливиновых габбро в лавах Кроноцкого вулкана (Восточная Камчатка)	98
Озеров А.Ю. Определение причины фонтанирования раскаленных бомб во время извержений базальтовых-андезиобазальтовых вулканов	102
Павлов В.Э. Вулканические породы Охотско-Чукотского вулканического пояса и проблема происхождения геомагнитных суперхронов	106
Певзнер М.М., Толстых М.Л., Лебедев В.А., Костицын Ю.А., Бабанский А.Д., Овсянников Г.Н. Массив Хангар (Срединный хребет, Камчатка): хронология эруптивной активности в позднемiocен-четвертичное время	110
Перепелов А.Б., Пузанков М.Ю., Иванов А.В., Палесский С.В., Цыпукова С.С., Щербаков Ю.Д., Жгилев А.П. Индикаторная роль элементов платиновой группы в установлении источников щелочно-базальтовых и НЕВ-адакитовых магм кайнозойских вулканических комплексов Камчатки	114
Пономарева В.В., Дирксен О.В., Зеленин Е.А., Портнягин М.В.З, Базанова Л.И., Бубенщикова Н.В., Горбаренко С.А., Горбач Н.В., Деркачев А.Н., Овсянников Г.Н., Рогозин А.Н. Яр Девичий (Центральная Камчатская депрессия): окно в историю эксплозивного вулканизма и изменений природной среды Камчатки за последние 200 тысяч лет	118
Рашидов В.А., Бондаренко В.И., Аникин Л.П. Оползневые процессы в вулканическом массиве Алаид	122
Рогозин А.Н., Смирнов С.З. Составы расплавов кислых магм экструзий кальдеры Карымшина (Южная Камчатка) по результатам исследований расплавных включений в кварце	125
Толстых М.Л., Бабанский А.Д., Трубкин Н.В., Овсянников Г.Н. Микроструктуры частиц пепла вулкана Шивелуч	129
Толстых М.Л., Певзнер М.М., Смирнов В.Н., Глушкова О.Ю., Овсянников Г.Н. Состав стекла в пепловых залежах Северного Приохотья	132

Черкашин Р.И., Озеров А.Ю. Анализ опубликованных минералогических данных для магматической серии пород Толбачинского дола и обсуждение механизма ее формирования	136
Черных Е.В., Кирюхин А.В., Усачева О.О. Моделирование термогидродинамических процессов в конусе Авачинского вулкана	140
Шакирова А.А., Салтыков В.А. Анализ активности Ключевского вулкана в 2023 году на основе статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09	144
Щеклеина М.Д., Плечов П.Ю., Дымшиц А.М. Моделирование равновесия кварц-расплав в простых и многокомпонентных системах	148
Секция II. Геодинамика и тектоника вулканических областей	
Александров В.Н. Восстановление геодинамических обстановок на южной окраине Охотского массива в пермское время на основании анализа туффитов	151
Бергаль-Кувикас О.В., Латышев А.В., Аносова М.Б., Латанова Е.А. Первые результаты изучения прибрежного вулканического комплекса Южной Камчатки	155
Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С., Петрова В.В., Пилипенко О.В., Рашидов В.А., Трусов А.А. Комплексные исследования подводного вулканического массива 7.11 (Курильская островная дуга)	158
Бусс Ю.Ю., Гаврилов В.А., Соломатин А.В., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В. Привлечение сейсмических данных к анализу результатов комплексного скважинного геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений	162
Гаврилов В.А., Бусс Ю.Ю., Соломатин А.В., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В., Титков Н.Н., Рябинин Г.В. О выборе базовой физической модели подготовки сильных камчатских землетрясений	165
Гравиров В.В., Кислов К.В. Применение технологии распределенного акустического зондирования в задачах вулканологии	169
Гравиров В.В., Першин С.М., Собисевич А.Л., Гришин М.Я., Лиходеев Д.В., Мясников А.В. Результаты подземного мониторинга вариаций аэрозолей, температуры и деформации коры Земли в окрестностях вулкана Эльбрус	173
Кожурин А.И., Пинегина Т.К. Активная тектоника восточных полуостровов Камчатки	176
Лемзиков М.В. Механизмы очагов вулкано-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч	179
Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д. Толмачевский активный магматический центр на юго-востоке Камчатки и его структурная позиция	183
Полтавцева Е.В., Гаврилов В.А., Сагарьяров И.А., Бусс Ю.Ю., Титков Н.Н. Первые результаты мониторинга пространственно-временных изменений полного электронного содержания ионосферы, связанных с подготовкой сильных камчатских землетрясений	187
Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на I 2024 – XII 2028 гг. Концепция статистической уверенности при сейсмическом мониторинге геодинамических процессов	191

Хомчановский А.Л., Батанов Ф.И. Морфолитодинамические исследования береговой зоны Курильского залива (о. Итуруп)	195
Секция III. Гидротермальные процессы	
Вахромеев А.Г., Кирюхин А.В., Литвинова И.В., Данилова М.А., Сурмаажав Д. Вулканогенно-тектоническая модель формирования рудолокализирующих структур и обогащения межзолевых залежей промышленных литиеносных рассолов Ангаро-Ленского артезианского бассейна, Сибирская платформа	199
Глухов А.Н. Структурные условия эпитермального Au-Ag рудообразования в тыловой зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса	203
Долгая А.А., Калачева Е.Г. Проект геoinформационной системы «Термальные поля и источники Курильских островов»	207
Жегунов П.С., Грибушин К.А., Швейгерт П.Е., Буханова Д.С. Текстурные особенности кварца как индикатор рудообразующих процессов, на примере эпитермального рудопроявления Эвепента (Камчатка, Россия)	211
Зобенько О.А., Скильская Е.Д., Сергеева А.В. Медно-никелевая минерализация рудопроявления Северное (Центральная Камчатка)	214
Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Волошина Е.В. Кислые хлоридно-сульфатные воды вулкана Синарка (о. Шиашкотан)	216
Колова Е.Е. Минералого-геохимическая характеристика эпитермального Au-Ag рудообразования в тыловой зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса	220
Коновалова Н.С., Бердников Н.В., Кепежинская П.К. Вулканогенно-гидротермальный генезис железо-марганцевого месторождения Поперечное (Малохинганский рудный район, Дальний Восток России)	224
Котов А.Н., Гравиров В.В., Жостков Р.А., Пузич И.Н., Белобородов Д.Е. Изучение геотермальных месторождений южной части Камчатского полуострова	228
Кудаева Ш.С., Скильская Е.Д., Козлов В.В., Сергеева А.В. Малетойваямит $Au_3Te_6Se_4$ – вторая находка в мире на эпитермальном золоторудном месторождении Озерновское, Центральная Камчатка	232
Купчиненко А.Н., Житова Е.С., Шевелева Р.М., Гирина О.А., Пеков И.В., Кузнецов Р.А., Давыдова В.О., Назарова М.А., Плутахина Е.Ю., Власенко Н.С. Минералы возгонов термальных полей вулканического комплекса Большой Семячик и сольфатар пирокластического потока 2023 года вулкана Шивелуч (Камчатка)	234
Мельников Д.В., Калачева Е.Г. Первые данные о потоке почвенного CO_2 на термальных полях кальдеры Узон	238
Поляков А.Ю., Кирюхин А.В. Мониторинг притока неконденсирующихся газов в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар в 2019-2023 гг.	241
Рычагов С.Н., Бойкова И.А., Нуждаев И.А., Феофилактов С.О. Новые данные о геологическом строении Южно-Камбального Дальнего термального поля (Камчатка)	245
Рычагов С.Н., Кравченко О.В., Феофилактов С.О., Чернов М.С., Ермолинский А.Б. Реконструкция строения толщи гидротермальных глин и кровли коренных пород Южно-Камбального Центрального термального поля на основании бурения скважин и вертикального электрического зондирования	249

Рычагов С.Н., Сандиминова Е.И., Чернов М.С., Философова Т.М. Микроконкреции Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка)	253
Сандиминова Е.И., Рычагов С.Н., Философова Т.М. Хлоритовые минералы в гидротермально-изменённых андезибазальтах Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка)	257
Сергеева А.В., Фролов В.И., Назарова М.А., Кузьмина А.А., Карташева Е.В. Минеральный состав пепловых котлов пирокластического потока извержения вулкана Молодой Шивелуч 11 апреля 2023 г.	261
Таран Ю.А., Калачева Е.Г. Ультракислые и ультращелочные воды Курило-Камчатского региона. Формирование и смежные проблемы	265
Тарасов К.В., Таран Ю.А. Диффузионный поток CO₂ в Долине смерти, вулкан Кихпиныч, Камчатка	269
Хубаева О.Р., Сергеева А.В. Разрывные нарушения и гидротермально-магматические системы центральной части о. Итуруп	273
Чернышов В.М., Шупилко Е.В., Юрченко Ю.Ю. Березиты Талимской и Укурунруской вулcano-тектонических структур северного сегмента Восточно-Бурейнского вулcano-плутонического пояса (Тугурский полуостров, Хабаровский край, Дальний Восток)	276
Швейгерт П.Е., Буханова Д.С. Геохимическая зональность рудопроявления Тутхливаям (Камчатский край)	280
Секция IV. Вулканизм и окружающая среда	
Калачева Е.Г., Волошина Е.В., Долгая А.А., Мельников Д.В. Формирование химического состава р. Камчатка под влиянием вулканических процессов	284
Кузьмина А.А., Карташева Е.В., Сергеева А.В., Назарова М.А., Позолотина Л.А., Мартыненко Д.О. Возможности метода инверсионной вольтамперометрии для определения микроэлементов в природных средах	288
Кузьмичев И.С., Медведков А.А. Проблемы охраны вулканических ландшафтов на юге криолитозоны в условиях развития стихийного туризма	292
Куксина Л.В., Муравьев Я.Д. Водотоки Северной группы вулканов и их влияние на сток р. Камчатки	296
Лепская Е.В., Тепнин О.Б., Походина М.А., Рашидов В.А. Пепловые выбросы вулканов Курильской островной дуги и биопродуктивность прилегающих локальных морских акваторий	299
Маневич Т.М. Ледники вулкана Шивелуч	303
Матвеева Е.В., Позолотина Л.А., Климова А.В., Клочкова Т.А. Воздействие вулканического пепла на развитие некоторых видов сельскохозяйственных культур в условиях лабораторного эксперимента	306
Назарова М.А., Сергеева А.В., Кузьмина А.А., Карташева Е.В. Динамика вымывания солей из пепла вулкана Шивелуч, извержение апреля 2023 г.	310
Певзнер М.М., Буркова А.А., Овсянников Г.Н., Нечушкин Р.И., Толстых М.Л. Возраст Паланского оползня (Корякия): предварительные результаты	313

- Позолотина Л.А., Климова А.В., Сергеева А.В. 317
Содержание микроэлементов в компонентах среды термальных полей Мутновского геотермального месторождения в августе 2023 г.
- Походина М.А., Лепская Е.В. 321
Динамика вымывания биогенных элементов и некоторых вулканогенных макрокомпонентов из пепла вулкана Шивелуч (извержение 11 апреля 2023 года)
- Семкин П.Ю., Павлова Г.Ю., Лобанов В.Б., Горин С.Л., Лепская Е.В., Уланова О.А., Шкирникова Е.М., Швецова М.Г., Zhang J., Тищенко П.Я. 325
Сезонная изменчивость биогенных элементов (P, N, Si, C) в реках Камчатка и Авача (п-ов Камчатка) в 2023 г.
- Уланова О.А., Барабанщиков Ю.А., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Швецова М.Г., Федоров М.С., Лобанов В.Б. 329
Биогенные элементы (N, P, Si) и хлорофилл «а» Авачинского залива (Восточная Камчатка) и прилегающей акватории Тихого океана летом 2022 г.
- Чернягина О.А., Зиньковская И.И., Юшин Н.С. 332
Активный биомониторинг в оценке влияния пеплопадов на загрязнение воздуха

Content

Kuznetsova M.V. The man of tireless spirit (to the 140th anniversary of A.N. Zavaritsky)	15
Section I. Volcanism	
Babansky A.D., Tolstykh M.L., Melnikov D.V., Kirilenko A.S., Ovsyannikov G.N. Characteristic features of the ash of the Shiveluch volcano eruption in April 2023	18
Belousov A.B., Belousova M.G., Dvigalo V.N., Shakirova A.A., Davydova V.O., Basanina A.E. Strong explosive activity of Karymsky volcano in 2022: deposits and eruption mechanism	22
Belousov A.B., Ozerov A.Yu., Belousova M.G., Demyanchuk Yu.V. Paroxysmal eruptions of Klyuchevskoy volcano in 1945, 1994, 2023: dynamics, deposits and mechanism	26
Bergal-Kuvikas O.V., Smirnov S.Z., Agatova A.R., Degterev A.V., Razjigaeva N.G., Pinegina T.K., Portnyagin M.V., Karmanov N.S., Timina T.Yu. Holocene explosive eruption on Vetrovoy Isntmus as an indicator of active volcanism on Iturup Isl. (Kurile Island arc)	30
Bolshakov I.E., Nuzhdaev A.A., Zhitova E.S. On the issue of «radiator» columnar joints formation	33
Bolshakov I.E., Nuzhdaev A.A., Zhitova E.S., Kuznetsov R.A., Anikin L.P. General characteristics of the products of the 2022 Alaid volcano eruption and some data on fumarolic activity in the crater zone	37
Budilov D.I. Acoustic monitoring of the Klyuchevskoy volcano eruption in June 2023 – January 2024	41
Bykasov V.E. Some remarks regarding the distinguishing of volcanogenic landscapes	44
Girina O.A. The Sheveluch volcano: 60 years since the catastrophic eruption in 1964	48
Girina O.A., Manevich A.G., Loupian E.A., Uvarov I.A., Romanova I.M., Sorokin A.A., Korolev S.P., Kramareva L.S. The thermal activity of the Kamchatka Northern group volcanoes in 2015-2022	52
Girina O.A., Manevich A.G., Melnikov D.V., Nuzhdaev A.A., Romanova I.M., Loupian E.A., Sorokin A.A., Kramareva L.S., Korolev S.P., Demyanchuk Yu.V. The 2023 activity of Kamchatka and Kurile volcanoes and their danger to aviation	56
Gorbach N.V., Filosofova T.M. Composition of the juvenile andesites and associated mafic enclaves erupted from Shiveluch volcano in April 2023	60
Gorbach N.V., Filosofova T.M., Rogozin A.N., Ovsyannikov G.N., Portnyagin M.V., Shcherbakov V.D. First data on the Holocene explosive activity of Kronotsky volcano (Eastern Kamchatka)	64
Zaripov T.R. Comparison of volcanic activity of Shiveluch volcano with seismicity in 2016-2023	68
Ivanov V.V. Contribution of the scientific school by Ph.D. P.I. Tokarev to the development of methods for predicting volcanic eruptions and studying their mechanisms	71

Kirianov V.Yu., Karpov G.A. Past super-eruptions of the worldwide volcanoes and possible mega-eruption of Yellowstone volcano in North America	75
Kiryukhin A.V., Bergal-Kuvikas O.V., Lemzikov M.V. Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano preceding the eruptions of Bezymianny volcano	79
Kozhemyako N.V., Kepezhinskas P.K., Berdnikov N.V. Microinclusions of metals, alloys and minerals in andesites and dacites from the Bakening Volcano (Kamchatka)	83
Kostrovitsky S.I. Origin and diamond potential of kimberlite rocks	87
Malik N.A. Activity and gas composition of Koryaksky volcano fumaroles in 2023	90
Nizametdinov I.R., Shevko A.Ya., Kuzmin D.V., Smirnov S.Z., Sekisova V.S., Timina T.Yu. Phantom rhonite-containing parageneses of high-alumina daughter phases in olivine-hosted melt inclusions of the Holocene volcanoes of the Medvezhya Caldera (Iturup Island, Kuril Islands)	94
Ovsyannikov G.N., Gorbach N.V., Rogozin A.N., Tobelko D.P. Olivine gabbro xenoliths from the Kronotsky volcano rocks (Eastern Kamchatka)	98
Ozerov A.Yu. Defining the cause of igneous bombs spouting during the eruptions of basalt–basaltic- andesite volcanoes	102
Pavlov V.E. Volcanic rocks of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt and the problem of the origin of the Cretaceous Normal Polarity superchron	106
Pevzner M.M., Tolstykh M.L., Lebedev V.A., Kostitsyn Yu.A., Babansky A.D., Ovsyannikov G.N. Khangar massif (Sredinny Range, Kamchatka): chronology of Late Miocene-Quaternary eruptive activity	110
Perepelov A.B., Puzankov M.Yu., Ivanov A.V., Palesskii S.V., Tsypukova S.S., Shcherbakov Yu.D., Zhgilev A.P. Indicator role of platinum group elements in determining the sources of alkaline-basalt and NEB-adakite magmas of Cenozoic volcanic complexes of Kamchatka	114
Ponomareva V.V., Dirksen O.V., Zelenin E.A., Portnyagin M.V., Bazanova L.I., Bubenshchikova N.V., Gorbarenko S.A., Gorbach N.V., Derkachev A.N., Ovsyannikov G.N., Rogozin A.N. Devichii bluff (Central Kamchatka Depression): a window into the history of explosive volcanism and environmental change over the past 200 ka	118
Rashidov V.A., Bondarenko V.I., Anikin L.P. Landslide processes in the Alaid volcanic massif	122
Rogozin A.N., Smirnov S.Z. Compositions of silicic magma melts from Karymshina caldera extrusions (Southern Kamchatka) based on the results of studies of melt inclusions in quartz	125
Tolstykh M.L., Babansky A.D., Trubkin N.V., Ovsyannikov G.N. Microstructure of volcanic ash particles of Shiveluch volcano	129
Tolstykh M.L., Pevzner M.M., Smirnov V.N., Glushkova O.Yu., Ovsyannikov G.N. Composition of glass in the ash deposits of the Northern Okhotsk Sea region	132
Cherkashin R.I., Ozerov A.Yu. Analysis of the published mineralogical data on the Tolbachinsky dol magmatic rock series and discussion of its formation mechanism	136

Chernykh E.V., Kiryukhin A.V., Usacheva O.O. Modeling of thermohydrodynamic processes in the cone of Avachinsky volcano	140
Shakirova A.A., Saltykov V.A. Analysis of Klyuchevskoy volcano activity in 2023 based on a statistical assessment of the seismicity level SOUS'09	144
Shchekleina M.D., Plechov P.Yu., Dymshits A.M. Modeling of Quartz-Melt equilibrium in simple and complex silicate systems	148
Section II. Geodynamics and tectonics of volcanic areas	
Aleksandrov V.N. Reconstruction of the geodynamic conditions on the southern margin of the Okhotsk massif in the Permian time based on the analysis of tuffites	151
Bergal-Kuvikas O.V., Latyshev A.V., Anosova M.B., Latanova E.A. First results of studying the Pribrezhny volcanic complex, Southern Kamchatka	155
Blokh Yu.I., Bondarenko V.I., Dolgal A.S., Petrova V.V., Pilipenko O.V., Rashidov V.A., Trusov A.A. Comprehensive studies of the 7.11 underwater volcanic massif (Kuril island arc)	158
Buss Yu.Yu., Gavrilov V.A., Solomatin A.V., Morozova Yu.V., Poltavtseva E.V. Seismic data application for the analysis of the results of complex borehole geophysical monitoring of the processes preceding strong Kamchatka earthquakes	162
Gavrilov V.A., Buss Yu.Yu., Solomatin A.V., Morozova Yu.V., Poltavtseva E.V., Titkov N.N., Ryabinin G.V. On the choice of a basic physical model for the processes preceding strong Kamchatka earthquakes	165
Gravurov V.V., Kislov K.V. Application of distributed acoustic sensing technology in volcanology issues	169
Gravurov V.V., Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Ya., Likhodeev D.V., Myasnikov A.V. Results of underground monitoring of variations in aerosols, temperature and deformation of the Earth's crust near the Elbrus volcano	173
Kozhurin A.I., Pinegina T.K. Active tectonics of Kamchatka eastern peninsulas	176
Lemzikov M.V. Focal mechanisms of volcano-tectonic earthquakes of Shiveluch volcano	179
Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D. Tolmachevo active magmatic center in the south of Kamchatka and its structural position	183
Poltavtseva E.V., Gavrilov V.A., Sagaryarov I.A., Buss Yu.Yu., Titkov N.N. First results of monitoring of spatiotemporal changes in the ionosphere's total electron content prior to strong Kamchatka earthquakes	187
Solomatin A.V. Long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka arc for I 2024 – XII 2028. The concept of statistical certainty in seismic monitoring of geodynamic processes	191
Khomchanovsky A.L., Batanov F.I. Morphology dynamics study of Kuril bay coastal zone (Iturup Island)	195

Section III. Hydrothermal processes

Vakhromeev A.G., Kiryukhin A.V., Litvinova I.V., Danilova M.A., Surmaazhav D. Volcanogenic-tectonic model of the formation of ore-localizing structures and enrichment of deposits of industrial lithium-bearing brines of the halogen-carbonate hydrogeological formation of the Angara-Lena Artesian basin, Siberian Platform	199
Glukhov A.N. Structural conditions for the formation of epithermal Au-Ag mineralization at the rear zone of Okhotsk-Chukotka volcanic belt	203
Dolgaya A.A., Kalacheva E.G. Project of geographic information system «Thermal fields and springs of the Kuril Islands»	207
Zhegunov P.S., Gribushin K.A., Schweigert P.E., Bukhanova D.S. Textural features of quartz as an indicator of ore-forming processes, using the example of epithermal ore occurrence Evevpena (Kamchatka, Russia)	211
Zobenko O.A., Skilskaya E.D., Sergeeva A.V. Copper-nickel mineralization of the Severnoe ore field (Central Kamchatka)	214
Kalacheva E.G., Kotenko T.A., Voloshina E.V. Acidic chloride-sulfate waters of the Sinarka volcano (Shiashkotan Island)	216
Kolova E.E. Mineralogical and geochemical characteristics of epithermal Au-Ag ore formation in the rear zone of the Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt	220
Konovalova N.S., Berdnikov N.V., Kepezhinskas P.K. Volcanic-hydrothermal origin of Fe-Mn deposit Poperechny (the Lesser Khingan Range, Russian Far East)	224
Kotov A.N., Gravurov V.V., Zhostkov R.A., Puzich I.N., Beloborodov D.E. Study of geothermal deposits in the southern part of the Kamchatka Peninsula	228
Kudaeva Sh.S., Skilskaya E.D., Kozlov V.V., Sergeeva A.V. Maletoyvayamite $Au_3Te_6Se_4$ – the second world finding in the Ozernovskoye epithermal deposit, Kamchatka	232
Kupchinenko A.N., Zhitova E.S., Sheveleva R.M., Girina O.A., Pekov I.V., Kuznetsov R.A., Davydova V.O., Nazarova M.A., Plutakhina E.Yu., Vlasenko N.S. Exhalation minerals from geothermal fields of the Bolshoi Semiachik volcanic complex and solfataras of the 2023 pyroclastic flow of the Shiveluch volcano (Kamchatka)	234
Melnikov D.V., Kalacheva E.G. First data on the soil CO_2 flux in the thermal fields of Uzon caldera	238
Polyakov A.Yu., Kiryukhin A.V. Analysis of non-condensable gas inflow to the Mutnovsky productive geothermal reservoir in 2019-2023	241
Rychagov S.N., Boikova I.A., Nuzhdaev I.A., Feofilaktov S.O. New data on the geological structure of the South-Kambalny Central Thermal Field (Kamchatka)	245
Rychagov S.N., Kravchenko O.V., Feofilaktov S.O., Chernov M.S., Ermolinskyi A.B. Reconstruction of the structure of hydrothermal clays and rocks roofing of the Southern Kambalny Central Thermal Field on the basis of well-drilling and vertical electric sounding	249
Rychagov S.N., Sandimirova E.I., Chernov M.S., Filosofova T.M. Microconcretions of the South-Kambalny Central Thermal Field (Kamchatka)	253

Sandimirova E.I., Rychagov S.N., Filosofova T.M. Chlorite minerals in hydrothermally altered andesibasalts of South Kambalny Central Thermal Field (Kamchatka)	257
Sergeeva A.V., Frolov V.I., Nazarova M.A., Kuzmina A.A., Kartasheva E.V. Mineralogy of the rootless fumaroles associated with the 2023 eruptive deposits of the Shiveluch volcano	261
Taran Yu.A., Kalacheva E.G. Ultra-acidic and ultra-alkaline waters of the Kuril-Kamchatka region. Formation and related issues	265
Tarasov K.V., Taran Yu.A. The CO₂ flux in Death Valley of Kikhpinych volcano, Kamchatka	269
Khubaeva O.R., Sergeeva A.V. Fracture faults and hydrothermal-magmatic systems in the central part of Iturup Island	273
Chernyshov V.M., Shupilko E.V., Yurchenko Yu.Yu. Berezites of the Talim and Ukurunru volcano-tectonic structures of the northern segment of the East Bureya volcano-plutonic belt (Tugur Peninsula, Khabarovsk Territory, Far East)	276
Schweigert P.E., Bukhanova D.S. Geochemical zoning of Tutkhliyayam ore occurrence (Kamchatka krai)	280
Section IV. Volcanism and the environment	
Kalacheva E.G., Voloshina E.V., Dolgaya A.A., Melnikov D.V. Formation of the chemical composition of the Kamchatka River under the influence of volcanic processes	284
Kuzmina A.A., Kartasheva E.V., Sergeeva A.V., Nazarova M.A., Pozolotina L.A., Martynenko D.O. Stripping voltammetry method: application for determining the environmental microelements	288
Kuzmichev I.S., Medvedkov A.A. Problems of protection of volcanic landscapes in the south of the permafrost zone in the context of the development of spontaneous tourism	292
Kuksina L.V., Muravyev Ya.D. Rivers of the Northern group of volcanoes and their influence on the Kamchatka River runoff	296
Lepskaya E.V., Tepnin O.B., Pokhodina M.A., Rashidov V.A. Ashfalls of Kuril Island Arc volcanoes and local sea sites productivity	299
Manevich T.M. Glaciers of the Shiveluch volcano	303
Matveeva E.V., Pozolotina L.A., Klimova A.V., Klochkova T.A. The impact of volcanic ash on the development of certain species of crops in the laboratory experiment	306
Nazarova M.A., Sergeeva A.V., Kuzmina A.A., Kartasheva E.V. Dynamics of salt leaching from the ash of Shiveluch volcano, April 2023 eruption	310
Pevzner M.M., Burkova A.A., Ovsiannikov G.N., Nechushkin R.I., Tolstykh M.L. Age of the Palan Landslide (Koryakia): preliminary results	313
Pozolotina L.A., Klimova A.V., Sergeeva A.V. Concentrations of trace elements in components of the thermal fields of Mutnovsky geothermal field in August 2023	317

- Pokhodina M.A., Lepskaya E.V. 321
Dynamics of leaching of biogenic elements and some volcanogenic macrocomponents from the ash of Shiveluch volcano (eruption of April 11, 2023)
- Semkin P.Yu., Pavlova G.Yu., Lobanov V.B., Gorin S.L., Lepskaya E.V., Ulanova O.A., Shkirmnikova E.M., Shvetsova M.G., Zhang J., Tishchenko P.Ya. 325
Seasonal variability of nutrients (P, N, Si, C) in the Kamchatka and Avacha rivers (Kamchatka Peninsula) in 2023
- Ulanova O.A., Barabanshchikov Yu.A., Semkin P.Yu., Tishchenko P.P., Shvetsova M.G., Fedorov M.S., Lobanov V.B. 329
Nutrients (N, P, Si) and chlorophyll «a» of the Avacha Bay (Eastern Kamchatka) and the adjacent Pacific Ocean in the summer of 2022
- Chernyagina O.A., Zinicovskaia I.I., Yushin N.S. 332
Active biomonitoring in assessing the impact of ashfalls on air pollution

Неутомимый характер (к 140-летию со дня рождения А.Н. Заварицкого)

Кузнецова М.В.

The man of tireless spirit (to the 140th anniversary of A.N. Zavaritsky)

Kuznetsova M.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: bib@kscnet.ru

Работа продолжает цикл статей, посвященных истории исследования вулканов Камчатки. Освещается научная и организационная деятельность А.Н. Заварицкого и его роль в становлении и развитии вулканологии на Камчатке.

14 марта 2024 года исполнилось 140 лет со дня рождения Александра Николаевича Заварицкого, выдающегося ученого в области геологии рудных месторождений, петрографии, вулканологии и метеоритики. В документе «Краткий отзыв о научных трудах профессора А.Н. Заварицкого» от 15.09.1936 г. академик В.А. Обручев отмечал: «Все труды А.Н. Заварицкого за редким исключением принадлежат двум отраслям геологии – петрографии и учению о рудных месторождениях.... На второе место можно поставить петрографические работы по вулканологическим породам Камчатки...».

Первая работа Александра Николаевича Заварицкого по вулканологии «Главные черты в развитии вулканического цикла на Урале» была опубликована в 1924 г. в сборнике «Известия Геологического комитета». В статье, по оценке С.И. Набоко, «наряду с многочисленными геологическими и петрографическими вопросами он рассматривал вопрос о связи вулканизма с тектоникой. Эта проблема для А.Н. Заварицкого все годы изучения современного вулканизма оставалась одной из главных» [5].

В 1929 г. Франц Юльевич Левинсон-Лессинг и Александр Николаевич Заварицкий совместно с другими учеными поставили в Тихоокеанском комитете АН СССР вопрос о необходимости изучения активного вулканизма. Для выполнения плана экспедиционных исследований Геологический комитет в 1931 г. организовал вулканологическую экспедицию на Камчатку. Возглавить ее Ф.Ю. Левинсон-Лессинг предложил Александру Николаевичу Заварицкому. Целью экспедиции было исследование вулкана Авача и последствий его извержения 1926 г. Участники экспедиции изучали геологию, продукты извержения и состояние действующего вулкана, горячие ключи. Впервые в СССР «отбираются и анализируются вулканические газы и измененные под их воздействием породы и возгоны» [5]. Сотрудники экспедиции «впервые изучают горячие источники Камчатки с учетом геологической обстановки их выхода и с химическими анализами» [6]. Экспедиция Заварицкого была первым вулканологическим исследованием, проводившимся при участии группы сотрудников разных специальностей и положившим начало систематическому исследованию современной вулканической деятельности в СССР. Некоторые результаты исследований Александр Николаевич изложил в небольшой книге «Вулкан Авача на Камчатке и его состояние летом 1931 г.», вышедшей в 1935 г. В этой работе рассмотрены геологическое строение вулкана, соотношение последнего с потухшим вулканом Козельским, состав и химизм продуктов извержения Авачи. Монография «Вулкан Авача на Камчатке» была опубликована лишь в 1977 г.

В 1932 г. были опубликованы две статьи А.Н. Заварицкого о вулканических газах Камчатки.

С 1934 по 1937 гг. на Камчатке работала Камчатская комплексная экспедиция Совета по изучению производительных сил АН СССР (ККЭ СОПС АН СССР). Работы 1934 г. выполнялись сотрудниками Геологического института АН СССР (ГИН). В плане ГИН на 1934 г. по проблеме «Геологическое строение и полезные ископаемые

Дальнего Востока» разрабатывалась тема «Изучение геологического строения Камчатки». А.Н. Заварицкий был научным руководителем двух геологических отрядов (Верхне-Камчатский и Центрально-Камчатский; руководители А.В. Щербаков, В.С. Кулаков). «Было выполнено геологическое пересечение Камчатки и заснят геологически наиболее интересный вулканологический участок Охотско-Тихоокеанского водораздела» [3].

В составе ККЭ СОПС СССР 1935 года работала группа по составлению геологической карты. Карта под редакцией А.Н. Заварицкого, вышедшая в 1940 г., подвела первый итог проделанных (1934-1935 гг. – К.М.) на Камчатке геологических исследований и послужила основой для дальнейших работ по исследованию геологии Камчатки [4].

В 1935 г. вышли в свет три работы А.Н. Заварицкого: «Вулкан Авача на Камчатке и его состояние летом 1931 г.», «Северная группа вулканов Камчатки» и статья «Пять лет геологических исследований на Камчатке». В 1937 г. в «Большом советском атласе мира» была опубликована составленная под редакцией А.Н. Заварицкого мировая карта вулканов и вулканизма. В том же году А.Н. Заварицкий выступил на XVII сессии Международного геологического конгресса, проходившего в СССР, с докладом о линейном расположении вулканов Камчатки.

После смерти Ф.Ю. Левинсона-Лессинга в 1939 г. Александр Николаевич возглавил Камчатскую вулканологическую станцию (научный руководитель, 1940-1944; главный редактор изданий «Бюллетень вулканологической станции» (выпуски № 9-18) и «Труды Камчатской вулканологической станции» (выпуски № 2-7)) и вложил много сил в ее работу и реорганизацию станции в Лабораторию вулканологии. Утверждение Лаборатории состоялось 31.08.1944 г., директором был назначен академик А.Н. Заварицкий (1945-1952). С организацией Лаборатории вулканологии АН СССР вулканологические исследования охватили территорию Камчатки, Курильских островов, Сахалина, Приморья, Кавказа, Закарпатья и Монголии. В 1946 г. начались вулканологические исследования на Курильских островах. По предложению А.Н. Заварицкого Академия наук СССР прикомандировала Георгия Степановича Горшкова к работающей на Курилах гидрографической экспедиции Тихоокеанского флота. Результаты исследований вулканов Курильских островов были опубликованы в статье А.Н. Заварицкого и Г.С. Горшкова «Вулканическая дуга Курильских островов» (1963) и в монографии Г.С. Горшкова «Вулканизм Курильской островной дуги» (1967). По инициативе А.Н. Заварицкого в 1946 г. при Камчатской вулканологической станции была открыта сейсмологическая станция.

В августе 1946 г. А.Н. Заварицкий возглавил аэровулканологическую экспедицию на Камчатку, в которой впервые для изучения вулканов была применена аэрофотосъемка, получившая впоследствии широкое развитие в Институте вулканологии СО АН СССР. 6 августа 1946 г. самолет экспедиции вылетел в Петропавловск. Участниками экспедиции были: академики А.Н. Заварицкий и С.С. Смирнов, сотрудники Академии наук СССР Б.И. Пийп, Г.С. Горшков, А.Е. Святловский, Ю.С. Доброхотов, врач В. Гавеман и другие. Общее руководство работами экспедиции осуществлялось А.Н. Заварицким. Для выполнения аэросъемочных работ А.Н. Заварицким была привлечена Лаборатория аэрометодов СССР. «Предварительно была разработана программа съемочных работ и маршруты полетов. Вечером 24 августа был совершен первый съемочный полет, во время которого были сняты Авачинский и Корякский вулканы. Всего с 24 августа по 2 октября было совершено десять съемочных полетов общей протяженностью до 9 тыс. км, продолжавшихся в некоторых случаях по 6-7 часов. Маршруты всегда прокладывались таким образом, чтобы каждый вулкан был снят по крайней мере с двух сторон» [2]. Кроме наблюдений вулканов с самолета, сотрудники экспедиции осматривали побочные кратеры и фумаролы Ключевского вулкана, образовавшиеся

после извержения 1945 г. Подробно были осмотрены кратеры Юбилейный, Заварицкого, Туйла, Карпинского и Обручева. Базой стала Камчатская вулканологическая станция в Ключах. Во время экспедиции 1946 г. был собран ценный материал по морфологии и расположению всех вулканов Камчатки. А.Е. Святловский в своей статье «А.Н. Заварицкий – основоположник дистанционных исследований вулканов СССР» указал, что «главным достижением экспедиции является то, что была показана возможность и необходимость изучения вулканов с воздуха» [7]. Результатом обработки материалов, полученных во время той экспедиции, стала работа А.Н. Заварицкого «Вулканы Камчатки» (1955) и издание «Атласа вулканов СССР» (1959). Материалы исследований были обобщены В.И. Влодавцем, Г.С. Горшковым, Б.И. Пийпом и завершены изданием «Каталога вулканов СССР» (1957). Успешное завершение работ Камчатской экспедиции способствовало тому, что в следующем 1947 г. аналогичная экспедиция была направлена Академией наук СССР на Кавказ. Руководство работами Кавказской экспедиции также осуществлялось А.Н. Заварицким.

В 1945-1947 гг. вышли статьи А.Н. Заварицкого «Исследование вулканов Академией наук», «Начало русской вулканологии» по истории и задачам вулканологических исследований в СССР.

В 1951-1952 гг. Александр Николаевич читал в МГУ им. М.В. Ломоносова специальный курс вулканологии, в котором «разбирал основные вопросы вулканизма, уделяя особое внимание физической стороне явлений» [1].

Имя выдающегося ученого сохраняется в памяти людей, прежде всего, в его научных трудах – монографиях, статьях и учебных пособиях. А.Н. Заварицким опубликовано более 250 работ, среди них около 60 по вулканологии. Ими пользуется уже не одно поколение отечественных и зарубежных ученых. Его учениками были Д.С. Коржинский, А.Г. Бетехтин, В.С. Соболев, Б.И. Пийп и многие другие. По оценке Б.И. Пийпа, «А.Н. Заварицкий был инициатором, организатором и руководителем всех крупных, проводившихся здесь (на Камчатке – К.М.) вулканологических работ». Направления вулканологических исследований, выбранные Александром Николаевичем Заварицким, успешно развиваются в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Список литературы

1. Гориков Г.С., Кваша Л.Г., Пийп Б.И. Александр Николаевич Заварицкий // Труды Лаборатории вулканологии. 1954. Вып. 8. С. 5-7.
2. Доброхотов Ю.С. Аэросъемка в вулканологических экспедициях Академии Наук Союза СССР // Труды лаборатории аэрометодов. 1950. Т. II. С. 77-87.
3. Заварицкий А.Н. Пять лет геологических исследований Камчатки // Проблемы советской геологии. 1935. № 12. С. 1095-1102.
4. На Камчатке / СОПС АН СССР. М.; Л.: АН СССР, 1936. 215 с.
5. Набоко С.И. Академик Александр Николаевич Заварицкий и его роль в развитии вулканологии (к 100-летию со дня рождения) // Вулканология и сейсмология. 1984. № 2. С. 3-13.
6. Пийп Б.И. Термальные ключи Камчатки. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 268 с.
7. Святловский А.Е. А.Н. Заварицкий – основоположник дистанционных исследований вулканов СССР // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1986. № 1. С. 138-139.

Характерные особенности пепла извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 года
Бабанский А.Д.¹, Толстых М.Л.², Мельников Д.В.³, Кириленко А.С., Овсянников Г.Н.³
Characteristic features of the ash of the Shiveluch volcano eruption in April 2023
Babansky A.D., Tolstykh M.L., Melnikov D.V., Kirilenko A.S., Ovsyannikov G.N.

¹ *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ), г. Москва*

² *Институт геохимии и аналитической химии им. Вернадского РАН (ГЕОХИ РАН), г. Москва;*

e-mail: mashtol@mail.ru

³ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Начато изучение пеплов крупного извержения вулкана Шивелуч, начавшегося 10 апреля 2023 г. Получены данные по валовому и гранулометрическому составу материала, а также по составу минеральных фаз и вулканического стекла. Обнаружены необычные структуры основной массы пепловых частиц.

В ходе крупного извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. в виде пепло-газовых облаков и пирокластических потоков были выброшены огромные массы пепла [1]. Образцы пеплов были отобраны в поселке Ключи и районе р. Байдарная, после чего изучались посредством разных аналитических методов. Нашей задачей был поиск уникальных характеристик, отличающих пепел столь крупного извержения от изверженного материала предшествующих событий.

Методы исследования

Гранулометрический анализ пеплов был проведен методом анализа распределения частиц по размерам в суспензиях, эмульсиях и порошках на лазерном анализаторе размеров частиц Microtrac S3500 в ЦКП «Функция и свойства почв и почвенного покрова» Почвенного института им. В.В. Докучаева. Содержание главных петрогенных элементов определялось методом рентгенфлуоресцентного анализа на вакуумном спектрометре последовательного действия (с дисперсией по длине волны), модель Axios mAX производства компании PANalytical в ЦКП «ИГЕМ-аналитика» ИГЕМ РАН; погрешности измерения составили 1-5 % для элементов с концентрациями более 0.5 масс. % и до 12 % для элементов с концентрациями менее 0.5 масс. %. Изучение составов вулканического стекла и минералов, а также фотографирование образцов в отраженных электронах проводилось на микроанализаторе JXA-8200 фирмы JEOL (Япония), оборудованном четырьмя кристалл-дифракционными спектрометрами со сменными кристаллами-анализаторами и энергодисперсионным спектрометром фирмы JEOL (ИГЕМ РАН).

Характеристики пеплов

Гранулометрический состав пеплов из разных точек практически одинаков: в них преобладает фракция <100 мкм; на р. Байдарная она в среднем составляет 86-88 об. %, а в поселке Ключи >90 об. %. Валовые составы пеплов, отобранных на разных расстояниях от центра извержения, также почти не имеют различий. Эти анализы соответствуют андезиту 61-62 масс. % SiO₂, 0.5 % TiO₂, 16 % Al₂O₃, 3 % MgO, 5 % FeO, сумма щелочей 6.5 %. Видимо, в данном случае обычная при воздушном переносе тефры золовая дифференциация не получила отражения в химизме пепла.

Такой состав типичен для современных извержений вулкана Шивелуч [5, 6]. Обычен и минеральный состав: плагиоклаз, кристобалит, амфиболы, орто- и клинопироксены, титаномagnetит, редко – зерна оливина. Однако среди структурных характеристик пеплов последнего извержения имеется ряд особенностей:

1. Обилие свидетельств быстрого смещения равновесия, возможно, связанного с магматическим смешением [4]: резкая обратная зональность плагиоклаза (рис. 1г) или

вкрапленники роговой обманки с широкой реакционной каймой гранулярного типа (рис. 1а), состоящей из агрегата амфибола и титаномагнетита с редкими вростками пироксена (рис. 1б, в).

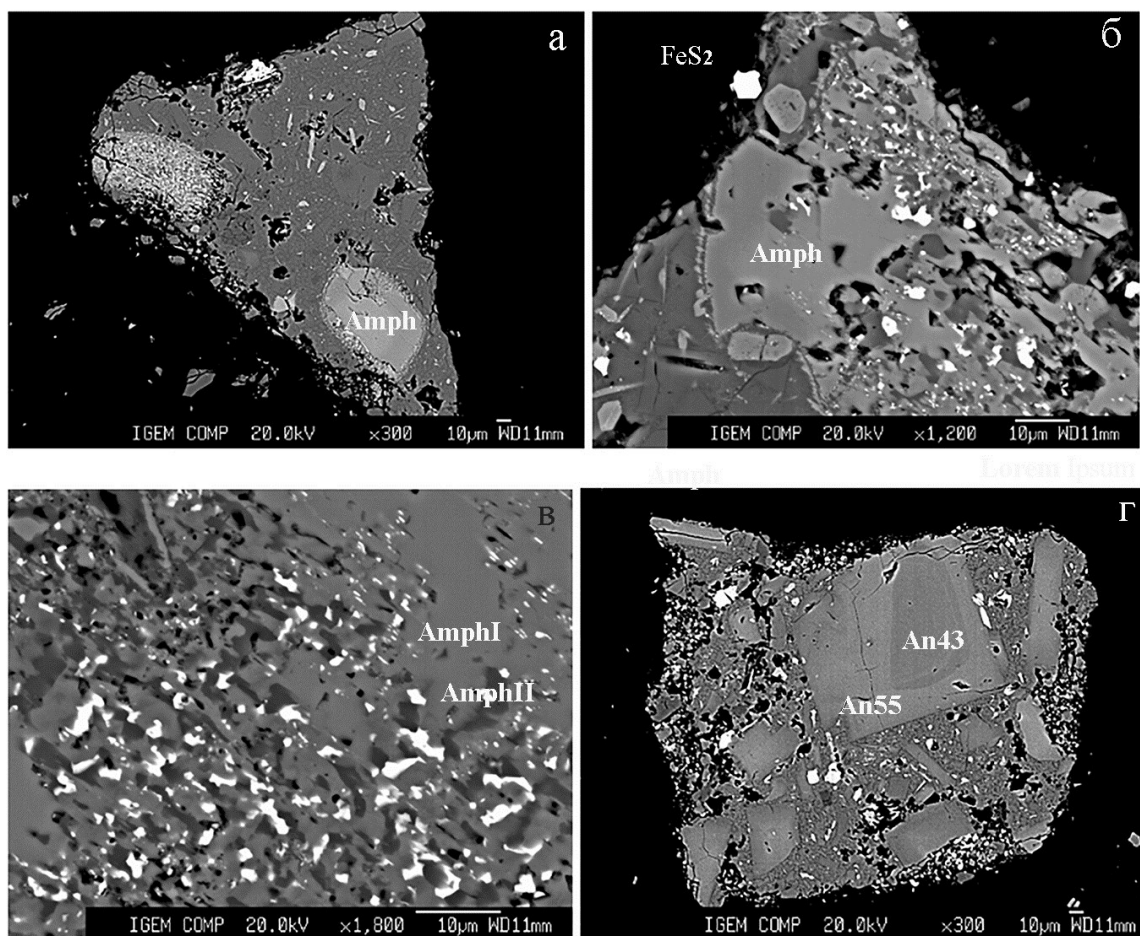


Рис. 1. Фото пепловых частиц в отраженных электронах. а-в – реакционные каймы вокруг зерен амфибола; г – вкрапленник плагиоклаза с обратной зональностью. Amph – амфибол, An – анортит.

2. Наличие частиц, сложенных основной массой породы, с весьма специфической структурой (рис. 2а, б), представляющей из себя мозаику участков практически кварцевого состава (темные прожилки) и состава, вероятно, близкого к плагиоклазу (светлые участки). Ранее таких структур, сходных с эвтектоидными, в основной массе пепловых частиц не отмечалось; наиболее распространена была стекловатая основная масса с микролитами (рис. 2в). К сожалению, состав этих контрастных по составу участков по отдельности определить не удалось в связи с их малыми размерами, однако зондовый анализ площадки при использовании широкого растра дал состав (табл. 1), очень сходный с составом практически гомогенного вулканического стекла, измеренного в других пепловых частицах (рис. 2в, г).

Составы остаточных стекол, которыми представлена значительная часть объема пепла, соответствуют дациту с содержанием SiO_2 75-80 масс. %, Al_2O_3 – 11-12 масс. %, сумма щелочей около 5-7 масс. % (вероятнее всего, такой разброс значений связан с особенностями измерения натрия при малом диаметре пучка микрозонда). Стекла пеплов извержений 2005, 2008, 2018, 2019 гг. имеют тот же состав [5]. Незначительное отличие наблюдается только у стекол извержения 17.11.2014 г., для которых средний состав чуть более обогащен кремнеземом (усредненное значение SiO_2 81 масс. %).

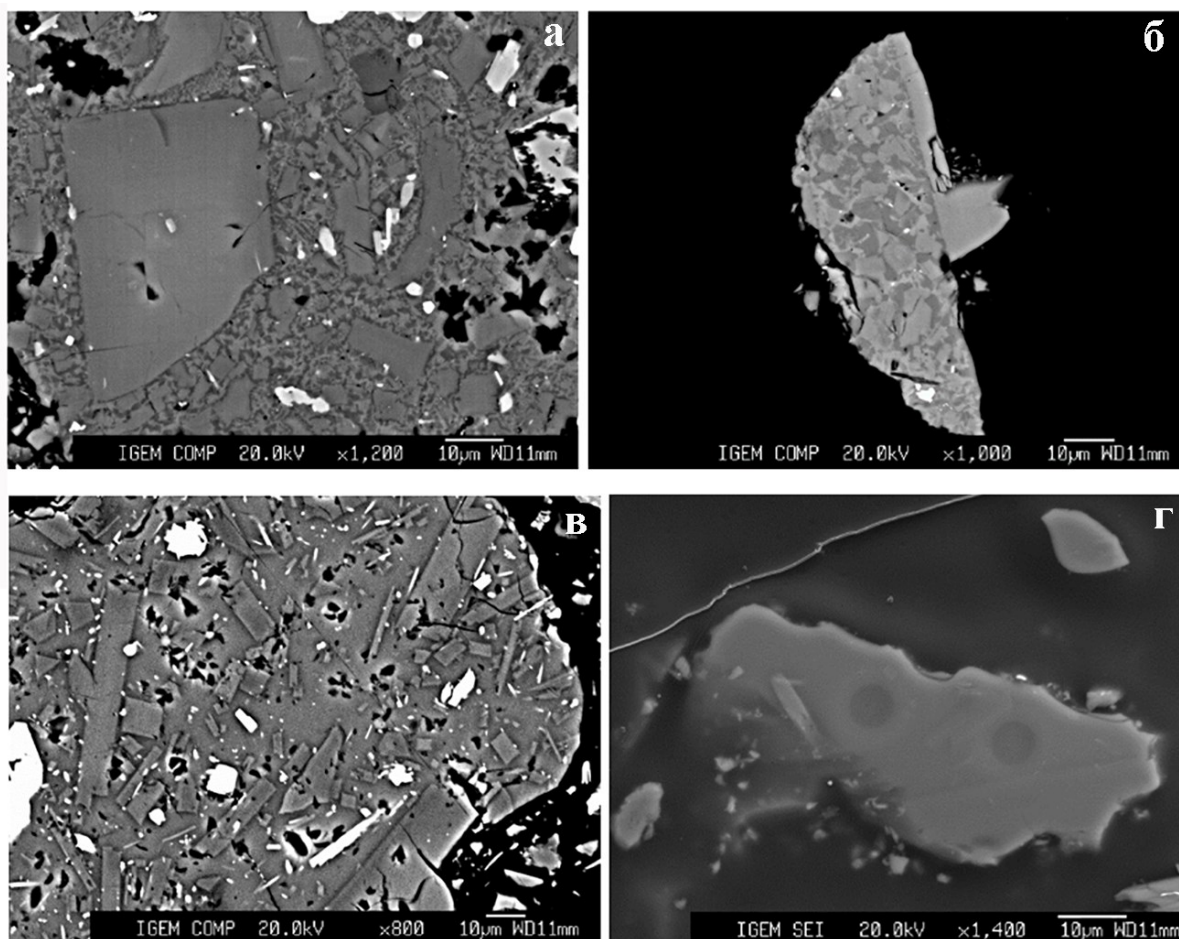


Рис. 2. Фото основной массы пепловых частиц в отраженных электронах. а, б – срастания фаз в основной массе (извержение 2023 г.); в – типичная структура основной массы с микролитами в частицах пепла вулкана Шивелуч (извержение 2005 г.); г – частицы практически гомогенного стекла (извержение 2023 г.)

Таблица 1. Представительные анализы вулканических стекол

№	1	2	3	4	5	6
SiO ₂	75.96	77.83	77.78	75.32	78.29	75.94
TiO ₂	0.29	0.20	0.28	0.24	0.45	0.24
Al ₂ O ₃	11.47	11.13	10.91	12.16	11.32	11.24
FeO	0.71	0.75	0.78	0.85	1.04	0.49
MnO	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01
MgO	0.02	0.07	0.07	0.13	0.32	0.12
CaO	0.60	0.41	0.36	0.75	0.50	0.96
Na ₂ O	3.98	2.37	2.85	3.93	3.27	3.96
K ₂ O	3.26	3.10	3.39	3.16	3.58	2.72
P ₂ O ₅	0.14	0.22	0.20	0.18	0.25	0.20
Cl	0.08	0.06	0.09	0.06	0.05	0.01
Сумма	97.50	98.13	99.72	100.80	99.08	100.17

Примечание. 1-5 – участки стекла основной массы, 6 – снятый растром 10×10 участок полифазного агрегата основной массы (рис. 2 а, б).

Минералы в пеплах извержения 2023 г. также весьма схожи по составам с ранее встречавшимися в тefре и лавах этого вулкана [2, 3], за исключением фазы, присутствующей в кайме обрастания по амфиболу (табл. 2, № 4). Изучение этой фазы (вероятно, амфибола щелочного ряда) требует дополнительных исследований, поскольку пока получено слишком мало анализов.

Таблица 2. Представительные анализы минералов пеплов Шивелуча

№	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	54.12	49.25	44.54	50.97	59.97	54.62	59.75
TiO ₂	0.77	0.42	1.36	0.56	0.04	0.01	0.02
Al ₂ O ₃	1.31	1.63	8.81	18.53	24.89	28.22	24.85
FeO	16.30	6.19	13.91	4.40	0.61	0.57	0.42
MnO	1.05	0.25	0.42	0.10	0.00	0.00	0.00
MgO	23.67	14.16	13.47	4.52	0.02	0.02	0.00
CaO	1.29	20.96	11.01	10.38	7.45	11.18	7.17
Na ₂ O	0.14	0.38	2.62	4.69	6.51	4.83	6.93
K ₂ O	1.03	0.01	0.54	0.91	0.61	0.32	0.49
Сумма	99.69	93.25	96.66	95.07	100.10	99.76	99.63

Примечание. 1, 2 – орто- и клинопироксен мелкозернистых зерен; 3 – амфибол, ядро зерна; 4 – амфибол (?) каймы распада (AmphI и AmphII на рис. 1в, соответственно); 5-7 – плагиоклазы.

Итак, главные характеристики пеплов извержения вулканов Шивелуч в апреле 2023 г., крупнейшего за последние годы, пока малоотличимы от показателей менее интенсивных выбросов (андезитовый состав пеплов, риодацитовый-риолитовый состав вулканического стекла, состав и соотношения вкрапленников). Необычными оказались структуры основной массы в некоторых пепловых частицах, а также специфический состав опацитовых кайм, развившихся по амфиболу на контакте с неравновесным расплавом, и этот своеобразный материал нуждается в дальнейшем изучении.

Работа выполнена в соответствии с Госзаданием ИГЕМ РАН, ГЕОХИ РАН и ИВиС ДВО РАН.

Список литературы

1. *Гирина О.А., Луян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
2. *Горбач Н.В., Гавриленко М.Г., Философова Т.М.* Химический и минеральный составы продуктов извержения вулкана Молодой Шивелуч в сентябре 2016 г. // Материалы XX региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2017 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2017. С. 26-29.
3. *Горбач Н.В., Портнягин М.В.* Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 140-172.
4. *Плечов П.Ю., Цай А.Е., Щербаков В.Д., Дирксен О.В.* Роговые обманки андезитов извержения 30 марта 1956 года вулкана Безымянного и условия их «опацинизации» // Петрология. 2007. Т. 16. № 1. С. 21-37.
5. *Толстых М.Л., Бабанский А.Д., Горбач Н.В., Мельников Д.В.* Характеристики пеплов вулкана Шивелуч извержений декабря 2018 г. и августа 2019 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIII ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 2020 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2020. С. 56-59.
6. *Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. et al.* TephraKam: Geochemical database of glass composition in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (NW Pacific) // Earth Syst. Sci. Data Discuss. 2019. V. 12. № 1. P. 469-486. <https://doi.org/10.5194/essd-12-469-2020>

Сильная эксплозивная активность вулкана Карымский в 2022 г.: отложения, механизм

Белоусов А.Б.¹, Белоусова М.Г.¹, Двигало В.Н.¹, Шакирова А.А.², Давыдова В.О.³, Басанина А.Е.³

Strong explosive activity of Karymsky volcano in 2022: deposits and eruption mechanism
Belousov A.B., Belousova M.G., Dvigalo V.N., Shakirova A.A., Davydova V.O., Basanina A.E.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: belousov@mail.ru*

² *Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

³ *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

В 2022 г. на вулкане Карымский произошла серия сильных эксплозий, визуальные данные о которых оказались очень ограничены. Мы реконструировали характер и последовательность событий этой эруптивной активности, а также предложили возможный механизм на основе изучения образовавшихся пирокластических отложений с привлечением всей иной доступной информации (визуальные наблюдения, сейсмика, акустика, космические и аэрофотоснимки).

Введение

Карымский – один из самых активных вулканов Камчатки, находящийся в состоянии практически непрерывного извержения с момента первых описаний в середине XII века (рис. 1). Активность Карымского вулкана – преимущественно классического вулканского типа [3]. Она проявляется в виде частых выбросов бомб типа хлебной корки и пепла на высоту 1-3 км из центрального кратера, сопровождающихся периодическим излиянием глыбовых потоков сильно вязкой андезитовой лавы [1]. На фоне этой слабой – умеренной активности иногда (например, извержения 1962-1965 гг. и 1996 г.) происходят более сильные эксплозивные события.



Рис. 1. Общий вид конуса вулкана Карымский с юго-востока, июль 2023 г. Верхняя часть конуса прорезана радиальными желобами, эродированными бомбовыми лавинами эксплозий 2022 г. Все фото А. Белоусова.

Активность вулкана Карымский в 2022 г.

По акустическим, сейсмическим и спутниковым данным, активность вулкана в 2022 г. включала серию разномасштабных эксплозий, среди которых выделяются два основных (наиболее сильных) эксплозивных события: 20 апреля и 13 июля (рис. 2). Эруптивные облака достигали высоты 5-10 км над кратером (данные КФ ФИЦ ЕГС РАН). Проведенные нами летом 2023 г. полевые работы показали, что эти события сформировали принципиально различные пирокластические отложения и, соответственно, имели различные механизмы образования.

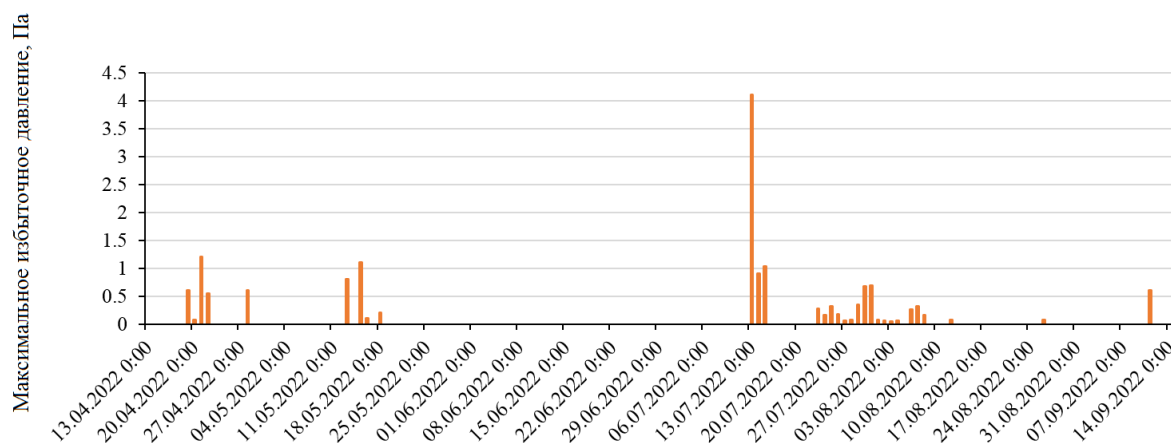


Рис. 2. Максимальное избыточное давление, зарегистрированное инфразвуковой станцией, от эксплозий вулкана Карымский 2022 г.

Несмотря на значительные различия в облике и типе продуктов извержений, их ювенильный материал выдержан по валовому химическому составу (61.1-61.9 масс. % SiO_2 , 1.5-1.6 масс. % K_2O) и набору фенокристаллов: резко преобладающий плагиоклаз со слабо выраженной зональностью (An_{52-66}) и единичными реликтовыми ядрами (An_{83-88}); клинопироксен ($\text{Mg}\# \sim 73$); ортопироксен ($\text{Mg}\# 69-71$) и микрофенокристы титаномагнетита. Принципиальные различия отмечаются в структурно-текстурных особенностях образцов: вариации содержания вкрапленников (от $\sim 10\%$ до $\sim 30\%$), структурах основной массы (от стекловатой до практически полностью раскристаллизованной, с интерстициями, выполненными стеклом риолитового состава), морфология микролитов (от отдельных таблитчатых кристаллов до многочисленных игольчатых скелетных кристаллов). Геохимические и петрографические особенности свидетельствуют о том, что эволюция магмы, питавшей эксплозии, шла по единому сценарию и в сходных условиях вплоть до начала преруптивных процессов, в ходе которых формировались их различия.

По сейсмическим данным эксплозивная деятельность 20 апреля продолжалась около 3 часов и привела к образованию у подножья конуса вулкана обширного поля (площадью около 1 км^2) весьма необычных пирокластических потоков, состоящих из крупных (1-3 м) бомб сильно вспененного андезита, часто имеющих стекловатую «хлебную корку», без присутствия мелкообломочного заполнителя (рис. 3), а также узкого шлейфа маломощных (1-5 см) отложений тефры, представленной смесью пемзовых лапилли и стекловатого грубо-зернистого пепла. Литологические характеристики пирокластических потоков 20 апреля не имеют, насколько известно авторам, близких аналогов как на вулкане Карымский, так и на других вулканах мира.

Характеристики материала потоков позволяют предположить, что эксплозивная деятельность 20 апреля была связана с быстрым подъемом по каналу вулкана новой порции горячей (содержащей мало фенокристаллов и микролитов), относительно маловязкой и сильно газонасыщенной магмы: эта магма при закалке во внешних частях бомб дала стекловатый андезит, а во внутренних частях бомб сильно вспенивалась и образовывала пемзовидный и шлаковидный андезит. Часть растворенных летучих начинала отделяться в газовые пузыри еще во время подъема магмы по каналу. Необычно низкая вязкость магмы этого извержения позволяла отделяющимся летучим формировать большие (десятки см) газовые пузыри, которые могли всплывать в магме при ее подъеме по каналу, а при выходе на поверхность в кратере вулкана фрагментировать ее, разбрасывая крупные бомбы. Бомбы выбрасывались на небольшую высоту и небольшое расстояние от кратера; большая их часть выпадала в прикратерной области на склоны конуса вулкана, образуя бомбовые лавины. В процессе движения лавин по склонам вулкана, внутренняя часть бомб оставалась

пластичной и продолжала вспениваться, что приводило к их сильному раздутию и последующей пластичной деформации (смятию) (рис. 3). Эта необычная, не имеющая аналогов взрывная деятельность приводила к формированию материала преимущественно грубообломочной (бомбовой) размерности. Относительно небольшое количество образовавшейся мелкообломочной пироклаستيкулы не выпало на склоны вулкана вместе с бомбами, а было вынесено вверх в составе конвективного пеплогазового облака, которое сносилось ветром далеко на юго-восток, отложив узкий шлейф тефры (грубый стекловатый пепел и пемзовые лапилли размером до 6.5 см) с максимальной толщиной слоя отложений до 5 см в районе дома экспедиционной базы ИВиС ДВО РАН (3.5 км от вулкана).



Рис. 3. Пирокластический поток бомб сильно вспененного андезита 20 апреля 2022 г. На переднем плане – бомба этого потока, которая вспенилась и деформировалась в процессе движения. Размер бомбы больше 2 м.

Взрывная деятельность 13 июля существенно отличалась от извержения 20 апреля как по характеру образовавшихся пирокластических отложений, так и по механизму взрывной деятельности. Это извержение привело к выбросу большого количества угловатых бомб относительно хорошо раскристаллизованного плотного андезита, часть которых была выброшена по баллистическим траекториям на расстояние до 2.5 км от кратера вулкана, где оставила широкие (до 5 м) и глубокие (до 2 м) воронки (рис. 4а) в поясе кустарников ольхового стланика на юго-восточном подножье конуса и на поверхности пирокластических потоков извержения 20 апреля, а часть выпала на склоны конуса вокруг кратера, сформировав протяженные (более 1.5 км) лавины грубообломочного материала (рис. 4б).

В ходе этой взрывной активности была разрушена телеметрическая сейсмическая станция КФ ФИЦ ЕГС РАН. Характеристики выброшенного материала позволяют предположить, что взрывная деятельность 13 июля разрушила внутрикратерный купол, который, вероятно, сформировался в кратере после выбросов 20 апреля. Механизм разрушения купола можно представить как «классический» выброс вулканической пробки с ее фрагментацией по механизму «волны дробления» М. Алидибирова [2].

Извержения 20 апреля и 13 июля существенно изменили внешний облик вулкана Карымский и параметры его постройки. В верхней части конуса образовались многочисленные радиальные рытвины (см. рис. 1), эродированные пирокластическими потоками (бомбовыми лавинами).

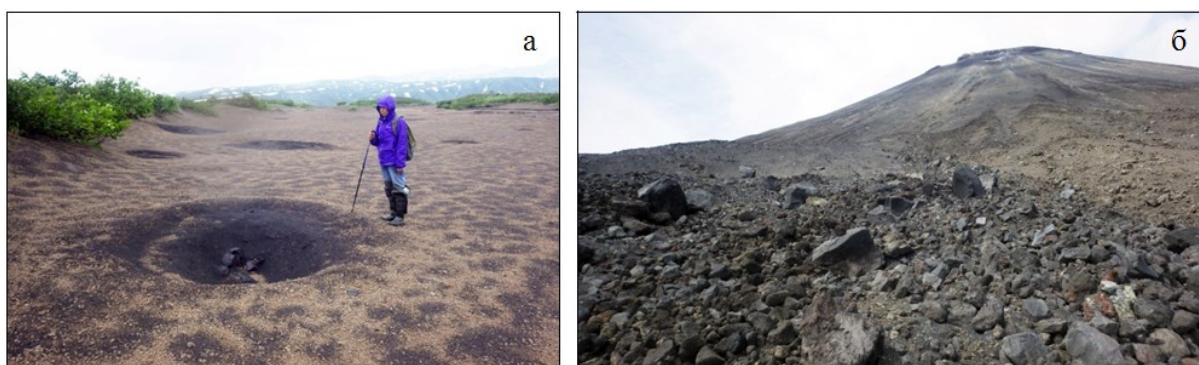


Рис. 4. Последствия эксплозивной активности вулкана Карымский 13 июля 2022 г.: а – воронки от падения бомб плотного андезита (ювенильный материал); б – пирокластический поток, состоящий из бомб плотного андезита.

По результатам аэрофотосъемки 28 декабря 2022 г., кратер вулкана имеет размер 302×331 м. По сравнению с результатами предыдущей аэрофотосъемки (17 июля 2018 г.), средний диаметр кратера увеличился с 252 м до 316 м (рис. 5), а глубина кратера – с 131.9 м до 146.2 м. Максимальная высота конуса вулкана уменьшилась на 16.1 м.

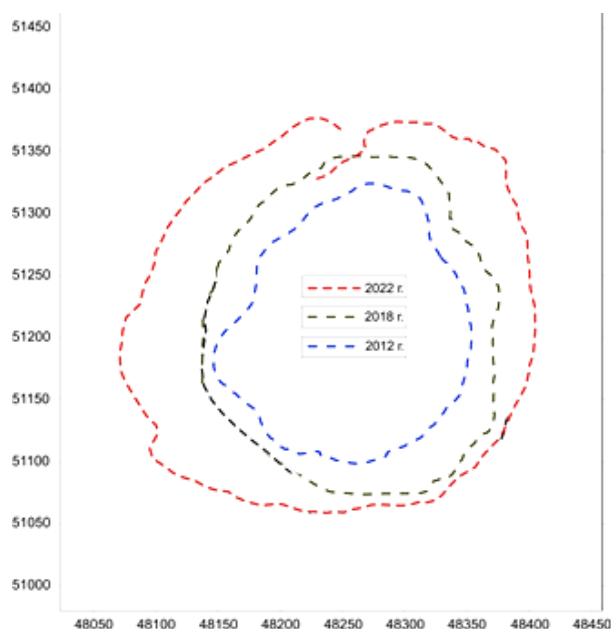


Рис. 5. Контуры гребней кратера вулкана Карымский в 2012-2022 гг.

Авторы благодарят Томаса Вальтера за помощь в проведении аэросъемки вулкана Карымский в 2018 г., А.Ю. Озерова за организацию полета и съемки в 2022 г., А.В. Шевченко и В.А. Цветкова за предоставленные к обработке материалы аэросъемок.

Список литературы

1. *Иванов Б.В.* Извержение Карымского вулкана в 1962-1965 гг. и вулканы Карымской группы. М.: Наука, 1970. 134 с.
2. *Alidibirov M., Dingwell D.* Three fragmentation mechanisms for highly viscous magma under rapid decompression. // *Journal of Volcanology and Geothermal Research.* 2000. V. 100. P. 413-421.
3. *Clarke A., Ongaro T.E., Belousov A.* Vulcanian explosions. / In: Sigurdsson H. et al. (Eds.) *The encyclopedia of volcanoes.* Elsevier, 2015. P. 505-518.

Пароксизмальные извержения Ключевского вулкана в 1945, 1994, 2023 гг.: динамика, отложения, механизм

Белоусов А.Б., Озеров А.Ю., Белоусова М.Г., Демянчук Ю.В.

Paroxysmal eruptions of Klyuchevskoy volcano in 1945, 1994, 2023: dynamics, deposits and mechanism

Belousov A.B., Ozerov A.Yu., Belousova M.G., Demyanchuk Yu.V.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: belousov@mail.ru*

В 1945 г. Б.И. Пийп наблюдал сильное эксплозивное извержение вершинного кратера вулкана Ключевской, которое выделил в особый «пароксизмальный» тип извержений этого вулкана. С тех пор произошло еще 2 извержения такого же типа (в 1994 и 2023 гг.), что позволило провести их сравнение и уточнить некоторые характеристики извержений этого типа.

В 1945 г. Б.И. Пийп [6] наблюдал, изучил и описал сильное эксплозивное извержение вершинного кратера вулкана Ключевской (рис. 1а), которое выделил в особый «пароксизмальный» тип извержений этого вулкана. В понятие «пароксизмальное извержение» Пийп включил не только тот факт, что активность 1945 г. резко выделялась интенсивной эксплозивной деятельностью с образованием эруптивного облака высотой 10 км над кратером и выбросом бомб на высоту 1.5 км (рис. 2а), но и то, что оно сопровождалось рядом особых геологических явлений, к которым Пийп отнес:

- формирование «горячих лавин» (пирокластических потоков);
- образование протяженных водных потоков (лахаров), достигающих уровня поселка Ключи;
- резкое углубление вершинного кратера;
- образование на склоне вулкана нового крупного радиального желоба – «шарра» (термин предложен Пийпом по аналогии с желобом Sciarra del Fuoco на склоне вулкана Стромболи) (рис. 3а).

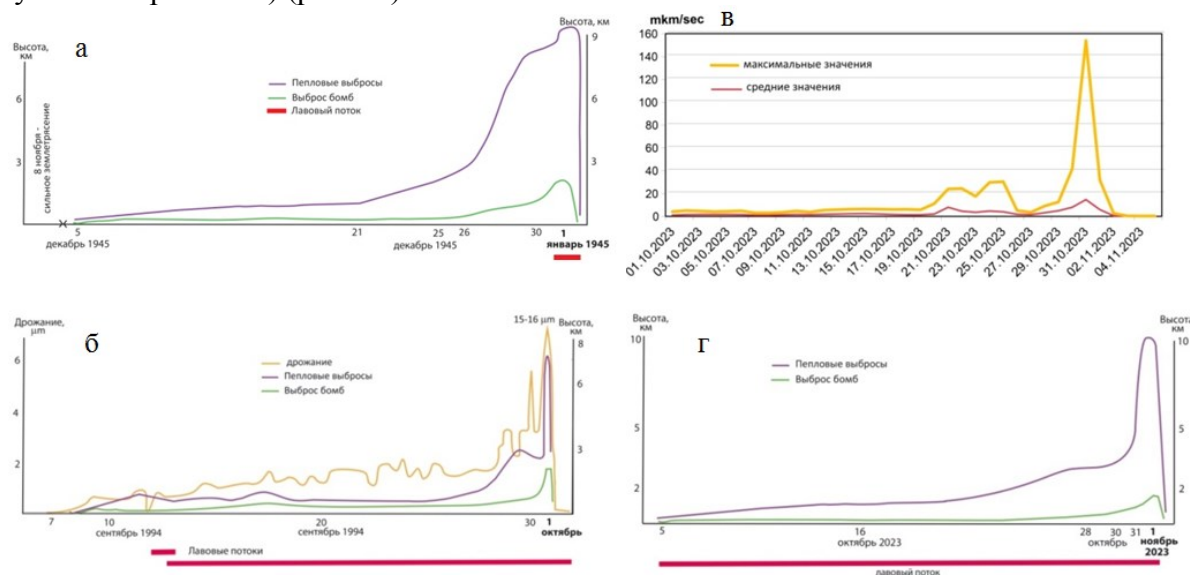


Рис. 1. Динамика параметров пароксизмальных извержений Ключевского вулкана. а – для извержения 1945 г. [6]; б – для извержения 1994 г. [5]; в, г – для извержения 2023 г.: в – вулканическое дрожание на сейсмостанции Цирк, г – выбросы бомб и пепла и наличие лавовых потоков.

На основе этих критериев, среди прошлых извержений вулкана Ключевской, Б.И. Пийп отнес к пароксизмальным извержения 1737, 1762, 1790(?), 1821, 1853, 1878, 1904, 1926(?) гг., и средний интервал между ними оценил в 26 лет.



Рис. 2. Пароксизмальные извержения вулкана Ключевской:

а – 1 января 1945 г., рисунок Б.И. Пийпа [6];
б – 1 октября 1994 г., фото А.Б. Белоусова;
в – 1 ноября 2023 г., фото А.Б. Белоусова.

Появившийся позднее ряд наблюдений за вулканом показал, что некоторые из явлений, отнесенных Пийпом к чертам пароксизмальных извержений, могут наблюдаться и при рядовых («непароксизмальных») извержениях. Так образование протяженных лахаров и пирокластических потоков наблюдалось в ходе извержений 1985 г. [1] и 2016 г. [2]. В 1984 г. также наблюдалось существенное углубление Крестовской шарры [3], образовавшейся в 1945 г., а в 2016 г. заметно углубилась Апахончичская шарра, время образования которой неизвестно [2].

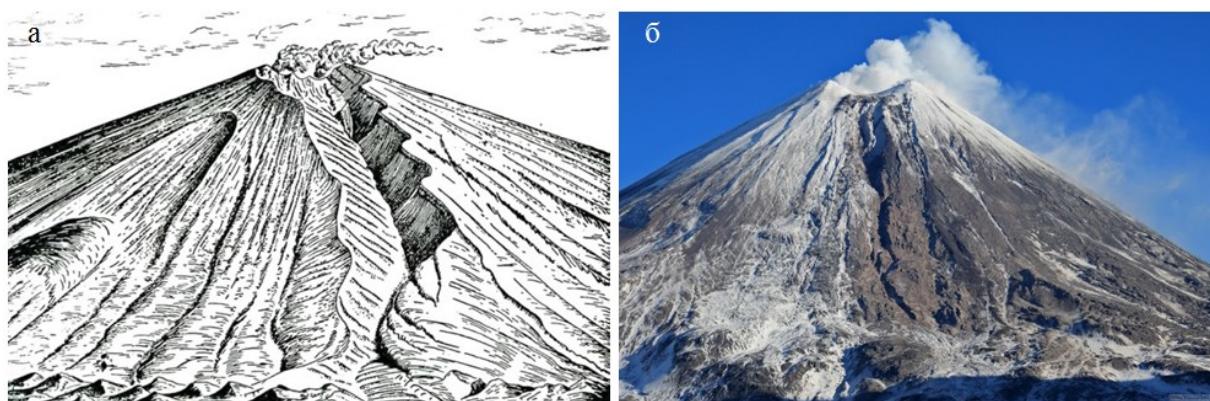


Рис. 3. Новые желоба (шарры) на склонах вулкана Ключевской: а – северо-западный склон после извержения 1945 г., рисунок Б.И. Пийпа [6]; б – западный склон после извержения 2023 г. Фото Ю.В. Демянчука.

Следующее после 1945 г. пароксизмальное извержение Ключевского вулкана произошло через 49 лет, в 1994 г. (рис. 16 и 26). Оно оказалось во многих деталях сходно с извержением 1945 г. [5]. Наиболее значимое его отличие – отсутствие формирования новой шарры (однако в ходе этого извержения произошло углубление Крестовской шарры).

В 2023 г., то есть еще через 29 лет, произошло новое пароксизмальное извержение Ключевского вулкана (рис. 1в, г, 2в), которое имело многие характерные черты извержений 1945 и 1994 гг. Событие сопровождалось формированием многочисленных пирокластических потоков и лахаров, а также образованием новой шарры на западном склоне конуса вулкана (рис. 3б). Вершинный кратер, также как и после извержений 1945 и 1994 гг., резко углубился. Характеристики наблюдавшихся пароксизмальных извержений Ключевского вулкана суммированы в таблице.

Таблица. Характеристики пароксизмальных извержений вулкана Ключевской в 1945, 1994 и 2023 гг.

Дата извержения	Длит-ть извержения, часы	Высота пепл. облака над кратером, км	Высота выбросов бомб над кратером, км	Лавовый поток	Пир. поток	Грязевой поток	Углубление кратера	Образование шарра
1.01.1945	15	10	>1.5	+	+	+	+	+
1.10.1994	8-10	8	2	+	+	+	+	-
1.11.2023	13	8-10	1.5	+	+	+	+	+

Продукты извержения 2023 г. – типичные для вершинных извержений Ключевского вулкана субафировые известково-щелочные андезибазальты. Отложения пирокластических потоков извержения еще не исследованы, но можно предположить, что их характеристики близки потокам 1994 г. Механизм эксплозивной деятельности пароксизмальных извержений, вероятно, связан с извержением магмы, содержащей крупные пакеты газовых пузырей, которые всплывают в магме, поднимающейся по подводящему каналу вулкана [4]. Пакеты образуются при увеличении скорости подъема магмы по каналу (визуально отмечено в 1994 и 2023 гг. по усилению активности лавовых потоков, которое начиналось незадолго до и продолжалось во время пароксизмального усиления эксплозивной активности вершинного кратера). Природа и механизм образования шарр Ключевского вулкана долгое время оставался дискуссионным, им приписывалось тектоническое, обвальное и другое происхождение [3]. Накопленные данные наблюдений пароксизмальных извержений показывают, что их формирование происходит при разрушении верхнего многолетнемерзлого слоя вулканокластики, покрывающего конус вулкана, при термическом воздействии лавовых потоков и бомб, извергаемых из вершинного кратера. Обвалы и фреатомагматические взрывы, которые сопровождают этот процесс, приводят к образованию пирокластических потоков и лахаров [7].

Углубление вершинного кратера в процессе пароксизмальных извержений происходит в результате оседания (провала) дна кратера в подводящий канал вулкана, опустошенный в результате интенсивной эксплозивной деятельности.

Заключение

Пароксизмальное извержение 2023 г. во многих чертах повторило события 1945 и 1994 гг. В ходе извержений наблюдались не только сильная эксплозивная деятельность в вершинном кратере, но и все сопутствующие явления, выделенные Б.И. Пийпом в 1945 г. [6] как критерии пароксизмальных извержений (пирокластические потоки, лахары, углубление кратера и образование новой шарры). Временной интервал между наблюдавшимися пароксизмальными извержениями (49 и 29 лет) оказался продолжительнее, чем предполагалось. Вероятно, Пийп при анализе прошлых извержений включил в список пароксизмальных и некоторые рядовые извержения в связи с отсутствием исчерпывающей информации об извержениях до 1935 г., когда была организована Камчатская вулканостанция.

Через полгода после пароксизмального извержения 1945 г. на восточном склоне вулкана произошел крупный побочный прорыв Юбилейный [6]. После извержения 1994 г. подобного явления не наблюдалось, и, в целом, частота образования побочных прорывов резко снизилась, однако, нельзя исключить образование крупного побочного прорыва Ключевского вулкана после извержения 2023 г. в ближайшее время.

Список литературы

1. *Белоусов А.Б.* Фреатический взрыв на Ключевском вулкане 2 декабря 1985 г. // Вопросы географии Камчатки. 1990. № 10. С. 108-112.
2. *Белоусов А.Б., Белоусова М.Г.* Пирокластические потоки вулкана Ключевской, Камчатка. Вулканизм и связанные с ним процессы // Материалы XXII Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 28-29 марта 2019 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2019. С. 11-13.
3. *Двигало В.Н., Мелекесцев И.В.* Крупные современные обвалы на конусе вулкана Ключевской (по результатам ревизии последствий событий 1944-1945 и 1984-1985 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 3-17.
4. *Озеров А.Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: ГЕОС, 2019. 306 с.
5. *Озеров А.Ю., Карпов Г.А., Дроздин В.А. и др.* Динамика извержения Ключевского вулкана 7 сентября – 2 октября 1994 г. (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 1996. № 5. С. 3-16.
6. *Пийп Б.И.* Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом. // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. М.: Изд-во АН СССР, 1956. Вып. 11. 310 с.
7. *Belousov A., Behncke B., Belousova M.* Generation of pyroclastic flows by explosive interaction of lava flows with ice/water-saturated substrate // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2011. V. 202. P. 60-72.

Голоценовое эксплозивное извержение на перешейке Ветровой как индикатор активного вулканизма на о. Итуруп (Курильская островная дуга)

Bergal-Kuvikas O.V.¹, Smirnov S.Z.², Agatova A.R.², Degterev A.V.³, Razjigaeva N.G.⁴, Pinegina T.K.¹, Portnyagin M.V.⁵, Karmanov N.S.², Timina T.Yu.²

Holocene explosive eruption on Vetrovoy Isthmus as an indicator of active volcanism on Iturup Isl. (Kurile Island arc)

Bergal-Kuvikas O.V., Smirnov S.Z., Agatova A.R., Degterev A.V., Razjigaeva N.G., Pinegina T.K., Portnyagin M.V., Karmanov N.S., Timina T.Yu.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; e-mail: kuvikas@mail.ru*

² *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск*

³ *Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск*

⁴ *Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Владивосток*

⁵ *GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany*

На основании общности геохимических характеристик идентифицирован источник горизонта СКг на перешейке Ветровой, о. Итуруп. Полученные данные свидетельствуют об активном вулканизме на перешейке Ветровой и требуют пересмотра оценки вулканоопасности.

В ходе региональных тефростратиграфических исследований 2007-2008 гг. в почвенно-пирокластических разрезах на островах Уруп, Чирпой, Симушир, Ушишир, Расшуа и Матуа был обнаружен горизонт кислой тефры (~74-79 SiO₂ масс. %, ~1.4-1.8 K₂O масс. %), получивший индекс СКг [2-4]. Время формирования тефры установлено по радиоуглеродным (¹⁴C) датам подстилающих органогенных отложений и укладывается в интервал около 2490-2100 лет назад [2-4]. Мощность горизонта уменьшается в северо-восточном направлении (рисунок, а). Это позволило предположить, что потенциальный источник извержения мог находиться на о. Итуруп [2-4].

В ходе экспедиционных работ 2018 г. на о. Итуруп в правом борту безымянного ручья, устье которого расположено в 2.25 км к западу от устья ручья Пемзового и в 9.4 км к западу-юго-западу от перешейка Ветрового, А.В. Рыбиным (ИМГиГ ДВО РАН, Южно-Сахалинск) был обнаружен разрез голоценовых отложений, содержащий прослой тефры. Разрез был назван «Гурам» (рисунок, г-д). Наиболее мощный (примерно 20-сантиметровый) слой тефры в этом разрезе, состоящий из светло-серого вулканического песка с белыми пемзовыми лапилли размером до 5 см и залегающий непосредственно на палеопочве, свидетельствует об эксплозивном извержении.

Результаты минералого-геохимического анализа пемз разреза Гурам показывают, что их происхождение связано с магмой, аналогичной по минеральному и химическому составу магме, сформировавшей пемзовую толщу перешейка Ветрового и урочища Белые Скалы [1, 5]. Пемзовые лапилли разреза Гурам близки к наиболее кремнистым составам пемз перешейка Ветрового и урочища Белые Скалы [1]. Составы стекла основной массы также пересекаются с составами пемз перешейка Ветрового и урочища Белые Скалы, отличаясь от них чуть более высокими средними содержаниями SiO₂ и пониженными содержаниями щелочей. При этом составы близки по содержанию калия, но имеют более широкие вариации в сторону пониженных концентраций Na₂O и Al₂O₃. Стекла основной массы пемз из разреза Гурам обладают немного повышенными содержаниями FeO при близком MgO. Характер распределения нормированных концентраций редких и рассеянных элементов пемз разреза Гурам сходен с пемзами перешейка Ветрового. В спектрах последних иногда проявляется положительная Sr аномалия, которая отсутствует в составах исследованных пемз Гурама [1].

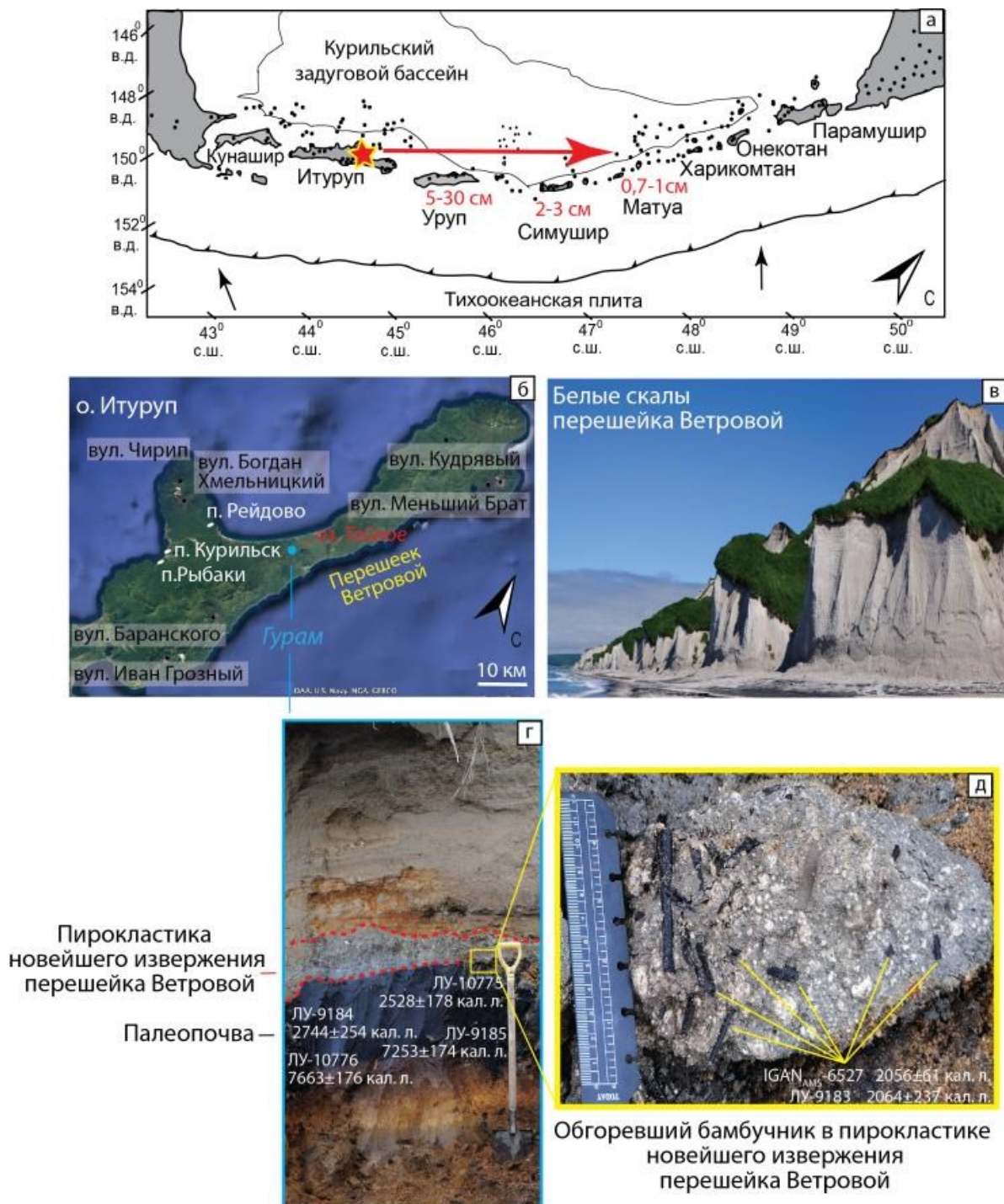


Рисунок. Расположение перешейка Ветровой (а, б), обнажений Белые скалы (в) и разреза Гурам (г, д) на о. Итуруп. Стрелкой показано распространение пирокластики горизонта СКг по [2].

По данным радиоуглеродного датирования (рисунок, г-д), формирование палеопочвы, подстилающей горизонт тефры, происходило около 7700-2500 лет назад (л.н.) [1]. AMS ^{14}C датирование сохранившихся в тефре обугленных стеблей бамбучника курильского (*Sasa kurilensis*), погибшего вследствие перекрытия тефрой (рисунок, г-д), позволило с большой точностью установить, что эксплозивное извержение на о. Итуруп в районе перешейка Ветровой произошло около 2115-1995 л.н. (календарных). Это событие существенно моложе полученных ранее оценок времени образования мощной толщи пемзовых туфов в урочище Белые Скалы и на перешейке Ветровом в конце позднего плейстоцена, что, таким образом, свидетельствует еще об одном эксплозивном извержении в этом районе в позднеголоценовое время.

Наличие признаков активного эксплозивного вулканизма в последние несколько тысяч лет в южной части Курильской островной гряды, близкой к густонаселенным и экономически развитым районам Дальнего Востока России и Японии требует пересмотра прогнозов вулканической опасности в регионе. Это особенно важно, так как о. Итуруп принадлежит к территориям опережающего развития Дальнего Востока России, что означает расширение хозяйственной деятельности на острове в ближайшие годы.

Список литературы

1. Бергаль-Кувикас О.В., Смирнов С.З., Агатова А.Р. и др. Голоценовое эксплозивное извержение на перешейке Ветровой (о. Итуруп) как источник маркирующего горизонта тефры (~2000 лет назад) в центральной части Курильской островной дуги // Доклады Российской Академии наук. Науки о Земле. 2023. Т. 511. № 1. С. 46-54. <https://doi.org/10.31857/S2686739723600601>
2. Nakagawa M., Ishizuka Y., Hasegawa T. et al. Preliminary report on volcanological research of KBP 2007-2008 Cruise by Japanese Volcanology group. KBP Report. 2008. <https://doi.org/10.6067/XCV8668F2H>
3. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Grebennikova T.A. et al. Multiproxy record of late Holocene climatic changes and natural hazards from paleolake deposits of Urup Island (Kuril Islands, North-Western Pacific) // Journal of Asian Earth Sciences. 2019. V. 181. Art. 103916. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103916>
4. Razjigaeva N.G., Ganzey L.A., Arslanov Kh.A. et al. Coastal dunes of Urup Island (Kuril Islands, North Western Pacific): paleoclimatic and environmental archive // Geosystems of Transition Zones. 2022. V. 6. № 2. P. 100-113. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2022.6.2.100-113>
5. Smirnov S.Z., Rybin A.V., Kruk N.N. et al. Parental melts and magma storage of a large-volume dacite eruption at Vetrovoy Isthmus (Iturup Island, Southern Kuril islands): insights into the genesis of subduction zone dacites // Journal of Petrology. 2019. V. 60. № 7. P. 1349-1370. <https://doi.org/10.1093/petrology/egz032>

К вопросу о формировании «радиаторной» столбчатой отдельности

Большаков И.Е.¹, Нуждаев А.А.², Житова Е.С.²

On the issue of «radiator» columnar joints formation

Bolshakov I.E., Nuzhdaev A.A., Zhitova E.S.

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

e-mail: bolshakov.ilya.210@yandex.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Рассматривается вопрос условий образования специфических обнажений вулканитов, имеющих облик «радиаторной» столбчатой отдельности. Приводятся данные о расположении известных обнажений, рассматриваются условия образования столбчатой отдельности, а также делаются предположения о возможных причинах формирования подобных обнажений.

Введение

Столбчатая отдельность – специфическая форма строения массивов эффузивных пород, образующаяся за счет уменьшения объема и растрескивания горных пород при остывании. Наиболее характерен данный вид отдельности для базальтов, однако, встречается и у массивов эффузивных пород иного состава. Вопросам характеристики условий образования столбчатых отдельностей посвящен ряд работ [1-3], но многие аспекты все еще остаются неясными.

Закономерности строения «радиаторной» столбчатой отдельности

В процессе полевых работ в 2023 г. на Северных Курильских островах (остров Шумшу) был обнаружен специфический массив, характеризующийся наличием как столбчатой отдельности, так и ортогональных оси столбов слоистости (рис. 1), придающей им облик, напоминающий радиаторы или гофрированные трубы. Вместе с тем, стоит отметить, что подобная картина не является уникальной и встречается в разных уголках нашей планеты (рис. 2).



Рис. 1. «Радиаторная» столбчатая отдельность в обнажении вблизи мыса Свердловск (остров Шумшу).

Вероятно, наблюдаемое строение обусловлено специфическими процессами дифференциации остывающей магмы. При этом, учитывая строение массива, в целом, можно достоверно утверждать, что это не гравитационная дифференциация, так как в субгоризонтально залегающих столбах данная слоистость оказывается

субвертикальной (рис. 1). Поэтому, вероятно, возникновение этой дифференциации обусловлено именно процессом охлаждения.

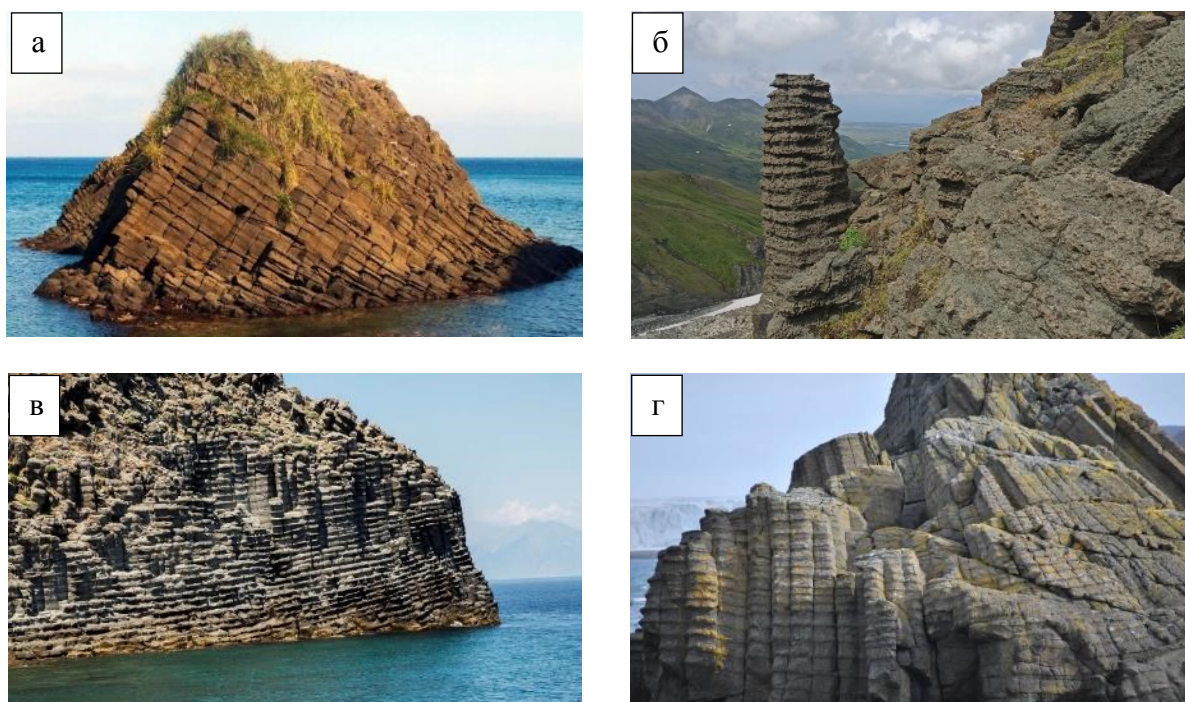


Рис. 2. «Радиаторная» столбчатая отдельность в обнажениях: а – остров Монерон, Сахалинская область [5]; б – г. Верхняя Андриановка, Камчатка (фото Нуждаева А.А.); в – остров Гекчеада, Турция [6]; г – остров Барриентос, Южные Шетландские острова [4].

Кроме того, в строении массива отчетливо видно, что особенности отдельных «слоев» оказываются весьма выдержаны по их простиранию и закономерно наблюдаются на множестве соседних столбов. Так, особенно неустойчивые к физическому воздействию слои являются наиболее «впадающими» в массив практически на всем его протяжении. Можно предположить, что в процессе остывания данного массива первична была именно дифференциация застывающей магмы, которая лишь впоследствии (после окончательного затвердевания) была разбита трещинами, образовавшими столбчатую отдельность.

При этом важно отметить, что в большинстве мест, где распространены подобные массивы, породы оказываются в условиях активного воздействия различных агентов физического выветривания, которое, скорее всего, в значительной мере и обеспечивает наглядность и яркую выраженность подобного облика.

Состав и строение «радиаторного» базальта

Для изучения состава и строения этих образований был отобран ряд образцов, наиболее крупный из которых включал в себя часть как выпуклого (более прочного), так и слабого слоев (рис. 3). В макроскопическом строении отчетливо заметно (за счет желтоватой окраски), что слабый слой в большей степени подвержен процессам вторичных преобразований. Однозначно определить различия в минералогическом составе из макроскопического описания не удалось, хотя создается впечатление, что слабый слой содержит большее количество рудных минералов.

Пожалуй, наиболее отчетливо заметной и интересной особенностью строения данной породы является наличие в выпуклом слое серии темных полос толщиной в несколько миллиметров, которые стабильно располагаются перпендикулярно оси столбчатости (рис. 3).

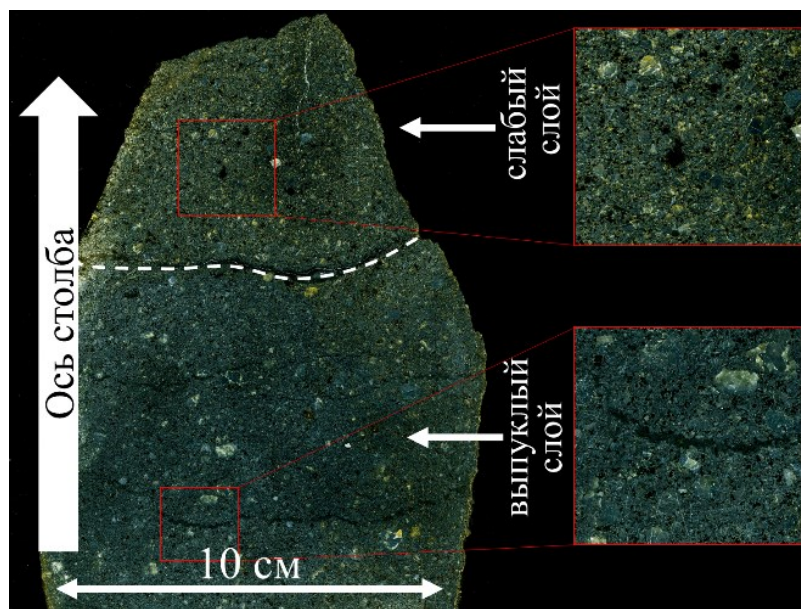


Рис. 3. Общий вид «радиаторного» базальта.

Благодаря анализу шлифов (рис. 4), было выяснено, что эти полосы (в верхней части фотографий шлифов выпуклого слоя) сложены слабо раскристаллизованной массой, составленной в основном микролитами плагиоклаза, характерными для основной массы резко застывающих эффузивных пород. По одной из таких полос проходит трещина, разделяющая два различных слоя, обозначенная белым пунктиром на рис. 3. При этом во всей остальной породе подобные микролиты практически отсутствуют. Большая часть породы хорошо раскристаллизована и сложена крупными кристаллами плагиоклаза (размером 0.5-2 мм) и более редкими крупными кристаллами пироксена. Пироксен также широко распространен в виде мелких кристаллов в пространстве между крупными кристаллами плагиоклаза.

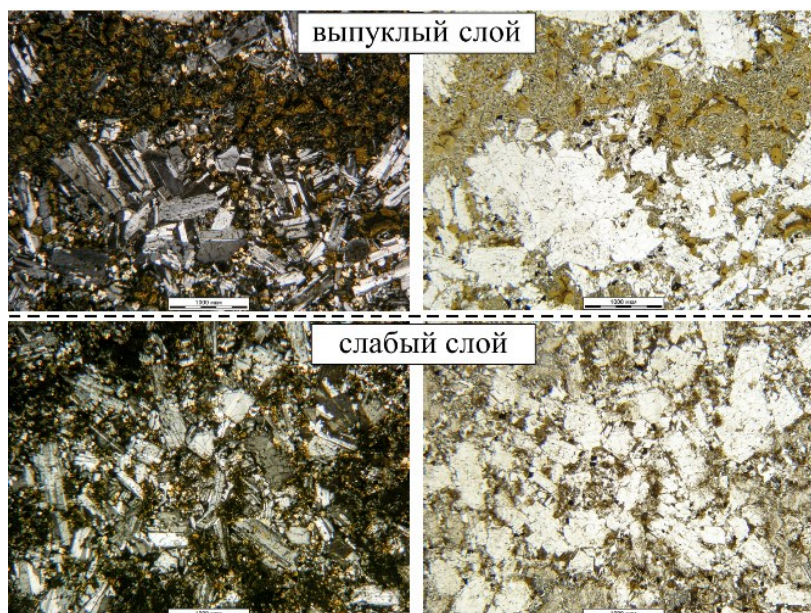


Рис. 4. Общий вид слоев «радиаторного» базальта под микроскопом в одном (справа) и двух (слева) николях.

Таким образом, вероятно, образование этих плохо раскристаллизованных прослоев связано с процессом неравномерного застывания массива и в то же время образования особенностей, обеспечивающих «радиаторный» облик массива на макроуровне.

Для более детального понимания различий было произведено исследование химического состава двух слоев. Определение химического состава проб выполнено методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF) на вакуумном спектрометре Axios mAX. Результаты представлены в таблице. К сожалению, полученные данные не обеспечивают полноценного понимания различий двух слоев, так как их составы весьма близки и в то же время, за счет вторичных изменений в породах, могут быть в определенной степени искажены.

Таблица. Химический состав различных слоев «радиаторных» базальтов

Образец	ППП 1000 °С	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S + SrO + ZrO ₂ + BaO
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
выпуклый слой	0.55	2.46	4.51	20.49	49.06	0.57	10.61	0.89	0.17	10.5	0.12	<0.20
слабый слой	0.68	2.49	5.17	20.56	48.61	0.54	10.14	0.81	0.19	10.5	0.10	<0.20

Выводы

В результате анализа состава и строения пород, слагающих массив, характеризующийся специфическим «радиаторным» строением столбчатой отдельности, был выявлен ряд особенностей, причины возникновения которых достоверно определить пока не удалось. Для полноценного ответа на вопрос о причинах возникновения подобных образований требуются дополнительные исследования.

Список литературы

1. *Budkewitsch P., Robin P.Y.* Modeling the evolution of columnar joints // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1994. V. 59. P. 219-239.
2. *Goehring L., Morris S.W.* Order and disorder in columnar joints // Europhysics Letters. 2005. V. 69. P. 739-745.
3. *Kantha L.H.* Basalt fingers – origin of columnar joints // Geological Magazine. 1981. V. 118. P. 251-264.
4. https://commons.m.wikimedia.org/wiki/Category:Barrientos_Island
5. <http://test.idilesom.com/sakh/places/post/1043>
6. <https://www.gokceada.bel.tr/kaskaval-burnu>

Общая характеристика продуктов извержения вулкана Алаид 2022 г. и некоторые данные о фумарольной деятельности в кратерной части

Большаков И.Е.¹, Нуждаев А.А.², Житова Е.С.², Кузнецов Р.А.², Аникин Л.П.²

General characteristics of the products of the 2022 Alaid volcano eruption and some data on fumarolic activity in the crater zone

Bolshakov I.E., Nuzhdaev A.A., Zhitova E.S., Kuznetsov R.A., Anikin L.P.

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

e-mail: bolshakov.ilya.210@yandex.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Приводятся основные данные об извержении вулкана Алаид в 2022 г., петрографическое описание продуктов извержения, химический состав продуктов извержения, а также данные о фумарольной активности и распространении температурных аномалий в кратерной части вулкана на момент июля 2023 г.

Введение

Вулкан Алаид располагается в северной части Большой Курильской гряды (рис. 1) и является самым высоким вулканом на всех Курильских островах. Последнее извержение этого вулкана началось 15.09.2022 г. и завершилось 01.12.2022 г. [6]. В результате этого извержения в кратерной части вулкана образовался крупный шлаковый конус (рис. 1), по южному склону вулкана спустилось два крупных лавовых потока [4], а на мысе Девятка образовался крупный конус выноса отложений лахаров [5]. Летом 2023 г. в процессе полевых работ были отобраны образцы лав извержения 2022 г., а также исследована кратерная часть вулкана [3]. Отбор образцов производился в двух точках (рис. 1).

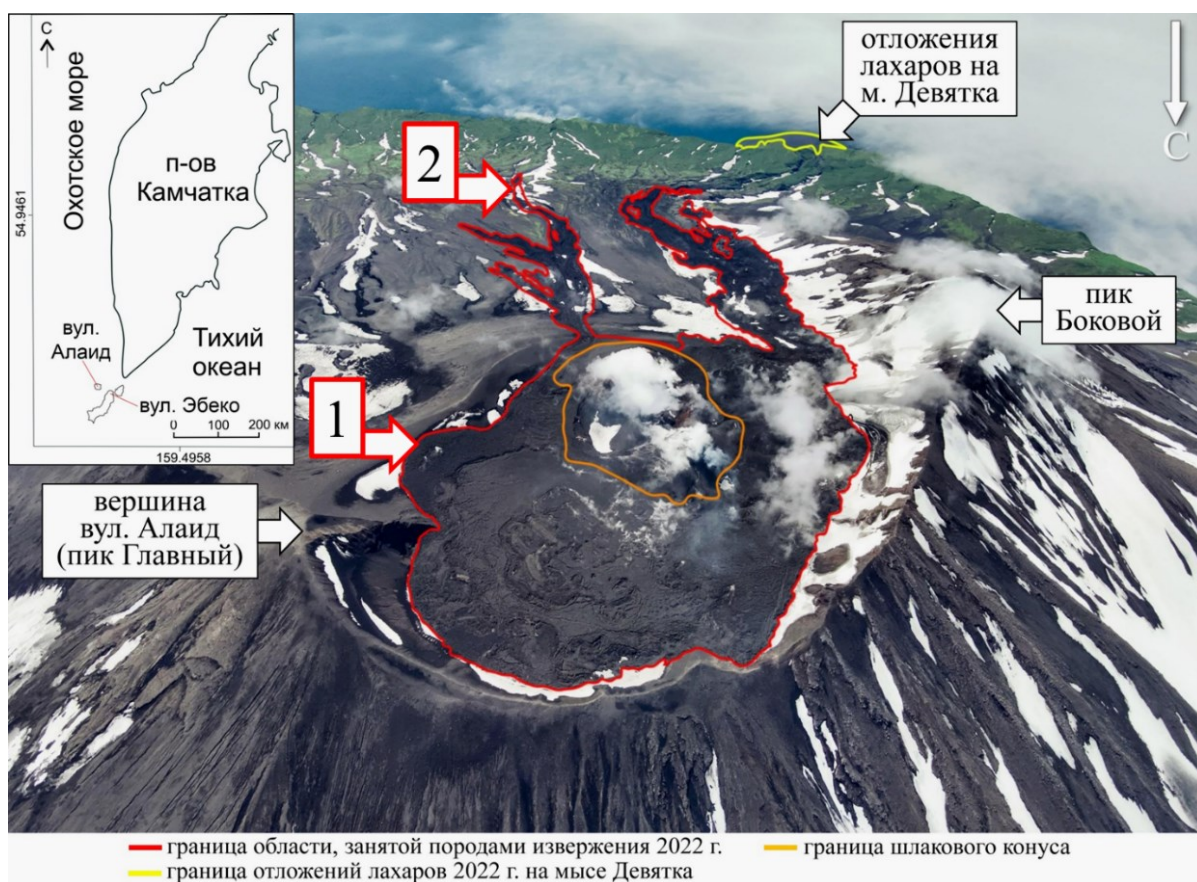


Рис. 1. Общий вид вершинной части вулкана Алаид и его южного склона с лавовыми потоками извержения 2022 г. (цифрами обозначены точки отбора образцов лавы).

Характеристика лав

В результате последних двух извержений вулкана Алаид в значительной степени изменился облик его кратерной части (рис. 2). В частности, лава заполнила кратерную нишу и перелилась через его край, образовав в самом кратере весьма ровную плоскую поверхность.



Рис. 2. Общий вид кратерной части вулкана Алаид в 2007 и 2023 гг.

Базальты, образовавшиеся в результате этого извержения, по химическому и минералогическому составу близки к породам предыдущих извержений вулкана Алаид [1, 2] и представляют собой высокоглиноземистые базальты с немного повышенной щелочностью. Детальный химический состав образцов из вершинной части и нижней части лавового потока приведен в таблице. Определение химического состава проб выполнено методом рентгеноспектрального флуоресцентного анализа (XRF) на вакуумном спектрометре Axios mAX. Из данной таблицы можно отчетливо видеть, что образцы имеют практически идентичный химический состав.

Таблица. Химический состав лав извержения вулкана Алаид 2022 г.

№ точки отбора	ППП 1000 °С	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	S + SrO + ZrO ₂ + BaO
		%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
№1 (вершина)	0.46	3.08	3.44	19.82	50.74	1.97	9.40	0.92	0.18	9.52	0.31	<0.20
№2 (низ потока)	0.52	3.09	3.49	19.68	50.75	1.99	9.37	0.93	0.18	9.53	0.32	<0.20

С минералогической точки зрения образцы базальтов также весьма близки к продуктам предыдущих исторических извержений. Среди вкрапленников абсолютно преобладают плагиоклазы, а в подчиненном количестве присутствуют пироксены (рис. 3). Плагиоклазы имеют немного вытянутую таблитчатую форму с преимущественным размером от 0.4 до 1.5 мм по длинной стороне. Пироксены имеют значительно меньший размер (0.1-0.2 мм). Основная масса, по большей части, представлена микролитами плагиоклаза и вулканическим стеклом. Основные различия между образцами, отобранными в двух указанных точках, заключаются в характере пористости (рис. 3). У образцов из кратерной части вулкана поры имеют правильную форму и в большинстве размеры от 1 до 5 мм. В то же время, поры у образцов из нижней части лавового потока имеют меньшие размеры и менее правильную форму (рис. 3).

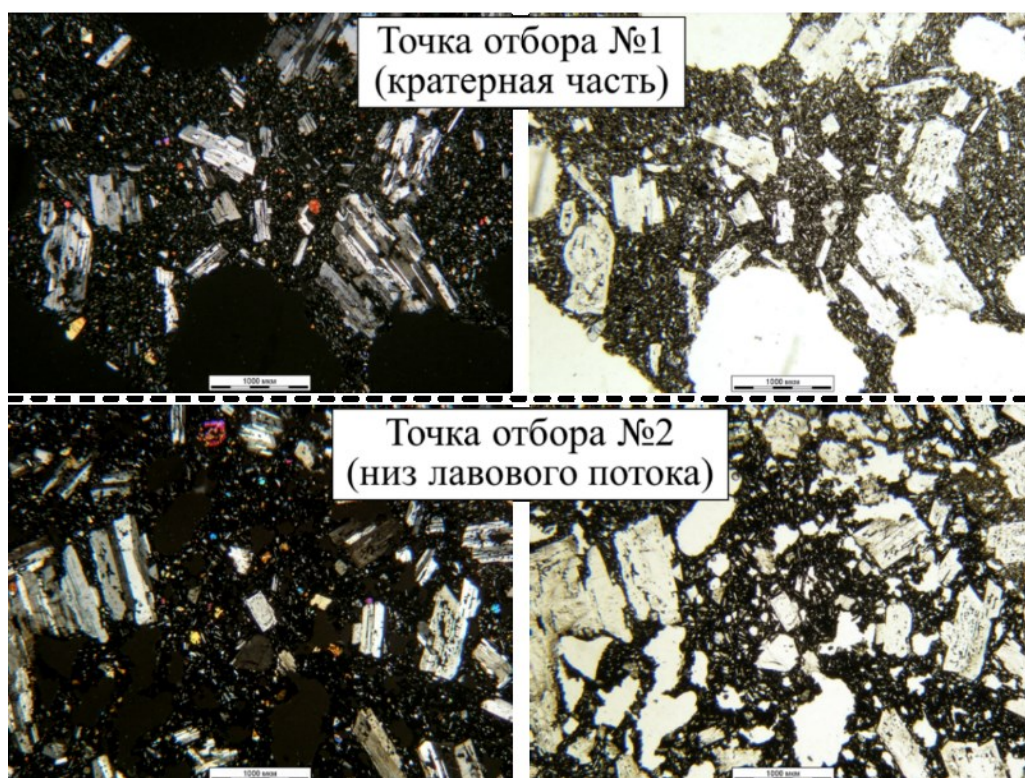


Рис. 3. Общий вид лавы извержения 2022 г. под микроскопом в одном (справа) и двух (слева) николях.

Характеристика фумарольной деятельности

На момент проведения полевых работ (июнь-июль 2023 г.) в привершинной части вулкана, а в особенности на шлаковом конусе (рис. 4), наблюдалась активная фумарольная деятельность. Температурные аномалии во всей кратерной области были зафиксированы при помощи квадрокоптера DJI Mavic 3T. Основные температурные аномалии были расположены на шлаковом конусе, где температура превышала 500 °С, однако на занятой лавой поверхности в виде отдельных трещин также наблюдались участки дегазации.

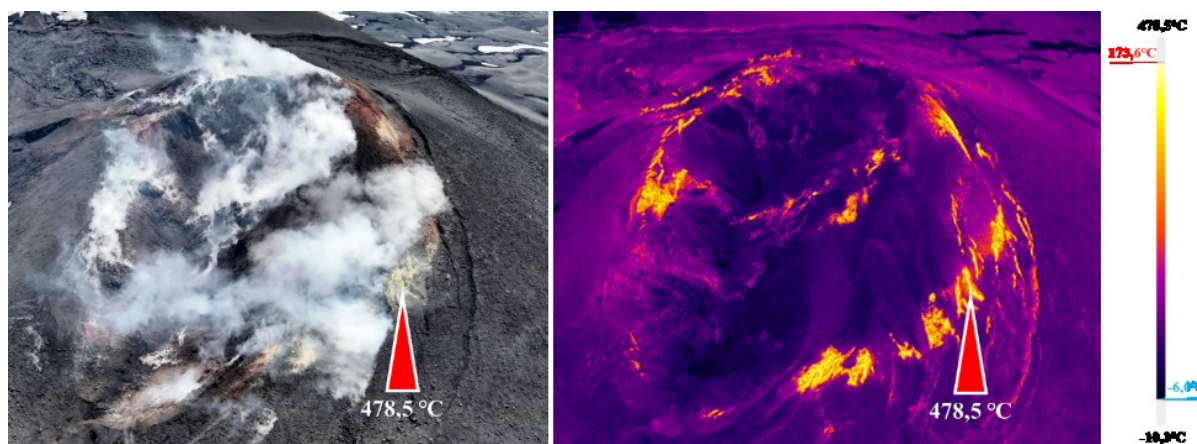


Рис. 4. Расположение температурных аномалий на шлаковом конусе извержения 2022 г. (слева в видимом спектре, справа в ИК спектре).

В процессе полевых работ были отобраны образцы вторичной минерализации у одного из выходов разогретых газов, однако отбор образцов на наиболее интересных участках был невозможен по причинам того, что крайне высокая температура и активная дегазация не позволили достаточно приблизиться к этим участкам.

Выводы

В результате извержения 2022 г. в значительной степени изменился облик вулкана Алаид. Наиболее значительным образом изменилась кратерная область, а также береговая линия в районе мыса Девятка. В кратерной части вулкана образовался крупный шлаковый конус, на котором больше чем через полгода после завершения извержения продолжалась активная дегазация, причем температура фумарол превышала 500 °С. Твердые продукты извержения представлены высокоглиноземистыми базальтами с немного повышенной щелочностью. При этом различия лав в кратерной части и нижней части лавового потока минимальны. В целом, как с химической, так и минералогической точек зрения эти породы весьма схожи с известными ранее лавами предыдущих исторических извержений вулкана.

Список литературы

1. Авдейко Г.П., Хренов А.П., Флеров Г.Б. и др. Извержение вулкана Алаид в 1972 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1974. № 50. С. 64-80.
2. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусов А.А. Вулканический массив Алаид (Курильская островная дуга) // Проблемы эксплозивного вулканизма (к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный). Материалы первого международного симпозиума. Петропавловск-Камчатский, 25-30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН. 2006. С. 135-143.
3. Большаков И.Е., Нуждаев А.А., Кузнецов Р.А. и др. Экспедиция на вулканы Алаид и Эбеко (Курильские острова) летом 2023 года // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2023. № 4. Вып. 60. С. 105-113.
4. Дегтерев А.В., Чибисова М.В., Романюк Ф.А. Эффузивно-эксплозивное извержение вулкана Алаид в 2022 г. (о. Атласова, Северные Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2023. № 2. Вып. 58. С. 17-28.
5. Котенко Т.А. Лахары на о. Атласова в сентябре-октябре 2022 г. (Курильские острова) // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2022. № 4. Вып. 56. С. 117-122.
6. Вулкан Алаид. Основные характеристики (<http://geoportal.kscnet.ru/volcanoes/volc?name=Alaid>). Дата обращения: 14.02.2024.

Акустический мониторинг извержения вулкана Ключевской в июне 2023 – январе 2024 года

Будилов Д.И.

Acoustic monitoring of the Klyuchevskoy volcano eruption in June 2023 – January 2024 Budilov D.I.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: budilovdmi@gmail.com

Рассмотрена динамика извержения вулкана Ключевской в период июнь 2023 – январь 2024 гг. на основе данных акустического мониторинга, полученных инфразвуковой станцией IS44, входящей в состав международной системы мониторинга в рамках Договора о всеобъемлющем запрещении ядерных испытаний. Зафиксированы инфразвуковые сигналы от извержений, сопровождающихся возникновением ударных волн.

Введение

Ключевской – один из активнейших вулканов мира, является стратовулканом с конусом правильной формы. Он относится к Ключевской группе вулканов, расположен в 30 км от пос. Ключи, в 360 км от г. Петропавловска-Камчатского.

Эруптивная деятельность вулкана представлена взрывными и взрывно-эффузивными извержениями продолжительностью от нескольких месяцев до полутора лет [3, 4]. Основные типы взрывных извержений – стромболианский и вулканский.

В ночь на 23 июня 2023 г. началось очередное извержение. 1 ноября 2023 г. в рамках продолжающейся деятельности произошло пароксизмальное извержение, в результате которого пепел поднялся на высоту до 13 км над уровнем моря.

Аппаратура и методика наблюдений

В ходе вулканических извержений формируются ударно-волновые и акустические эффекты в атмосфере, в результате которых происходит генерация акустических сигналов того или иного класса [1]:

1) Аэродинамический шум ($f = 20-1000$ Гц). Он возникает в периоды истечения из кратера пеплогазовой струи.

2) Импульсные акустические сигналы длительностью импульса 0.1-1 с, генерируются при нестационарных процессах в кратерной зоне во время дегазации и фрагментации поступающей на дневную поверхность магмы.

3) Инфразвук ($f = 0.03-1$ Гц), возникающий в результате конвективных процессов, происходящих во время возникновения и формирования эруптивных облаков в процессе выноса продуктов извержений на дневную поверхность, что приводит к формированию восходящей конвективной колонны, турбулентные пульсации в которой и служат источниками инфразвукового сигнала.

4) Длинноволновые возмущения ($f < 0.03$ Гц) связаны с формированием мощной эруптивной колонны во время сильных извержений плинианского типа [1].

Инфразвуковые сигналы (ИС) с периодами от нескольких секунд до нескольких минут слабо затухают и могут распространяться на сотни и тысячи километров.

Так, инфразвуковой станцией IS44, расположенной в пос. Начики (п-ов Камчатка), зарегистрированы ИС от извержения вулкана Ключевской на удалении 379 км от вулкана (рис. 1).

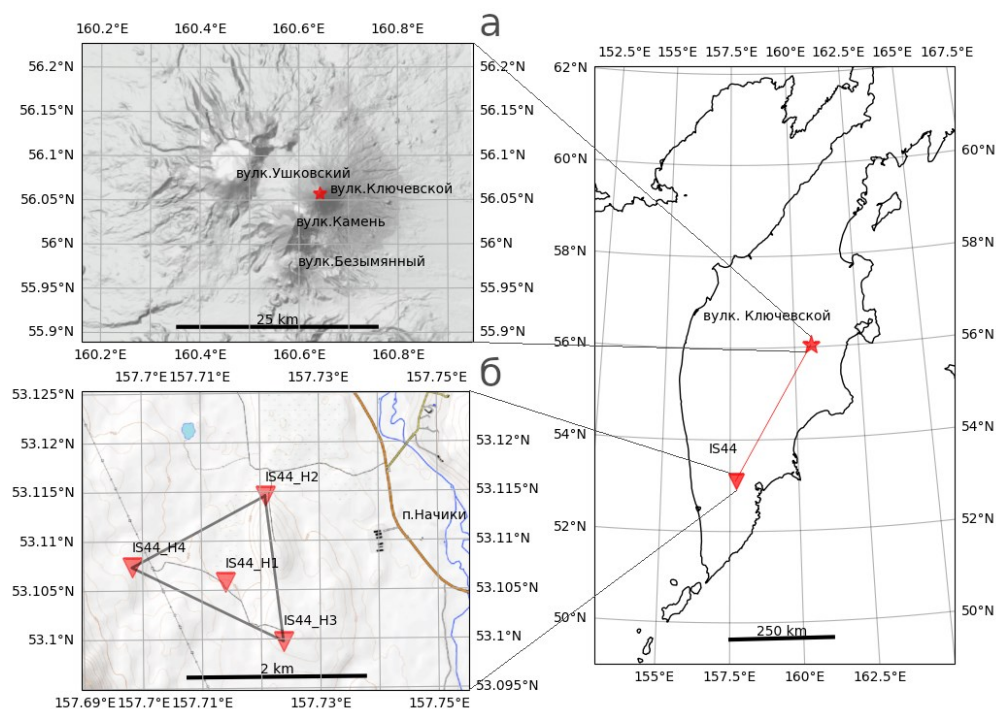


Рис. 1. Расположение вулкана Ключевской (а) и станции IS44 (б) на полуострове Камчатка.

IS44 является частью международной системы контроля за несанкционированными ядерными взрывами. На станции установлена антенна с апертурой 1.8 км на базе четырех микробарографов MB2000 французского производства. Расположение датчиков станции позволяет определять азимут прихода звукового луча со всех направлений от различных источников (рис. 1б). Диапазон частот 0.003-5 Гц при частоте дискретизации 20 Гц.

Сбор и обработка данных осуществляется с использованием информационной системы KamIn, предназначенной для мониторинга волновых возмущений на полуострове Камчатка. Программа позволяет рассчитывать азимут прихода волнового фронта акустических сигналов.

Особенности зарегистрированных акустических сигналов

Особенностью зарегистрированных ИС является группирование сигналов в отдельные временные кластеры длительностью от нескольких минут, что хорошо видно на записи ИС от 1 ноября (рис. 2). При более детальной развертке можно отметить, что в некоторых кластерах наблюдается квазипериодичность регистрации акустических импульсов с периодом $T \sim 30-10$ с, характерная для извержений стромболианского типа [2].

Так как атмосфера Земли является сложной и неоднородной средой, состоящей из различных газов, пыли, водяных паров и других веществ с переменной скоростью звука, из-за рефракции звука наклонный звуковой луч может вернуться к земной поверхности, образуя акустические зоны слышимости, либо может образоваться так называемая зона акустической тени. При изменении температуры на высотах может происходить смещение зоны слышимости и зоны акустической тени. В течение периода наибольшей активности вулкана Ключевской, в период с 28 октября по 2 ноября 2023 г., резких изменений стратификации выявлено не было, и вычисленная на трассе вулкана Ключевской – IS44 эффективная в тропосферном волноводе скорость сильно не изменялась: $C_{эф} \approx 280$ м/с.

Интенсивность извержения нарастала в течение данного периода и достигла пика к 1 ноября, когда регистрировались ИС с максимальной амплитудой избыточного давления $\Delta P = 0.5$ Па (рис. 2в).

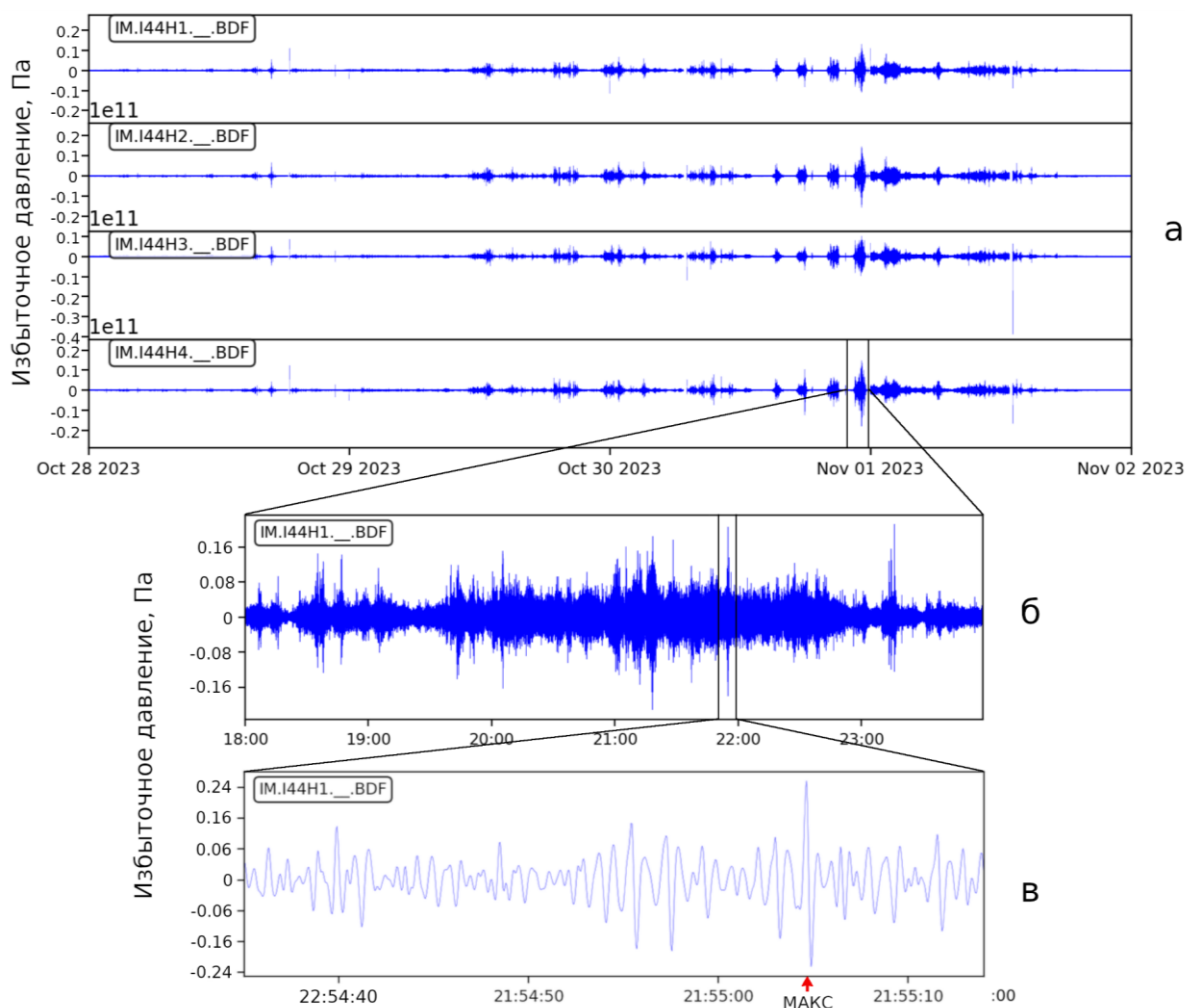


Рис. 2. Запись инфразвуковых сигналов со станции IS44, каналы Н1, Н2, Н3, Н4, 28 октября – 01 ноября 2023 г. (а) и увеличенный фрагмент канала Н1 30 ноября 2023 г. 18:00-23:59 (б, в). Подписью «МАКС» отмечено максимальное значение избыточного давления.

Зарегистрированная при извержении квазипериодичность ИС обусловлена параметрическим автоколебательным процессом, возникающим в процессе отделения газовой фазы из магмы и ее выносом в атмосферу. Подобный феномен регистрировался при извержениях других вулканов стромболианского типа: Алаид в 2015-2016 гг. и трещинного извержения вулкана Толбачик в 1975-1976 гг. [5].

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Фирстов П.П., Куличков С.Н., Махмудов Е.Р. Инфразвуковые волны от извержений вулканов Камчатки // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 4. С. 456-468.
2. Махмудов Е.Р., Фирстов П.П., Будилов Д.И. Информационная система для мониторинга волновых возмущений в атмосфере на полуострове Камчатка «KamIn» // Сейсмические приборы. 2016. Т. 52. № 2. С. 5-16.
3. Озеров А.Ю. Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: Геос, 2019. 306 с.
4. Пийп Б.И. Ключевская сопка и ее извержения в 1944-1945 гг. и в прошлом // Труды Лаборатории вулканологии. 1956. Вып. 11. 311 с.
5. Фирстов П.П. Вулканические акустические сигналы диапазона 1.0-10 Гц и их связь с взрывным процессом. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2003. 90 с.

Некоторые замечания по поводу обособления вулканогенных ландшафтов

Быкасов В.Е.

Some remarks regarding the distinguishing of volcanogenic landscapes

Vykasov V.E.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: pkcats@gmail.com

Показано, что привязка вулканогенных ландшафтов к приповерхностной сфере, ограниченной глубиной проникания корней растений в почво-грунты и высотой слоя воздуха в 20 м над пологом растительного покрова сверху, исключает из сферы изучения ландшафтоведения стратовулканы, щитовые вулканы и кальдеры.

Еще относительно недавно вулканизм как природообразующий процесс привлекал внимание географов, биологов, экологов и ландшафтоведов лишь в силу своего экзотического внешнего проявления. И только в последней четверти XX века в этих научных дисциплинах наметился подход к вулканизму как к фактору, ответственному за формирование вулканогенных биогеоценозов (экосистем) и вулканогенных ландшафтов.

Первой попыткой выделения на Камчатке экосистем, формирующихся при непосредственном взаимодействии биоты с вулканогенным субстратом, можно считать обособление А.М. Стенченко «Узон-Гейзерного термального биоценоза» [7]. Правда, сам исследователь этот природный объект экосистемой не назвал. Но это объясняется тем, что на тот момент экология только начала возвращаться в отечественную науку после ее упадка в 30-е годы прошлого столетия.

В это же время обозначился и ландшафтный подход к обособлению вулканогенных природных систем полуострова [3]. Однако, при этом наблюдается практически полная аналогия между обособлением собственно вулканогенных ландшафтов и выделением вулканогенных биогеоценозов (экосистем), поскольку и в этом случае на первое место выдвигалась проблема освоения биотой поверхности первично-вулканогенного субстрата.

И в самом деле, Ю.Б. Зонов предложил обособлять следующие первичные природно-территориальные комплексы (ПТК) вулканических районов Камчатки: фации (склоны нивальных ложбин, солифлюкционные площадки, шлаковые площади и пр.); урочища (крутые склоны, отрицательные вулканогенно-эрозионные и нивально-гляциальные формы рельефа, холмисто-моренные образования, эрозионные долины, барранкосы, покатые склоны, пологие солифлюкционные склоны, крутые каменистые склоны вулканов, долины временных водотоков и сухих рек, овраги, а также молодые лавовые потоки и кратеры); местности (эрозионно-тектонические склоны долин, предгорные пологохолмистые и слабонаклонные поверхности вулканических плато, крупные экстрозивные купола) и ландшафты (районы) – территории с однородным геолого-геоморфологическим строением [3].

При этом в процессе формирования и развития названных ПТК Ю.Б. Зоновым выделяются:

- 1) стадия неполного (начального) развития, характеризующаяся большой динамикой образования первичной вулканогенной поверхности;
- 2) стадия относительной стабилизации литогенной основы вулканогенных ПТК с появлением на ней пионерных группировок растительного покрова;
- 3) стадия постепенной стабилизации почвенно-растительного покрова первичных биоценозов;
- 4) стадия окончательного формирования ПТК. Причем все эти природные образования объединяются в группы литоморфных и гидроморфных ПТК [3].

Итак, по представлению Ю.Б. Зонова, под вулканогенными ландшафтами понимаются природные системы, возникающие вследствие непосредственного

взаимодействия биоты с поверхностью вулканических пород и построек. А при таком подходе обособляются и исследуются природные объекты, относящиеся к той узкофокальной части ландшафтной сферы, нижняя граница которой определяется по глубине проникновения корней растений, а верхняя граница проводится по 20-метровой высоте над пологом растительного покрова. Поэтому такие природные системы логичнее было бы считать объектами экосферы – то есть экосистемами.

Что же касается динамики и интенсивности процесса формирования и развития названных вулканогенных ПТК, то это, по мнению Ю.Б. Зонова, в первую очередь зависит от мощности и типа извержений и цикличности их проявления. Причем, как подчеркнул сам исследователь, основные тенденции и особенности развития собственно вулканогенных ПТК имеют локальный характер.

Однако придав вулканизму как природообразующему фактору локальный статус, Ю.Б. Зонов исключил вулканизм (вулканогенез) из числа глобальных (тектоногенез, климат, гидрография, биота) ландшафтообразующих факторов.

Примерно в таком же плане были рассмотрены, спустя три десятилетия, вулканогенные природные системы и К.С. Ганзеем, который под ландшафтом понимает генетически однородный природный территориальный комплекс, имеющий одинаковый геологический фундамент, один тип рельефа, одинаковый климат и состоящий из свойственного только данному ландшафту набора динамически сопряженных и закономерно повторяющихся в пространстве основных и второстепенных урочищ [2]. На этом основании, в пределах Курильской вулканической дуги им выделяются восемь видов вулканогенных ландшафтов, обособляемых по геолого-геоморфологическому признаку:

- 1 – ландшафты крутых и средней крутизны склонов древних вулканов;
- 2 – ландшафты крутых и средней крутизны склонов стратовулканических конусов;
- 3 – ландшафты крутых и средней крутизны склонов лавовых потоков;
- 4 – ландшафты крутых и средней крутизны склонов кальдер;
- 5 – ландшафты пологих и средней крутизны склонов слаболитифицированных пемзовых и пирокластических отложений и субвулканических тел;
- 6 – ландшафты расчлененных обрывов с обнажениями андезитов и базальтов;
- 7 – ландшафты субгоризонтальных поверхностей вулканических плато;
- 8 – ландшафты склонов и днищ временных и постоянных водотоков.

Однако при таком подходе генетически и геоморфологически единые ландшафтные комплексы вулканических конусов, кальдер, вулкано-тектонических депрессий и лавовых плато-долов оказываются вне сферы интересов ландшафтоведения. И это при том, что за исключением островов Малой Курильской дуги и острова Шумшу, именно названные современные и древние вулканические постройки, занимая 90 % территории Большой Курильской гряды, определяют общий ландшафтный колорит Курильских островов.

Впрочем, это и понятно, так как темой исследований К.С. Ганзея является изучение процессов взаимодействия биоты с поверхностным вулканогенным субстратом, то есть познание процессов воздействия вулканизма на экосферу и слагающие ее экосистемы, а не выделение и изучение собственно вулканогенных ландшафтов, являющихся неотъемлемой частью ландшафтной оболочки планеты, которая представлена земной корой (литосферой, гидросферой, биосферой и частью атмосферы – тропосферой).

Следует отметить, что еще 1980-х годах в вулканологии сложилось представление о том, что образование и развитие разнообразных вулканогенных геоморфоструктур является неотъемлемым свойством всей ландшафтной оболочки планеты. А несколько позднее уже и само происхождение таких базовых элементов ландшафтной сферы, как литосфера (земная кора), гидросфера, атмосфера и, возможно,

биосфера, стало восприниматься как следствие проявления вулканических и поствулканических процессов и явлений [4].

Именно поэтому мною еще в конце 1970-х годов было предложено воспринимать разнообразные вулканогенные морфоструктуры (вулканические конусы, кальдеры, вулcano-тектонические депрессии и лавовые плато-долы) в качестве оригинальных вулканогенных ландшафтных комплексов (ВЛК), объединяемых в оригинальный же вулканогенный тип ландшафта [1]. Но тогда мою диссертацию не пропустили даже на предзащиту на основании предположения, что ВАК могла не утвердить мою работу в силу спорности тезиса о вулканогенезе как о ведущем ландшафтообразующем факторе областей современного и недавнего вулканизма.

Однако время подтвердило мои представления, ибо позднее в работах отечественных [5] и зарубежных вулканологов было убедительно показано, что и саму ландшафтную сферу Земли (и других планет земной группы) следует воспринимать как продукт деятельности вулcano-магматических процессов, происходивших на планете от момента зарождения пыле-газовой протопланеты до нашего времени.

И действительно, в первые полмиллиарда лет геологической истории Земли (то есть во времена так называемой «лунной стадии» эволюции земной коры), разогрев ее недр за счет энергии аккреции (слипания первичных космических частиц – углистых хондритов), импактных процессов (метеоритной бомбардировки) и радиоактивного распада привел к образованию на ее поверхности своеобразного магматического океана [6]. То есть, говоря иначе, Земля вскоре после своего образования оказалась покрытой слоем расплавленной магмы, вследствие чего какое-то время единственным ландшафтом нашей планеты был вулканогенный жидко-магматический океан.

Правда, пока однозначно судить о вещественном составе (кислом – типа современного континентального, базитовом, анортозитовом или даже комагматитовом) этого первично-вулканогенного ландшафта не представляется возможным. Но в любом случае, говоря о зарождении, формировании и развитии ландшафтной оболочки, следует помнить, что самыми первыми (а многие десятки, если не сотни, миллионов лет и единственными) природными комплексами на земной поверхности были только и исключительно вулканогенные ландшафты.

Вторая (нуклеарная) стадия развития ландшафтной оболочки, или стадия образования ядер (нуклеаров) наиболее древних участков земной коры, охватывает всю архейскую эру. Магматические и метаморфические породы этой стадии представлены ассоциациями пород зеленокаменных поясов, пространственно с ними сопряженных гранито-гнейсовых куполов, дифференцированных тел базальтов и гнейсо-мигматит-гранулитовыми метаморфитами [6]. В целом же, для этой стадии свойственен ареальный (площадной) характер извержений и преимущественное распространение вулканогенных пород толеитовой и известково-щелочной серий с нормальной щелочностью. А к концу этой стадии начали формироваться ядра щитов и оснований древних платформ – кратонов.

В кратонную (то есть переходную от нуклеарной к современной континентально-океанической) стадию развития ландшафтной сферы планеты происходили консолидация и объединение протоконтинентальных ядер предыдущей стадии развития земной коры в жесткие стабилизированные блоки – кратоны, на поверхности которых, примерно ко времени 1.8-2 миллиарда лет назад, образовались первые типично платформенные метаморфические чехлы, а также первые типично платформенные магматические комплексы – траппы.

Наконец, после образования названных мегаструктур внешняя оболочка Земли в своем развитии вступила в стадию формирования континентально-океанической земной коры. Причем в последний миллиард лет геологической истории Земли вулcano-магматизм мало отличался от современного, так как он, прежде всего и

главным образом, характеризовался образованием и развитием мощных литосферных, в том числе и океанических, плит.

Что касается современного этапа развития ландшафтной сферы Земли, то в наши дни на суше расположены около тысячи действующих и потенциально действующих вулканов и многие тысячи конусов моногенных вулканов. Кроме того, только на дне Тихого океана насчитывается не менее 10 000 тысяч вулканов с относительными высотами от одного и более километра, не говоря уже о множестве кальдер, вулканотектонических депрессий и лавовых плато-долов. Поэтому следует говорить не об экзотичности вулканогенных ландшафтных комплексов, а о глобальном распространении разного рода вулканогенных ландшафтных комплексов.

Список литературы

1. *Быкасов В.Е.* Вулканогенные парагенетические ландшафтные комплексы // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1980. Вып. 5. С. 97-105.
2. *Ганзей К.С.* Ландшафты и физико-географическое районирование Курильских островов. Владивосток: Дальнаука, 2010. 214 с.
3. *Зонов Ю.Б.* Влияние современного вулканизма на ландшафты Камчатки // Вопросы географии Тихого океана и притихоокеанских районов. Изд-во ДВГУ. Владивосток. 1975. С. 78-81.
4. *Мархинин Е.К.* Роль вулканизма в формировании земной коры. М.: Наука, 1967. 252 с.
5. *Мархинин Е.К.* Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
6. Новейший и современный вулканизм на территории России / Отв. редактор Н.П. Лаверов. Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта. М.: Наука, 2005. 604 с.
7. *Стенченко А.М.* Узон-Гейзерный термальный биогеоценоз Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 1977. Вып. VII. С. 59-60.

Вулкан Шивелуч: 60 лет со дня катастрофического извержения в 1964 г.

Гирина О.А.

The Sheveluch volcano: 60 years since the catastrophic eruption in 1964

Girina O.A.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: girina@kscnet.ru

В работе показано развитие катастрофического извержения вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г. и его последствия.

Введение

Шивелуч (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/volc?name=Sheveluch>) расположен в северной части Центральной Камчатской депрессии, в 50 км от п. Ключи и в 450 км от г. Петропавловск-Камчатский. Активный Молодой Шивелуч (2800 м) (далее Шивелуч) располагается на дне древней кальдеры, ближе к ее северо-западному краю. Он образован множеством слившихся между собой андезитовых экструзивных куполов, их агломератовых мантий и коротких лавовых потоков. До извержения 1964 г. четыре купола (Центральный, Суелич и др.) находились в привершинной части вулкана. Для Шивелуча известны два типа извержений: катастрофические направленные взрывы с выносом эруптивных продуктов до 2.5 км³ (1854 и 1964 гг.) и умеренные по силе экструзивно-эксплозивно-эффузивные, связанные с ростом лавовых куполов (1790-1810 гг., 1879-1883 гг., 1896-1897 гг., 1925-1930 гг., 1944-1950 гг., 1980 г. – наст. вр.), сопровождаемые пароксизмальными эксплозивными событиями с объемом изверженного материала до 0.5 км³ [1-3, 5-7]. Состав пород вулкана – преимущественно от андезитов до дацитов [5-7].

В 1946-1958 гг. на Камчатской вулканологической станции имелась только одна сейсмическая станция. Ретроспективный анализ данных за этот период выявил многочисленные слабые сейсмические события в районе Шивелуча, которые остались незамеченными [11]. К 1964 г. была создана региональная сеть сейсмостанций [10, 16], позволившая достоверно фиксировать события в районе вулкана и определить, что подготовка ноябрьского извержения Шивелуча началась 24 января 1964 г. с одиночных вулканических землетрясений, в мае была зафиксирована серия таких землетрясений на глубине 0-5 км под вулканом. Исходя из этой информации, П.И. Токарев опубликовал прогноз: извержение вулкана будет в 1964 г. [11].

Катастрофическое извержение вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г.

До середины октября 1964 г. землетрясения под Шивелучем отмечались с интервалом 2-25 дней; с 21 октября начал формироваться рой землетрясений; с 10 ноября скорость и мощность сейсмических процессов в районе вулкана резко возросли.

Главное сдвиговое землетрясение произошло 11 ноября в 19:06 UTC, глубина землетрясений во время извержения составляла 0-5 км [16]. Извержение продолжалось с 19:07 до 20:19 UTC 11 ноября, с 19:20 до 20:22 UTC оно сопровождалось вулканическим дрожанием [5, 10]. По мнению Г.С. Горшкова и Ю.М. Дубика [5], кроме основного взрыва 11 ноября в 19:07 UTC, мог произойти второй взрыв в 19:13 UTC; возможно, слабые эксплозии начались ночью: на микробарограммах между 13:00 и 19:00 UTC зафиксировано 10 событий, которые можно отнести либо к небольшим взрывам, либо к поверхностным волнам, связанным с более сильными вулканическими землетрясениями [5].

Катастрофическое извержение Шивелуча продолжалось 1 ч 12 мин [5, 10]. В результате извержения на месте группы экструзивных куполов вулкана образовался двойной эксплозивный кратер размером 1.5×3.0 км, открытый на юг: северная его часть с десятью воронками была овальной формы размером 1.5×1.0 км, южная – трапецевидной формы размером 2×2 км. В отложениях у нижней границы кратера

образовалось несколько ступеней, наибольшая из которых была высотой до 100 м. Общий объем изверженного и перемещенного материала (образования агломерата направленного взрыва, пирокластических потоков, тефры) составил 2.3 км^3 [5].

Хотя извержение вулкана происходило ранним ноябрьским утром до рассвета, многие наблюдатели отмечали, что в 19:15 UTC в левой стороне кратера вулкана «пробивался узкий столб пламени с небольшим отблеском по кратеру направо» [9, стр. 29], а над вулканом уже поднялась до 12-15 км над уровнем моря (н.у.м.) огромная пепловая туча, в которой сверкали широкие молнии. На всем интервале высот от 300 до 15 000 м дул устойчивый ветер западного и северо-западного направления, поэтому туча перемещалась на восток и юго-восток от вулкана [5, 15, 17].

В 20:20 UTC 11 ноября в п. Усть-Камчатск начался пеплопад: на поверхность земли из тучи выпадал крупный вулканический песок; в 20:30 UTC пеплопад усилился, в 22:00 UTC стала выпадать вулканическая пыль [9]. Пеплопад продолжался в течение 3 ч, пепел отложился слоем 3 см, его количество составило 28 кг/м^2 [5]. К 01:00 UTC 12 ноября эруптивная туча надвинулась на Командорские острова, в п. Никольское пеплопад продолжался до 05:30 UTC (4.5 ч). Пепел отложился слоем 0.25 см, его количество составило 2 кг/м^2 . Общая площадь территории суши и моря, покрытой пеплом, превышала 100 тыс. км^2 [5]. Вблизи вулкана площадь порядка 90 км^2 была покрыта тефрой, состоящей из крупных обломков пемзовидного андезита; в 30-40 км от вулкана тефра была представлена крупным вулканическим песком с небольшим количеством пемзовых лапилли. Общий объем тефры определен в 0.3 км^3 [5].

Моделирование распространения эруптивной тучи извержения 1964 г.

Хотя начало космической эры человечества датируется 4 октября 1957 г., доступных для изучения спутниковых снимков Земли в 1964 г. не существовало. Поток свободно распространяемых спутниковых данных начал расти с конца 1990-х гг. В это же время интенсивное развитие получили математические и алгоритмические программные продукты, предназначенные для моделирования распространения вулканического пепла в атмосфере. В 2000-х гг. в открытом доступе появились метеорологические данные проекта ERA-40 Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды на период с сентября 1957 г. до августа 2002 г. В работе [15] авторы впервые промоделировали (с помощью FALL3D и PUFF) и проанализировали развитие и перемещение пепловой тучи катастрофического извержения вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г. Это позволило восстановить последовательность событий извержения:

– в 19:07 UTC 11 ноября высокотемпературный ювенильный материал устремился на дневную поверхность, вызвав разрушение экструзивных куполов в северной части кратера вулкана мощными взрывами, направленными на юго-запад (извержение направленного взрыва) [5, 15];

– материал разрушенных экструзивных куполов образовал на южном склоне Шивелуча отложения направленного взрыва, имеющие форму широкого веера [5, 15];

– высокотемпературное ювенильное вещество (его содержание в отложениях тефры достигает 95 % [13]) начало выходить по открывшемуся каналу и формировать эруптивную колонну, поднимавшуюся до 15 км н.у.м.; этот процесс сопровождался вулканическим дрожанием, продолжавшимся с 19:20 до 20:22 UTC 11 ноября [5, 10];

– высота тропопаузы над Камчаткой обычно меняется в пределах 8-11 км н.у.м. в течение года [17]. Эруптивная колонна поднялась над тропопаузой и трансформировалась в грибовидное облако с многочисленными молниями, это облако начало двигаться на восток-юго-восток от вулкана;

– одновременно из краевых частей эруптивной колонны обрушивались большие объемы пирокластического материала, которые в виде пирокластических потоков перемещались вдоль центральной части южного склона вулкана (отложения пирокластических потоков располагались на отложениях направленного взрыва [5]);

– над движущимися пирокластическими потоками образовалось коигнимбритовое облако, в котором в турбулентном режиме перемешивались частицы пепла и песка, а также мелкие обломки горных пород. Это облако было слишком тяжелым («свинцового цвета» [9, стр. 30]) и поднималось лишь до 6-12 км н.у.м. В связи с разными направлениями ветра в нижних и высоких слоях атмосферы, коигнимбритовое облако перемещалось на юго-юго-восток от вулкана, в отличие от основного эруптивного облака;

– в Усть-Камчатске пеплопад имел две фазы: с 20:20 до 22:00 UTC 11 ноября пепел выпадал из основного эруптивного облака (крупные пепловые частицы – вулканический песок [9]), которое двигалось с большей скоростью; начиная с 22:00 UTC пепел выпадал из коигнимбритового облака (вулканическая пыль [9]); на фотографии, сделанной в Усть-Камчатске в момент извержения, хорошо выражены кромки этих двух облаков, находящихся на разных высотах [15];

– в п. Никольское пепел выпал только из коигнимбритового облака, траектория основного эруптивного облака проходила к северу от Командорских островов [15];

– благодаря турбулентной диффузии в атмосфере, фронтальная часть главного эруптивного облака медленно поднималась: к 21:37 UTC 11 ноября она была на 16 км н.у.м., к 04:07 UTC 12 ноября – на 16.5 км н.у.м. Через 24 ч после начала извержения эруптивное облако на высоте 16.8 км н.у.м. достигло Аляски; в течение трех дней после начала извержения пепловое облако растянулось на 3000 км и накрыло территории России, Канады, США и Мексики, а также Берингово море и Тихий океан. Общая площадь суши и моря, над которой прошли пеплопады в период с 19:07 UTC 11 ноября по 07:07 UTC 12 ноября, составляла в 147 686 км², в том числе 10 200 км² на суше [15].

В работе [15] впервые была показана опасность эруптивного облака Шивелуча в ноябре 1964 г. для авиации. В течение 9 часов после начала извержения на всех эшелонах авиаполетов к востоку от Камчатки образовалась обширная «бесполетная зона». Не исключено, что пепловые облака Шивелуча продолжали представлять опасность для авиации в районах Канады, США и Мексики в течение 3-5 дней после окончания извержения.

Рост лавового купола в кратере вулкана Шивелуч

Спустя почти 16 лет после катастрофического извержения в эксплозивном кратере вулкана с августа 1980 г. начал расти новый экструзивный купол, рост которого продолжается и поныне [2, 3, 6]. Хотя характер извержения с течением времени менялся (с 1984 г. в районе лавового купола начали происходить отдельные мощные эксплозии, с 2001 г. – выжиматься вязкие лавовые потоки [14]), процесс выноса магматического вещества на дневную поверхность в районе Шивелуча был почти непрерывным. Наиболее мощные пароксизмальные эксплозивные извержения вулкана, связанные с ростом купола, с выносом пепла до 20 км н.у.м. и объемом продуктов до 0.5 км³, наблюдались в 2001, 2004, 2005, 2010 и 2023 гг. [1, 3, 4, 8, 12].

Заключение

Благодаря впервые выполненной учеными ИВиС ДВО РАН, Вычислительного Центра ДВО РАН и Института космических исследований РАН реконструкции динамики движения эруптивного облака катастрофического извержения вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г. [15] было определено распределение пепла в эруптивной колонне, а также восстановлен сценарий процесса извержения. Впервые был прослежен перенос тонкой фракции пепла на протяжении трех суток от начала извержения, в частности, описана опасность эруптивного облака для авиации и показано его распространение над территорией России, Канады, США, Мексики, над Беринговым морем и Тихим океаном [15]. Полученные в работе результаты хорошо согласуются с геологическими данными о времени начала и окончания пеплопадов в населенных пунктах, о мощности слоев пеплов в разных точках наблюдений и др.

Вероятно, быстрое освобождение магматической камеры Шивелуча в процессе извержения привело к обрушению части ее кровли и, как следствие, к образованию поперечных ступеней высотой 100 м по южному краю кратера.

Предполагается, что известное многолетнее снижение интенсивности солнечной радиации в северных широтах с 1963 по 1966 гг., установленное по актинометрическим станциям СССР и мира, было связано с распространением аэрозольных облаков, образовавшихся не только после извержения вулкана Агунг в марте 1963 г., но и после извержения вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г. [15].

Список литературы

1. *Гирина О.А., Демянчук Ю.В., Мельников Д.В. и др.* Пароксизмальная фаза извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 27 февраля 2005 г. (предварительное сообщение) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 1. С. 16-23.
2. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А. и др.* Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / Отв. ред. О.А. Гирина. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. 192 с.
3. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
4. *Гирина О.А., Ушаков С.В., Демянчук Ю.В.* Пароксизмальное извержение вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 9 мая 2004 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. 10. С. 65-73.
5. *Горшков Г.С., Дубик Ю.М.* Направленный взрыв на вулкане Шивелуч. В кн.: Вулканы и извержения / Отв. ред. Г.С. Горшков. М.: Наука, 1969. С. 3-37.
6. *Мелекесцев И.В., Вольнец О.Н., Ермаков В.А. и др.* Вулкан Шивелуч / Действующие вулканы Камчатки. В 2-х т. / Отв. ред. С.А. Федотов, Ю.П. Масуренков. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 84-103.
7. *Меняйлов А.А.* Вулкан Шивелуч – его геологическое строение, состав и извержения / Труды лаборатории вулканологии АН СССР. Вып. 9 / Отв. ред. В.И. Влодавец. М.: АН СССР, 1955. 264 с.
8. *Овсянников А.А., Маневич А.Г.* Извержение вулкана Шивелуч в октябре 2010 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 2. Вып. 16. С. 7-9.
9. *Пийп Б.И., Мархинин Е.К.* Гигантское извержение вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. (предварительное сообщение) // Бюллетень вулканологических станций. 1965. № 39. С. 3-28.
10. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки / Отв. ред. И.А. Резанов. М.: Наука, 1981. 164 с.
11. *Токарев П.И.* Рой землетрясений вулкана Шивелуч в мае 1964 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1964. № 38. С. 41-44.
12. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Двигало В.Н. и др.* Эруптивный цикл вулкана Шивелуч в 2001-2004 гг. // Вулканология и сейсмология. 2004. № 6. С. 3-14.
13. *Vogoyavlenskaya G.E., Braitseva O.A., Melekestsev I.V. et al.* Catastrophic eruptions of the directed-blast type at Mount St. Helens, Bezymianny and Shiveluch volcanoes // Journal of geodynamics. 1985. V. 3. P. 189-218. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(85\)90035-3](https://doi.org/10.1016/0264-3707(85)90035-3)
14. *Girina O.A., Chubarova O.S., Senyukov S.L.* The recent activity of Sheveluch volcano // Abstracts of the 3rd Biennial workshop on subduction processes emphasizing the Kurile-Kamchatka-Aleutian Arcs (JKASP-3). June 9-15, 2002. Fairbanks. 2002. P. 121-122.
15. *Girina O.A., Malkovsky S.I., Sorokin A.A. et al.* Numerical modeling of the ash cloud movement from the catastrophic eruption of the Sheveluch volcano in November 1964 // Remote sensing. 2022. V. 14. № 14. Art. 3449. <https://doi.org/10.3390/rs14143449>
16. *Gorelchik V.I.; Shirokov V.A.; Firstov P.P.; Chubarova O.S.* Shiveluch volcano: seismicity, deep structure and forecasting eruptions (Kamchatka) // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 1997. V. 78. P. 121-137. [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(96\)00108-4](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(96)00108-4)
17. *Kirianov V.Y.* Assessment of Kamchatkan ash hazard to airlines // Volcanology and seismology. 1993. V. 14. P. 246-269.

Термальная активность вулканов Северной группы Камчатки в 2015-2022 гг.

Гирин О.А.¹, Маневич А.Г.¹, Лупян Е.А.², Уваров И.А.², Романова И.М.¹, Сорокин А.А.³, Королев С.П.³, Крамарева Л.С.⁴

Thermal activity of the Kamchatka Northern group volcanoes in 2015-2022

Girina O.A., Manevich A.G., Loupian E.A., Uvarov I.A., Romanova I.M., Sorokin A.A., Korolev S.P., Kramareva L.S.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: girina@kscnet.ru*

² *Институт космических исследований РАН, г. Москва*

³ *Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск*

⁴ *Дальневосточный центр НИЦ «Планета», г. Хабаровск*

Исходя из анализа Величины Разницы Температур термальной Аномалии и Фона (ВРТАФ) в информационной системе VolSatView определен «фон активности» вулканов Шивелуч, Ключевской и Безымянный для периода 2015-2022 гг. Совместный анализ динамики извержения каждого вулкана и изменения его термальной активности позволил установить диапазон ВРТАФ для разных фаз извержения вулкана.

Введение

Ежедневный мониторинг вулканов Камчатки с 1993 г. осуществляет Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT – Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>) Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН [3]. С 2002 г. KVERT выполняет спутниковый мониторинг вулканов Камчатки, с 2014 г. он проводится с помощью информационной системы (ИС) «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» (VolSatView), работа которой осуществляется благодаря ресурсам Дальневосточного центра «НИЦ Планета», Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (Институт космических исследований РАН) и ЦКП «Центр данных ДВО РАН» (Вычислительный центр ДВО РАН) [2-8]. Для мониторинга термальной активности вулканов в ИС VolSatView имеются оперативно обновляемые данные среднего разрешения спутниковых систем: NOAA-18/19 (прибор AVHRR – Advanced Very-High-Resolution Radiometer), Terra и Aqua (MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), Suomi NPP (National Polar-orbiting Partnership) и JPSS-1 (Joint Polar Satellite System) (VIIRS – Visible Infrared Imaging Radiometer Suite), Sentinel 3A/3B (SLSTR – Sea and Land Surface Temperature Radiometer), Метеор М-2 (MSU-MR– Multispectral scanner low-resolution) [2-7]. Сбор данных и их обработка выполняются в ИС KVERT [3, 5].

В работе [5] детально описана деятельность вулканов Северной группы Камчатки в течение 2015-2022 гг. и их термальная активность, оцененная по спутниковым данным. Основной характеристикой термальной активности вулканов является Величина Разницы Температур термальной Аномалии и Фона (ВРТАФ), полученная при обработке вручную спутниковых данных AVHRR, MODIS, VIIRS и MSU-MR в ИС VolSatView.

Фон активности вулканов Северной группы Камчатки

Эруптивная активность любого действующего вулкана Камчатки уникальна. Для каждого из них существуют периоды бурной деятельности и периоды относительного покоя. Величину разницы между максимальной температурой аномалии в районе вулкана и средней температурой фона вблизи аномалии в периоды его относительного покоя можно принять за «фон активности вулкана». Следует уточнить, что наше определение «фона активности вулкана» основано на ВРТАФ и отличается от приведенного в [9]. Рассмотрим изменения состояния вулканов Шивелуч, Безымянный и Ключевской в 2015-2022 гг.

Вулкан Шивелуч был относительно спокоен с 10 февраля по 1 ноября 2018 г., наблюдалась только его фумарольная активность. ВРТАФ изменялась от 1.9 до 22.4 °С; ее среднее значение составляло 10.1 °С; однако только 4 % ВРТАФ имели температуру более 20 °С [5]. Можно считать, что ВРТАФ 20 °С является фоном активности вулкана Шивелуч. Самая высокая температура термальной аномалии Шивелуча связана с эксплозивной деятельностью вулканского типа и интенсивным ростом лавового купола (выжиманием лавовых блоков и лавовых потоков), сопровождающимся обрушениями раскаленных лавин.

На Безымянном отмечалась преимущественно фумарольная активность с 4 января 2015 г. по 1 октября 2016 г. ВРТАФ варьировалась от 1.7 до 27.4 °С, ее среднее значение в диапазоне от 16 до 27.4 °С составляло 20 °С, при этом только 5 % ВРТАФ превышало 20 °С. Можно считать, что ВРТАФ 20 °С является фоном активности вулкана Безымянный. Наиболее высокая температура термальной аномалии вулкана связана с эксплозивной деятельностью вулканского типа и выжиманием лавовых потоков на склоны лавового купола, сопровождающимся обрушениями раскаленных лавин.

Ключевской вулкан находился в состоянии межэруптивной активности с 16 июня 2018 г. по 13 июня 2019 г. ВРТАФ в этот период менялась от 3 до 16.5 °С, среднее ее значение составляло 12 °С, при этом только 5 % ВРТАФ превышало 12 °С. Можно считать, что ВРТАФ 12 °С является фоном активности вулкана Ключевской. Наиболее высокая температура термальной аномалии вулкана связана с вершинными и боковыми эффузивными извержениями и эксплозивной деятельностью стромболианского типа.

Величина разности температур термальной аномалии и фона как отражение фаз активности вулканов Камчатки в 2015-2022 гг.

Экструзивно-эффузивное извержение вулкана Шивелуч продолжалось с 2015 по 2022 гг. с перерывом с 10 февраля по 1 ноября 2018 г. (почти 9 месяцев). ВРТАФ во время извержения преимущественно превышала 80 °С. Возобновлению экструзивного процесса предшествовали мощные эксплозии с выносом пепла до 12 км над уровнем моря (н.у.м.), при этом ВРТАФ достигала 119.1 °С. Кроме того, интенсивный рост купола сопровождался обрушениями раскаленных лавин, во время таких явлений ВРТАФ достигала 117 °С [5].

Известно, что для вулкана Безымянный характерны три фазы эруптивной активности: экструзивная, эксплозивная и эффузивная. В 2015-2022 гг. экструзивные извержения продолжались до 6 месяцев с постепенным увеличением ВРТАФ от уровня фона вулкана (20 °С) до 50 °С. При пароксизмальных эксплозивных извержениях длительностью до 6 ч ВРТАФ превышала 100 °С и достигала 117 °С. Излияние вязких потоков лавы на склоны купола продолжалось от 2 месяцев до 1.5 лет, ВРТАФ при этом изменялась от 30 до 80 °С [5]. Можно отметить постоянно высокую ВРТАФ с октября 2020 г. до конца 2022 г. (с тенденцией к постепенному увеличению): вероятно, лавовые потоки выжимались на склоны лавового купола практически непрерывно. На фоне выжимания лавовых потоков произошли эксплозивные извержения, которые удалили остывшую лаву из канала вулкана и открыли путь новым порциям ювенильного магматического вещества [5].

В 2015-2022 гг. произошло пять вершинных извержений вулкана Ключевской и два боковых прорыва, завершившихся 20 марта 2021 г. [5]. Вершинные извержения вулкана были представлены четырьмя эксплозивно-эффузивными извержениями и одним эксплозивным извержением. Все эксплозивно-эффузивные извержения вулкана начинались с эксплозий стромболианского типа. Эксплозии вулканского типа появлялись через 8-149 дней (в 2020-2021 и 2015 гг., соответственно) после начала извержений. Излияние лавовых потоков отмечалось через 4-170 дней (в 2020-2021 гг. и

2019-2020 гг., соответственно) после начала извержений. Во время эксплозивных извержений стромболианского типа ВРТАФ достигала 80-106 °С; при движении лавовых потоков по склонам вулканов во время вершинных извержений или боковых прорывов ВРТАФ возрастала до 132 °С [5]. Эксплозивные извержения вулканского типа поднимали пепел до 8 км н.у.м., ВРТАФ не превышала 45 °С [5]. Отметим, что подъем пепла до 10.5 км н.у.м. 14 мая 2018 г. связан с обвалом старой пироклаستيку бортов Апахончичского желоба, а не с извержением вулкана – температура термальной аномалии не повышалась во время этого события.

Взаимосвязь активности вулканов Северной группы Камчатки в 2015-2022 гг.

Закономерного влияния друг на друга извержений вулканов Северной группы Камчатки в 2015-2022 гг. не наблюдается. Однако можно отметить следующее:

1. Яркая реакция вулканов на эксплозивные события друг друга наблюдалась в июне 2017 г. [1]. На фоне умеренной эксплозивной деятельности вулкана Ключевской 12-20 июня с выносом пепла до 7-8 км н.у.м., сильные эксплозии вулкана Шивелуч 14 июня подняли пепел на 12 км н.у.м., затем сильные эксплозии вулкана Безымянный 16 июня также подняли пепел на 12 км н.у.м., затем эксплозии вулкана Шивелуч 18 июня подняли пепел на 10 км н.у.м. [1, 5]. Подобные события наблюдались и в декабре 2017 г.: эксплозии вулкана Безымянный 20 декабря подняли пепел до 15 км н.у.м., Ключевской вулкан 21 декабря выбросил пепел на 7 км н.у.м., а эксплозии вулкана Шивелуч 26 декабря подняли пепел до 8 км н.у.м. [5].

2. Пароксизмальные эксплозивные извержения вулкана Безымянный чаще происходили на фоне высокой активности вулкана Шивелуч (например, в 2016 и 2019-2020 гг.), но иногда они происходили на фоне снижения его активности (например, 15 и 28 мая 2022 г.) [5]. Эксплозивные события на Безымянном и Шивелуче с выносом пепла до 4 и 7.5 км н.у.м. иногда происходили близко по времени друг к другу: например, 15 и 16 декабря 2016 г., соответственно [5].

3. Эксплозивное извержение вулкана Безымянный иногда начиналось после окончания эксплозивно-эффузивного извержения вулкана Ключевской (например, 15 декабря и 6 ноября 2016 г., соответственно) [5]. Более того, иногда эксплозивное извержение Безымянного (21 октября 2020 г.) происходило на фоне эксплозивно-эффузивного извержения Ключевского (с 30 сентября 2020 г. по 8 февраля 2021 г.) [5]. Зарегистрированы случаи одновременного повышения ВРТАФ для вулканов Безымянный и Ключевской, например: 1 января 2016 г. ВРТАФ составила 27.4 и 40.6 °С, соответственно; 3 января 2018 г. ВРТАФ была 39.2 и 41.4 °С, соответственно; 20 ноября 2022 г. она поднималась до 77.2 и 87.8 °С, соответственно [5].

4. Анализ данных о термальной активности вулканов показал, что во время извержений вулкана Ключевской ВРТАФ вулкана Шивелуч несколько снижалась. У Шивелуча была самая высокая ВРТАФ, когда вулкан Ключевской был спокоен [5].

5. В 2017-2019 гг. вулканы Северной группы Камчатки находились в состоянии относительного покоя: вулкан Шивелуч – с 10 февраля 2018 г. по 1 ноября 2018 г.; вулкан Ключевской с 16 июня 2018 г. по 13 июня 2019 г.; вулкан Безымянный с 20 декабря 2017 г. по 20 января 2019 г. Таким образом, все действующие вулканы Северной группы Камчатки с 16 июня по 1 ноября 2018 г. были спокойны [5].

Заключение

По данным ВРТАФ определен «фон активности вулканов» Северной группы Камчатки для периода 2015-2022 гг.: 20 °С для Шивелуча и Безымянного и 12 °С для Ключевского. Исследования показывают, что наибольшая температура термальной аномалии соответствует поступлению на дневную поверхность ювенильного

магматического вещества: ВРТАФ андезибазальтового вулкана Ключевской достигает 132 °С, андезитового и дацитового вулканов Безымянный и Шивелуч – 119 °С [5].

Совместный анализ динамики извержения каждого вулкана и изменения его термальной активности позволил определить диапазон ВРТАФ для разных фаз извержения вулкана. Например, ВРТАФ вулкана Безымянный для фаз извержения достигает: 50 °С для экструзивной, 117 °С для эксплозивной и 80 °С для эффузивной [5].

Все действующие вулканы Северной группы Камчатки были спокойны в период с 16 июня по 1 ноября 2018 г. [5].

Судя по низким температурам термальной аномалии, наблюдавшейся над вершиной вулкана Ключевской в 2017-2018 гг., вероятно отсутствие ювенильного материала в выбросах пепла в это время. Эксплозивная активность вулкана в 2017-2018 гг. была связана с неравномерным опусканием магмы по каналу вглубь постройки вулкана [5].

Обработка вручную различных современных спутниковых данных (NOAA, Terra, Aqua, Suomi NPP, JPSS-1, Meteor M-2) позволила показать активность камчатских вулканов более детально, чем это делалось ранее с применением автоматизированной обработки таких данных на основе алгоритмов MOD14 и MODVOLC [5].

Список литературы

1. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В. и др.* Извержения Северной группы вулканов Камчатки 14-18 июня 2017 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 317-323. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-3-317-323>
2. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Мельников Д.В. и др.* Создание и развитие информационной системы «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 249-265. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-249-265>
3. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А. и др.* Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / Отв. ред. О.А. Гирина. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. 192 с.
4. *Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>
5. *Girina O.A., Manevich A.G., Loupian E.A. et al.* Monitoring the thermal activity of Kamchatkan volcanoes during 2015-2022 using remote sensing // Remote Sensing. 2023. V. 15. № 19. Art. 4775. <https://doi.org/10.3390/rs15194775>
6. *Gordeev E.I., Girina O.A., Lupyan E.A. et al.* The VolSatView information system for monitoring the volcanic activity in Kamchatka and on the Kuril Islands // Journal of Volcanology and Seismology. 2016. V. 10. № 6. P. 382-394. <https://doi.org/10.1134/S074204631606004X>
7. *Lupyan E.A., Milekhin O.E., Antonov V.N. et al.* System of operation of joint information resources based on satellite data in the Planeta Research Centers for Space Hydrometeorology // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. V. 39. P. 847-853. <https://doi.org/10.3103/S1068373914120103>
8. *Sorokin A.A., Makogonov S.I., Korolev S.P.* The information infrastructure for collective scientific work in the Far East of Russia // Scientific and Technical Information Processing. 2017. V. 4. P. 302-304. <https://doi.org/10.3103/S0147688217040153>
9. *Worden A., Dehn J., Webley P.* Frequency based satellite monitoring of small scale explosive activity at remote North Pacific volcanoes // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2014. V. 286. P. 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2014.08.019>

Активность вулканов Камчатки и Курил в 2023 г. и их опасность для авиации
*Гирина О.А.¹, Маневич А.Г.¹, Мельников Д.В.¹, Нуждаев А.А.¹, Романова И.М.¹,
Дупян Е.А.², Сорокин А.А.³, Крамарева Л.С.⁴, Королев С.П.³, Демянчук Ю.В.¹*

The 2023 activity of Kamchatka and Kurile volcanoes and their danger to aviation
*Girina O.A., Manevich A.G., Melnikov D.V., Nuzhdaev A.A., Romanova I.M.,
Loupian E.A., Sorokin A.A., Kramareva L.S., Korolev S.P., Demyanchuk Yu.V.*

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: girina@kscnet.ru*

² *Институт космических исследований РАН, г. Москва*

³ *Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск*

⁴ *Дальневосточный центр НИЦ «Планета», г. Хабаровск*

В работе описана активность вулканов Камчатки и Курил в 2023 г. Эксплозивные извержения вулканов Шивелуч, Ключевской и Безымянный представляли опасность для международных и местных авиаперевозок, Эбеко и Чикурачки – для местных авиаперевозок.

Введение

На Камчатке и Курильских островах расположено 68 действующих вулканов, ежегодно здесь происходит до восьми эксплозивных извержений.

Ежедневный видео-визуальный и спутниковый мониторинг вулканов Камчатки и Курильских островов с 1993 г. осуществляет Камчатская группа реагирования на вулканические извержения (KVERT – Kamchatkan Volcanic Eruption Response Team, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>). С 2010 г. KVERT, как часть Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, выполняет функции Вулканологической обсерватории Российской Федерации (№ 290111-300001 в каталоге WOVO – the World Organization of Volcano Observatories) по обеспечению международного аэронавигационного сообщества информацией об активности вулканов на Дальнем Востоке [1]. KVERT проводит спутниковый мониторинг вулканов с 2002 г., с помощью информационной системы (ИС) «Дистанционный мониторинг активности вулканов Камчатки и Курил (VolSatView)» он выполняется с 2014 г. Работа VolSatView осуществляется благодаря ресурсам Дальневосточного НИЦ «Планета», Центра коллективного пользования (ЦКП) «ИКИ-Мониторинг» (при поддержке Минобрнауки РФ, Институт космических исследований РАН, тема «Мониторинг») и ЦКП «Центр данных ДВО РАН» (Вычислительный центр ДВО РАН) [1, 3, 5, 6]. В ИС VolSatView для мониторинга вулканов имеются оперативно обновляемые данные спутниковых систем: NOAA-18/19, Terra и Aqua, Suomi NPP и JPSS-1/2, Метеор-М № 2, Himawari-8/9 [1, 3, 5]. Сбор данных и их обработка выполняются в ИС KVERT [1].

В 2023 г. извергались три вулкана Камчатки (Шивелуч, Ключевской и Безымянный) и два вулкана Северных Курил (Эбеко и Чикурачки).

Активность вулканов Камчатки и Курильских островов в 2023 г.

Шивелуч. Экструзивно-эксплозивное извержение вулкана началось в августе 1980 г. и продолжается до настоящего времени. С 1 января по 7 апреля 2023 г. в темное время суток отмечалось яркое свечение лавового купола, связанное с продолжением поступления на дневную поверхность магматического вещества, Величина Разницы Температур термальной Аномалии и Фона (ВРТАФ) [4] постоянно была выше 100 °С и достигала 115 °С (рис. 1). Также 5, 7 и 19 января наблюдались эксплозии с выносом пепла до 7,5, 7 и 10 км над уровнем моря (н.у.м.), соответственно, и обрушения раскаленных лавин с подъемом пепла до 4-5 км н.у.м. Пепловые облака перемещались до 100 км в различных направлениях от вулкана. С 25 марта по 7 апреля интенсивность обрушений раскаленных лавин повысилась, ВРТАФ достигала 107 °С (рис. 1).

Согласно данным со спутника Himawari-9 из ИС VolSatView, пароксизмальное эксплозивное извержение вулкана началось в 13:10 UTC 10 апреля и продолжалось

почти непрерывно в течение 10-13 апреля [2]. Наряду с образованием расширяющегося эруптивного облака, высота которого была ограничена тропопаузой (~10 км н.у.м.), время от времени мощные эксплозии поднимали пеплы в стратосферу – до 15-18 км н.у.м. Эксплозивные события 10-11 апреля сопровождалось выносом большого количества диоксида серы, связанного с эксплозивным разрушением купола [2]. В связи с высокой циклонической активностью в районе Камчатки, эруптивное облако Шивелуча было растянуто с запада на восток в полосу длиной более 3500 км. Аэрозольное облако наблюдалось вблизи п-ова Скандинавский 21-22 апреля. Общая площадь территории Камчатки и Тихого океана, над которой отмечались пепловые и аэрозольные облака в течение 10-14 апреля, составляла около 3280 тыс. км² [2]. Это извержение относится к субплинианскому типу, т.к. имеет высокие параметры подъема эруптивных облаков и продолжительности события. Для него VEI (Volcanic Explosivity Index) составляет 3-4 [2]. Рост купола начался сразу же после окончания эксплозивной фазы извержения и продолжался до конца года. По данным Ю.В. Демянчука, 3 апреля высота купола была 650 м, 15 апреля кромка кратера, в который превратился купол, не превышала 300 м. К 9 мая купол заполнил часть кратера и вырос до 350 м. По данным О.А. Гириной (снимок Sentinel-2В из VolSatView), 23 июля диаметр кратера составлял 2 км, диаметр лавового купола – 900 м. Следует отметить, что кроме эруптивных, наблюдались шлейфы ресуспендированных пеплов (18-19 апреля, 8-9, 14-15 и 27 мая, 13 июня, 4-5 июля, 30-31 августа, 3-4 и 9 сентября, 11 октября, 7-10 и 17 ноября и 3-6 декабря), которые протягивались до 650 км на восток и юго-восток от вулкана. Во время извержения 10-13 апреля активность вулкана была опасной для международных и местных авиаперевозок, в другое время – для местных авиаперевозок.

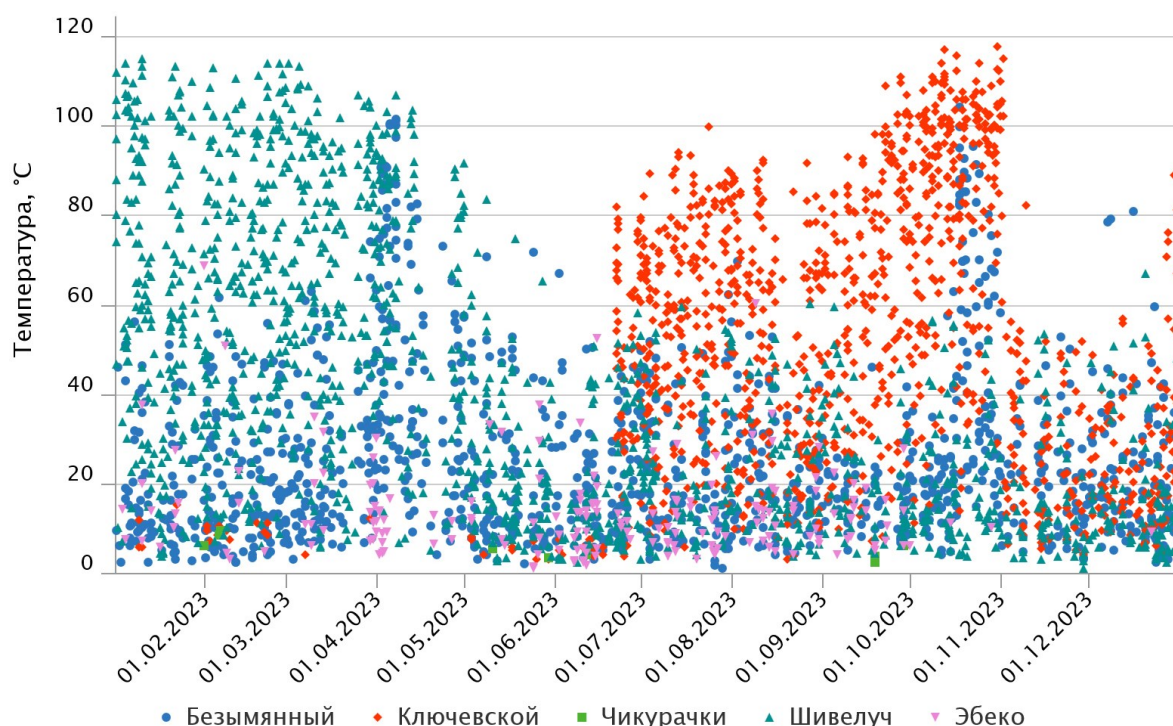


Рис. 1. Разница температур термальных аномалий и фона в районах активных вулканов Камчатки и Курильских островов в 2023 г. по спутниковым данным из ИС VolSatView.

Ключевской. Предыдущее его вершинное эксплозивное извержение происходило с 16 по 26 ноября 2022 г. [4]. С 1 января по 21 июня ВРТАФ не превышала 15 °С. Эксплозивное извержение стромболианского типа началось 22 июня – ВРТАФ резко повысилась с 6 до 82 °С (рис. 1). С 11 июля ВРТАФ почти постоянно была выше 85 °С. Лавовые потоки (эффузивная фаза извержения) изливались: по Апахончичскому желобу с 19 июля по 12 августа и с 22 сентября по 2 ноября, по Козыревскому желобу с

12 августа по 28 сентября и с 17 октября по 2 ноября. С 22 сентября ВРТАФ превышала 100 °С и достигала 117.6 °С 30 октября (рис. 1). Излияния лавы сопровождалась мощными фреатическими взрывами в желобах. С 11 октября наблюдалась активность вулканского типа с выносом пепла до 6 км н.у.м., 23-30 октября – до 7-8 км н.у.м., 30 октября – до 9 км н.у.м., шлейфы перемещались до 450 км в восточных направлениях от вулкана. Кульминация извержения произошла в период с 31 октября по 2 ноября: эксплозии поднимали пепел до 11-12 км н.у.м., пепловые и аэрозольные шлейфы протягивались на 3200 км на восток от вулкана. Мощный фреатический взрыв рядом с Крестовским желобом с выносом пепла до 14 км н.у.м. наблюдался в 23:20 UTC 31 октября. Фонтаны лавы поднимались до 1 км над кратером вулкана 1-2 ноября, раскаленные лавины обрушивались на его западный склон. ВРТАФ понизилась до 52.9 °С 2 ноября. Высота эруптивной колонны 4 ноября снизилась до 6 км н.у.м., 5 ноября извержение закончилось, но ВРТАФ оставалась на уровне 50 °С до конца декабря.

Новое извержение продолжалось с 27 декабря 2023 г. по 2 января 2024 г. С 27 по 30 декабря (стромболианская активность) ВРТАФ повысилась до 88.8 °С (рис. 1). 29-31 декабря и 1 января эксплозии поднимали пепел до 7 км н.у.м. (вулканская активность), пепловый шлейф протягивался до 230 км на северо-запад от вулкана. Отметим, что шлейфы ресуспендированных пеплов перемещались до 550 км на восток и юго-восток от вулкана 18-19 апреля, 3-5, 9-11 и 22 сентября, 9-10, 12-13, 16-17 и 24 ноября. Активность вулкана была опасной для международных и местных авиаперевозок.

Безыманный. Предыдущее извержение вулкана наблюдалось 23-24 октября 2022 г. [4]. В 2023 г. произошло два эксплозивных извержения: 7 апреля и 18 октября.

Активность вулкана начала расти с 29 марта: в этот день единичная эксплозия подняла пепел до 6 км н.у.м. Со 2 апреля количество лавин на юго-восточных склонах купола стало расти, с 5 апреля экструзивное извержение усилилось: раскаленные лавины обрушивались почти непрерывно, пепловый шлейф протягивался до 550 км на восток-юго-восток от вулкана. Пароксизмальная фаза эксплозивного извержения произошла в 05:38 UTC 7 апреля – согласно видео и спутниковым данным, эруптивное облако поднялось до 10-12 км н.у.м. (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2023-49>), ВРТАФ достигала 101.4 °С (рис. 1). По спутниковым данным KVERT, пепловый шлейф 7-8 апреля протягивался на расстояние более 2700 км на восток-юго-восток от вулкана. Для этого извержения VEI составляет 2. Сразу после эксплозий 7 апреля наблюдались выжимания лавовых потоков на восточные склоны купола. Термальность активности вулкана оставалась выше уровня фона вплоть до 1 октября (рис. 1).

Яркое свечение лавового купола было отмечено 10 октября. С 19:00 UTC 16 октября активность вулкана начала расти: усилился экструзивный процесс и, как следствие, количество раскаленных лавин постепенно росло; пепловый шлейф поднимался до 4-5 км н.у.м. и перемещался на северо-восток от вулкана. 17 октября в 02:19 UTC на сайте ИВиС ДВО РАН (KVERT) был опубликован прогноз о том, что пароксизмальное извержение вулкана с выносом пепла до 10-15 км н.у.м. произойдет в течение 1-3 дней (<http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/van/?n=2023-114>). Согласно спутниковым данным, в 04:30 UTC 18 октября эруптивное облако вулкана поднялось до 11 км н.у.м. То есть реализация прогноза извержения произошла через 26 ч 11 мин с момента его публикации. Эруптивное облако 18-19 октября перемещалось на 850 км на северо-запад от вулкана. Для этого извержения VEI равен 2. Общая площадь пеплопадов, связанных с движением эруптивных облаков вулкана в 2023 г., составляла более 338 тыс. км² в апреле и 132 тыс. км² в октябре. Активность вулкана во время пароксизмов была опасной для международных и местных авиаперевозок.

Эбеко, о. Парамушир. Эксплозивное извержение, начавшееся 11 июня 2022 г., продолжается. По сообщениям из г. Северо-Курильск и спутниковым данным KVERT,

в 2023 г. произошло 396 эксплозивных событий, наиболее сильное из них, с выносом пепла до 5 км н.у.м., отмечалось 23 декабря (рис. 2). 10 января, 4 февраля, 11 и 18 июля пепловые облака поднимались до 4.5 км н.у.м., наибольшее количество эксплозий поднимало пепел до 2-2.5 км н.у.м. Перерывы между эксплозиями в течение года достигали 10-18 дней (рис. 2). Пепловые облака перемещались на расстояния до 110 км в основном в восточных направлениях от вулкана. В районе Эбеко почти весь год регистрировалась термальная аномалия, ВРТАФ достигала 68.8 °С (рис. 1). Активность вулкана была опасной для местных авиаперевозок.

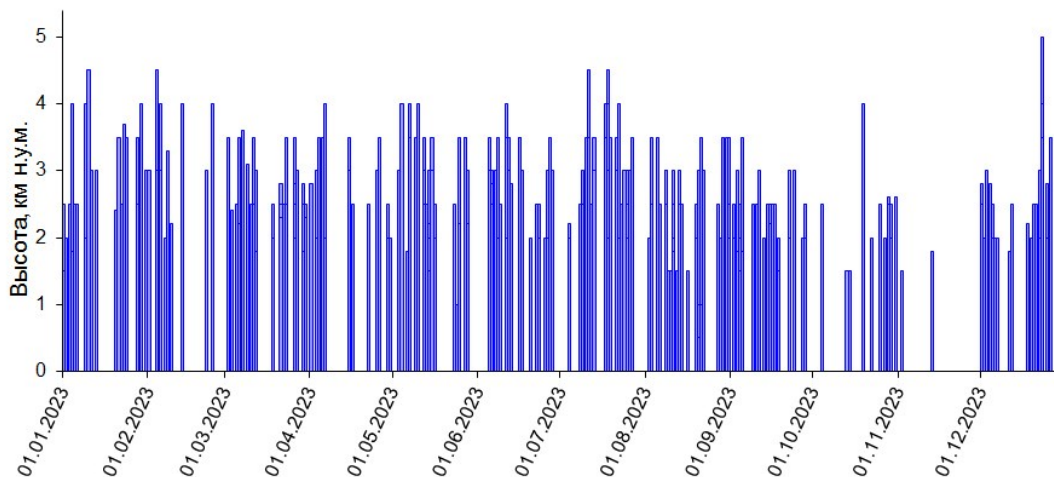


Рис. 2. Эксплозивная активность вулкана Эбеко в 2023 г.

Чикурачки, о. Парамушир. Предыдущие эксплозивные события вулкана наблюдались 15-16 октября 2022 г. По данным KVERT, с 28 января по 8 февраля 2023 г. эксплозии поднимали пепел до 5 км н.у.м., пепловые шлейфы перемещались до 125 км в различных направлениях от вулкана. Слабая термальная аномалия время от времени наблюдалась в районе вулкана с 10 мая по 28 сентября, ВРТАФ достигала 9.6 °С (рис. 1). Активность вулкана была опасной для местных авиаперевозок.

Список литературы

1. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Сорокин А.А. и др.* Комплексный мониторинг эксплозивных извержений вулканов Камчатки / Отв. ред. О.А. Гирина. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2018. 192 с.
2. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
3. *Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А. и др.* Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170>
4. *Girina O.A., Manevich A.G., Loupian E.A. et al.* Monitoring the thermal activity of Kamchatkan volcanoes during 2015–2022 using remote sensing // Remote Sensing. 2023. V. 15. № 19. Art. 4775. <https://doi.org/10.3390/rs15194775>
5. *Lupyay E.A., Milekhin O.E., Antonov V.N. et al.* System of operation of joint information resources based on satellite data in the Planeta Research Centers for Space Hydrometeorology // Russian Meteorology and Hydrology. 2014. V. 39. P. 847-853. <https://doi.org/10.3103/S1068373914120103>
6. *Sorokin A.A., Makogonov S.I., Korolev S.P.* The information infrastructure for collective scientific work in the Far East of Russia // Scientific and Technical Information Processing. 2017. V. 4. P. 302-304. <https://doi.org/10.3103/S0147688217040153>

Состав ювенильных андезитов и ассоциирующих с ними мафических включений, изверженных вулканом Шивелуч в апреле 2023 г.

Горбач Н.В., Философова Т.М.

Composition of the juvenile andesites and associated mafic enclaves erupted from Shiveluch volcano in April 2023

Gorbach N.V., Filosofova T.M.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: n_gorbach@mail.ru

В работе представлены первые данные по составу ювенильных продуктов, изверженных вулканом Шивелуч в апреле 2023 г. Выполнено сравнение химического и минерального составов ювенильных андезитов и мафических включений, ассоциирующих с ними, с аналогичными данными для продуктов предшествующих крупных извержений.

Извержение вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. – одно из наиболее масштабных эруптивных событий в числе извержений вулканов Камчатки с начала текущего столетия. Объем изверженных продуктов и механизм данного извержения еще требуют всестороннего анализа и точных оценок, однако предварительные данные [1] указывают на то, что это событие стало сильнейшим после катастрофического извержения вулкана в ноябре 1964 г. В ходе извержения произошло значительное разрушение экструзивного купола, и его обломки и блоки составляют значительную часть пирокластических отложений, перекрывших долину реки Кабеку и ее притоки (рис. 1а). Для понимания динамики магматических процессов в питающей системе вулкана и оценки физико-химических условий кристаллизации андезитовых магм перед извержением крайне важно уверенно выделить ювенильную составляющую среди обилия обломочного материала в пирокластических отложениях. В сообщении описаны критерии отбора такого материала и приведены первые данные о составе ювенильных андезитов, изверженных в апреле 2023 г. На основе анализа состава минералов и вулканического стекла получены предварительные данные об условиях кристаллизации андезитовых магм перед извержением.

Отбор образцов. Образцы обломков и крупных блоков из отложений пирокластических потоков были отобраны в июне 2023 г. Для анализа были выбраны образцы, имеющие уверенные признаки ювенильного происхождения. К этим признакам были отнесены поверхность типа «хлебной корки» или же «цветной капусты», а также следы пластических деформаций на поверхности обломков. Кроме того, были проанализированы образцы крупных блоков, образованных в результате разрушения ранее существовавшего экструзивного купола и мафические (меланократовые) включения из таких блоков и фрагментов ювенильного материала. Содержания главных элементов и некоторых редких элементов в андезитах и мафических включениях были определены рентгенофлюоресцентным методом в Институте геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск по методике [4]. Состав минералов и вулканических стекол был получен при помощи сканирующего электронного микроскопа Vega 3 Tescan, оборудованного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max 80mm² в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН.

Петрография и химический состав ювенильных андезитов в сравнении с продуктами предыдущих извержений. Среди собранной коллекции образцов к ювенильному материалу мы отнесли три основных типа обломков в отложениях пирокластических потоков – серые плотные андезиты с поверхностью «хлебной корки», пемзовидные белые андезиты с поверхностью типа «цветной капусты» и блоки андезитов с брекчированной текстурой, вмещающие обломки со следами пластических деформаций (рис. 1б-д).

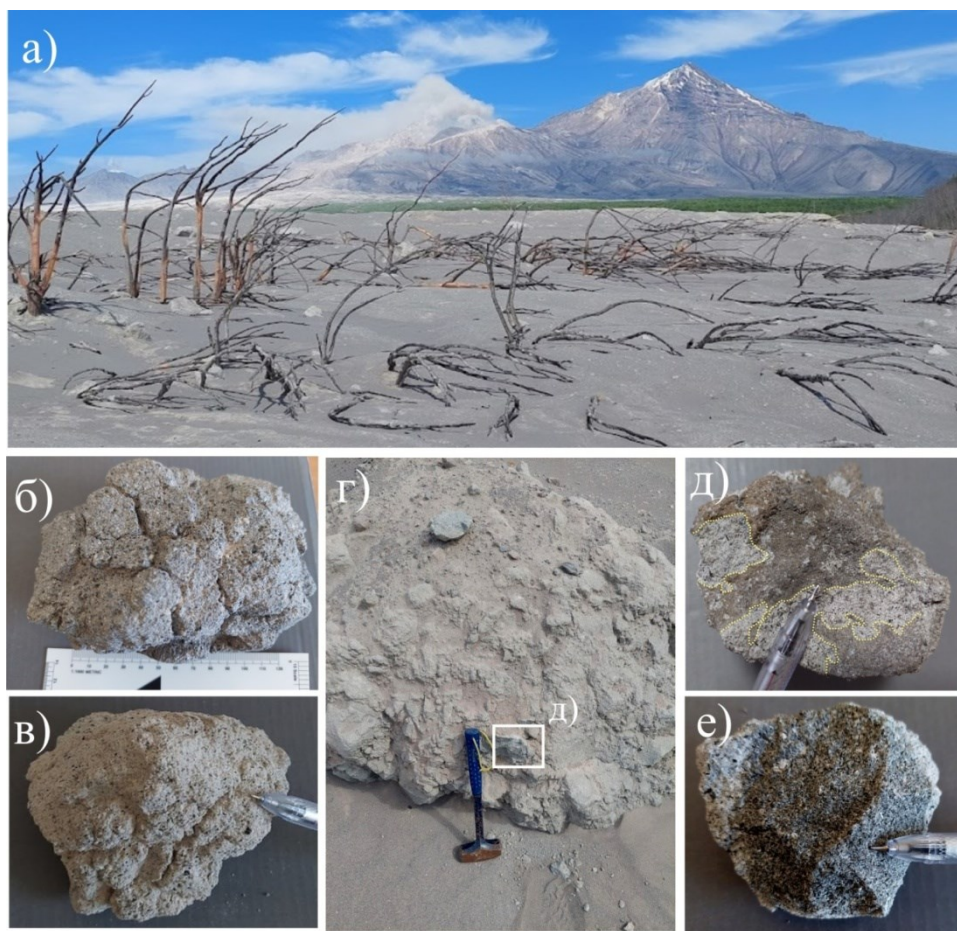


Рис. 1. Пирокластические отложения, изверженные в апреле 2023 г., и их ювенильная составляющая: а) – вид на пирокластические отложения на месте существовавшей ранее долины реки Кабеку, июнь 2023 г.; б) – серый плотный андезит с поверхностью типа «хлебная корка»; в) – белый пемзовидный андезит с поверхностью облика «цветной капусты»; г) – блок брекчированной породы; д) – фрагмент из блока брекчированной породы, желтым пунктиром выделены участки с различным цветом, текстурой и количеством вкрапленников; е) – мафическое включение в андезите.

Петрографические особенности первых двух типов типичны для андезитов, изверженных вулканом с начала 2000-х годов [3, 6, 8]. Породы содержат около 25-30 % вкрапленников плагиоклаза (*Pl*, преимущественно андезин An_{37-56}) и около 12-15 % вкрапленников амфибола (*Amph*, магнезиальная роговая обманка, реже паргасит, $Al_2O_3 = 7-11.5$ масс. %), а их основная масса состоит из риолитового стекла и микролитов плагиоклаза, ортопироксена и небольшого количества выделений титаномагнетита. Брекчированные породы отличаются от вышеописанных и состоят из «спекшихся» фрагментов андезитов с различным цветом основной массы, с варьирующей степенью пористости и разным количеством минералов-вкрапленников. Границы между фрагментами разной текстуры неровные, волнообразные, что указывает на брекчирование и спекание не полностью остывшей магмы. Образцы этих пород обнаруживают гетерогенную брекчированную текстуру и на микроскопическом уровне: фрагменты *Amph-Pl* андезита со стекловатой основной массой соседствуют с участками породы, которая состоит из обломков минералов и очень пористого матрикса, лишённого вулканического стекла и сложенного кварц-полевошпатовым агрегатом. Подобные брекчированные породы не были описаны ранее среди продуктов извержений, связанных с ростом современного экструзивного купола. Формирование таких пород, наиболее вероятно, могло произойти в канале вулкана непосредственно во время извержения.

По результатам химического анализа шести образцов, ювенильный материал в пирокластических отложениях, изверженных в апреле 2023 г., представлен умеренно-К известково-щелочными андезитами ($\text{SiO}_2 = 59.5-62.7$ масс. %; $\text{K}_2\text{O} = 1.20-1.33$ масс. %; $\text{FeO}^*/\text{MgO} = 1.16-1.30$). Содержания MgO и величина магнезиальности ($\text{Mg\#} = \text{Mg}/(\text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$) ювенильных андезитов составляют 3.77-4.64 масс. % и 0.58-0.62 мол. %, соответственно. Такие повышенные значения этих величин отличают породы вулкана Шивелуч от продуктов других андезитовых вулканов Камчатки и являются типичными не только для продуктов современных извержений вулкана, но и для его активности за последние 11.5 тыс. лет [2, 9].

На диаграмме $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (рис. 2а) видно, что валовый состав ювенильных андезитов, наряду с составом интерстициальных стекол в них, находится в пределах вариаций, типичных для продуктов современных извержений вулкана. Вместе с тем, график вариаций содержаний SiO_2 в продуктах отдельных извержений (рис. 2б) обнаруживает слабую тенденцию к снижению концентрации данного компонента в андезитах, изверженных в апреле 2023 г., по сравнению с продуктами предыдущих крупных извержений с 2004 по 2019 гг.

Температура кристаллизации *Amph-Pl* минеральной ассоциации ювенильных андезитов, рассчитанная при помощи термобарометрических уравнений [7, 10] составила 883 ± 26 °С.

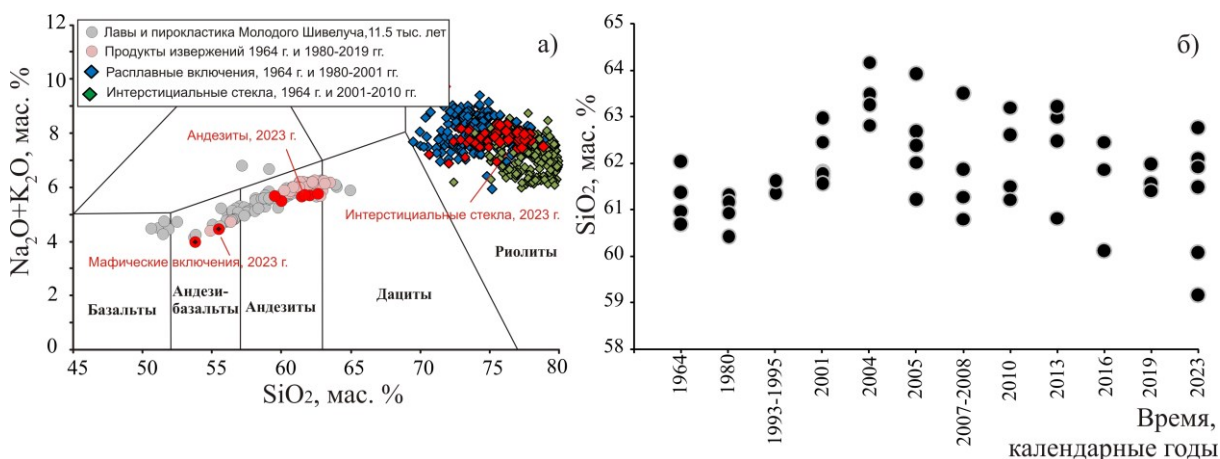


Рис. 2. Состав продуктов, изверженных вулканом Шивелуч в апреле 2023 г., по сравнению с продуктами предшествующих извержений: а) – в координатах $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (составы пород Молодого Шивелуча из работ [2, 9], составы андезитов извержений 1964 г. и 1980-2016 гг. по [3, 6], составы интерстициальных стекол и расплавных включений в андезитах современных извержений согласно [8, 9]); б) – вариации SiO_2 в породах в зависимости от времени извержения (данные до 2016 г. из работ [3, 6], 2019 и 2023 гг. по данным настоящего сообщения).

Мафические включения в андезитах. В обломках ювенильного материала были обнаружены включения округлой формы темно-серого цвета размером от 5 до 20 см (см. рис. 1е). К макроскопическим особенностям, отличающим эти включения от других включений и ксенолитов, обильных в породах вулкана Шивелуч, относятся: 1) порфировая структура с заметным количеством (до 7-8 об. %) фенокристаллов оливина (*Ol*); 2) наличие крупных (до 5-7 мм) изометричных пор; 3) волнообразный контакт с вмещающим андезитом. Включения отвечают по составу высоко-Mg ($\text{Mg\#} = 0.69-0.70$ мол. %) андезибазальтам с содержанием $\text{SiO}_2 = 53.75-55.44$ масс. % и $\text{MgO} = 8.63-9.95$ масс. %. В числе фенокристаллов – высоко-Mg *Ol* (Fo ядер $90-92$, Fo кайм $81-84$), клинопироксен (*Cpx*, $\text{Mg\#} = 0.78-0.82$ мол. %) и *Amph* ($\text{Al}_2\text{O}_3 = 11-13$ масс. %, паргасит и магнезио-гастингсит), которые погружены в стекловатый матрикс с обильными удлинёнными микролитами плагиоклаза (лабрадор, An_{57-69}).

Подобные включения, обогащенные оливином (до $\text{Fo}_{92.6}$), впервые были обнаружены в отложениях пирокластического потока 2005 г. [2], а их петрологические

особенности детально охарактеризованы в работах [5, 6]. В перечисленных работах происхождение мафических включений было связано с поступлением примитивной водонасыщенной магмы в малоглубинную (~5-6 км) магматическую камеру вулкана. В работе [5] показано, что примитивная магма имела температуру 1062 ± 48 °C и отличалась чрезвычайно высоким содержанием воды (от 8.9 до 10.8 масс. %).

Сходство текстурных особенностей и состава минералов мафических включений, вынесенных на поверхность в 2023 г., с более ранними включениями позволяет предполагать, что все они образованы за счет фрагментации единой порции мафической магмы. В таком случае поступление андезибазальтовой магмы в малоглубинную магматическую камеру могло произойти незадолго до извержения 2005 г. Если это допущение верно, то возникает вопрос о том, какой же процесс является триггерным для каждого последующего крупного эксплозивного извержения. Альтернативно можно предположить, что каждое крупное эруптивное событие предварялось инъекцией основной магмы в малоглубинную магматическую камеру. Возможен ли такой сценарий? Для ответа на этот и другие вопросы и лучшего понимания роли мафического компонента в современном эруптивном цикле вулкана Шивелуч необходимо совместное использование петрологических и сейсмических, в том числе и ретроспективных, данных.

Работа выполнена в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН FWME-2024-0012.

Список литературы

1. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
2. *Горбач Н.В., Портнягин М.В.* Геологическое строение и петрология лавового комплекса вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка // Петрология. 2011. Т. 19. № 2. С. 140-172.
3. *Горбач Н.В., Портнягин М.В., Филоsofova Т.М.* Динамика роста экструзивного купола и вариации химического и минералогического составов андезитов вулкана Молодой Шивелуч в 2001-2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 37-61.
4. *Amosova A.A., Panteeva S.V., Chubarov V.M., Finkelshtein A.L.* Determination of major elements by wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry and trace elements by inductively coupled plasma mass spectrometry in igneous rocks from the same fused sample (110mg) // Spectrochim Acta. Part B. 2016. V. 122. P. 62-68.
5. *Goltz A.E., Krawczynsky M.J., Gavrilenko M.G. et al.* Evidence For Superhydrous Primitive Arc Magmas From Mafic Enclaves At Shiveluch Volcano, Kamchatka // Contribution To Mineralogy And Petrology. 2020. V. 175. Art. 115. <https://doi.org/10.1007/S00410-020-01746-5>
6. *Gorbach N.V., Filosofova T.M., Portnyagin M.V.* Amphibole Record Of 1964 Plinian And Following Dome-Forming Eruptions Of Shiveluch Volcano, Kamchatka // Journal Of Volcanology and Geothermal Research. 2020. V. 407. Art. 107108. <https://doi.org/10.1016/J.Jvolgeores.2020.107108>
7. *Holland T., Blundy J.D.* Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry // Contributions to Mineralogy and Petrology. 1994. V. 116. P. 433-447.
8. *Humphreys M.C.S., Blundy J.D., Sparks R.S.J.* Shallow-level decompression crystallisation and deep magma supply at Shiveluch Volcano // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2008. V. 155. P. 45-61.
9. *Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al.* Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: Chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass. International Journal of Earth Sciences. 2015. V. 104. P. 1459-1482. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1156-4>
10. *Ridolfi F.* Amp-TB2: An Updated Model for Calcic Amphibole Thermobarometry // Minerals. 2021. V. 11. Art. 324. <https://doi.org/10.3390/min11030324>

Первые данные об эксплозивной активности вулкана Кроноцкий (Восточная Камчатка) в голоцене

Горбач Н.В.¹, Филоsofova Т.М.¹, Rogozin А.Н.¹, Овсянников Г.Н.^{1,2}, Портнягин М.В.³, Щербakov В.Д.²

First data on the Holocene explosive activity of Kronotsky volcano (Eastern Kamchatka)
Gorbach N.V., Filosofova T.M., Rogozin A.N., Ovsyannikov G.N., Portnyagin M.V., Shcherbakov V.D.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: n_gorbach@mail.ru*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

³ *GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel, Germany*

В разрезах почвенно-пирокластических отложений впервые обнаружены горизонты шлаков, связанные с эксплозивными извержениями вулкана Кроноцкий, что подтверждает его статус действующего вулкана. Возраст извержений – ~5200-5400 л.н. и ~6000 л.н. – определен на основе стратиграфических соотношений горизонтов шлаков с ранее датированными маркирующими горизонтами тефры.

Вулкан Кроноцкий, расположенный во фронтальной части Восточного вулканического пояса, является одним из крупнейших стратовулканов Камчатки [2]. Вулкан считается действующим на основании свидетельств о слабой паро-газовой активности с вероятной примесью пепла в 1922-1923 гг. [4]. Однако никаких других следов его недавней активности ранее не было обнаружено. Отсутствие подобных сведений для вулкана может быть обусловлено не только слабой изученностью [2], но и быть следствием того, что его эксплозивные извержения были крайне редкими в голоцене. Так, И.В. Мелекесцев считал, что Кроноцкий находится в стадии затухания активности и разрушения постройки [5].

Летом 2023 г. во время полевых работ на северных склонах вулкана нами было обнаружено, задокументировано и опробовано четыре почвенно-пирокластических разреза, которые потенциально вмещали тефру Кроноцкого вулкана [3]. Для того чтобы подтвердить принадлежность тефры к продуктам извержения Кроноцкого вулкана, мы определили состав вулканического стекла в образцах из горизонтов шлаков, сопоставили результаты с аналогичными данными для образцов пирокластики, отобранных на склонах постройки стратовулкана, а также сравнили их с продуктами извержений других близко расположенных вулканов (Крашенинникова и Гамчен). Кроме того, для точной идентификации маркирующих горизонтов тефры мы выполнили определения состава вулканического стекла во всех слоях пирокластики из наших разрезов и сопоставили их с референсными составами из работ [8-11].

Образцы и методы. На рисунке 1а показано расположение изученных разрезов на северном подножии Кроноцкого вулкана. 33 образца тефры, отобранных в разрезах (рис. 1б и в), а также 15 образцов шлаков и фрагментов бомб со склонов постройки стратовулкана и шлаковых конусов вулкана Крашенинникова были помещены в формы из оргстекла и залиты эпоксидной смолой. После отвердевания препараты были отполированы на алмазных пастах и покрыты углеродным напылением. Определение содержаний главных компонентов (Si, Ti, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, Na, K и P) в вулканических стеклах было выполнено в ИВиС ДВО РАН при помощи сканирующего электронного микроскопа Vega 3 Tescan, оборудованного энергодисперсионным спектрометром Oxford X-max80mm² и программным обеспечением AZtec. Кроме того, несколько образцов было проанализировано на электронном зонде JEOL JXA-8200 в GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research Kiel (г. Киль, ФРГ) и на электронном зонде JEOL JXA-8230 на Кафедре петрологии и вулканологии Геологического факультета МГУ. Использование международных аттестованных стандартных образцов

вулканических стекол в ходе всех аналитических сессий обеспечило возможность сопоставления анализов, полученных в разных лабораториях.

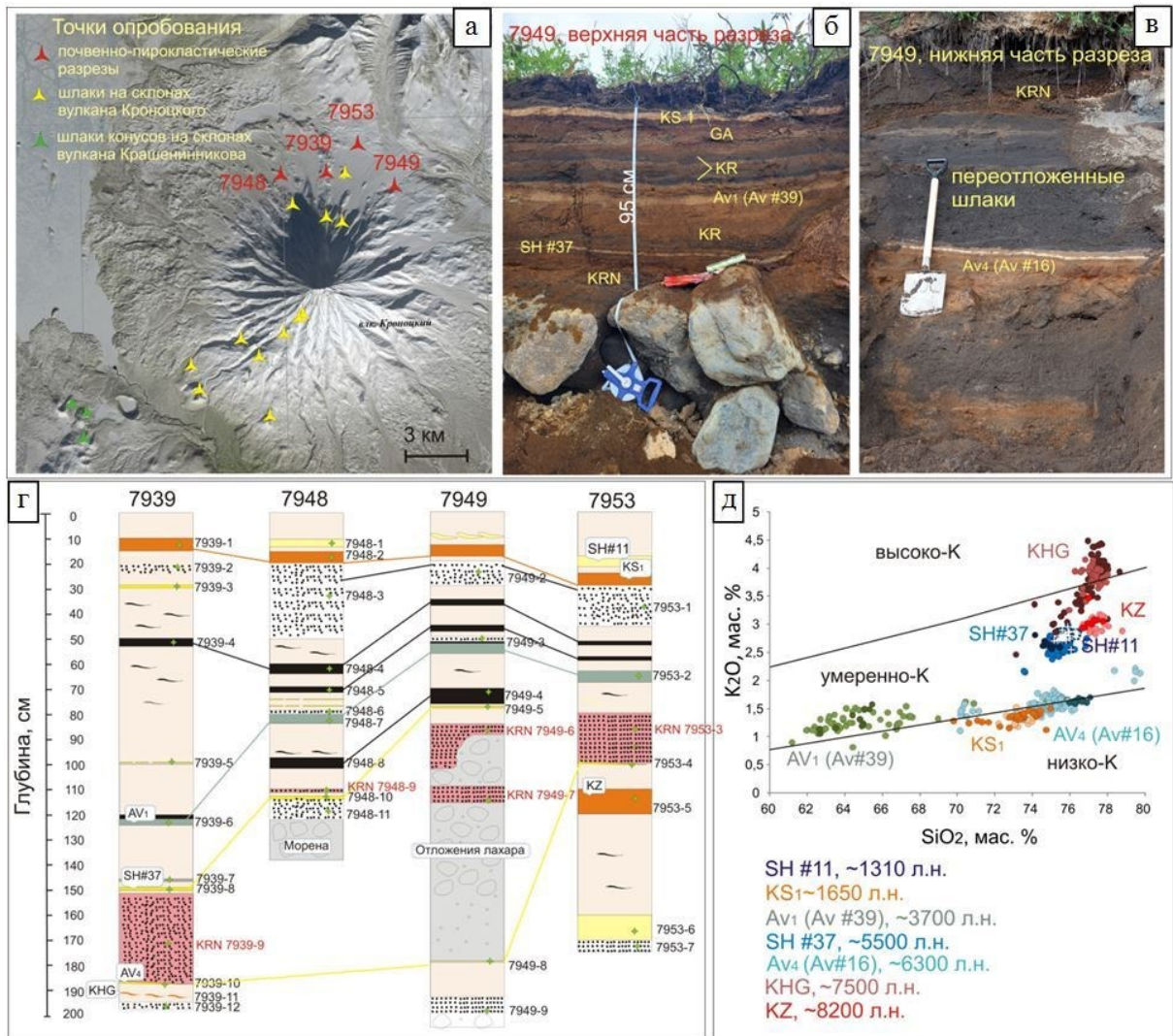


Рис. 1. Результаты изучения почвенно-пирокластических разрезов на северных склонах вулкана Кроноцкий. а – позиция изученных разрезов; б – облик верхней части разреза в точке #7949, в – облик нижней части разреза в точке #7949, где отложения шлаков ассоциируют с отложениями лахара, г – схематические разрезы, подписаны номера отобранных и проанализированных образцов; черные точки, маркирующие отдельные горизонты, обозначают грубые шлаки, сплошная заливка отдельных горизонтов отвечает средне-, мелкозернистым пеплам; красным шрифтом выделены номера образцов, отвечающие продуктам активности вулкана Кроноцкий; д – состав вулканических стекол маркирующих горизонтов тефры в координатах SiO₂-K₂O, дискриминационные линии по [7]. Темный оттенок знаков отвечает референсным составам стекол отдельных объектов согласно [10], более светлый оттенок соответствует составам стекол из наших разрезов. Возраст маркирующих горизонтов пеплов (калиброванный от 1950 г.) согласно работам [8-11].

Идентификация маркирующих горизонтов пеплов в разрезах. Голоценовые тефры-маркеры Восточной Камчатки детально изучены, датированы и геохимически охарактеризованы [1, 6, 8-11]. Установлено, что источниками главных маркеров для северной ее части были вулканические центры Шивелуч, Опала, Ксудач, Авачинский, Хангар, Кизимен и Карымский. На основе результатов анализа состава вулканических стекол все перечисленные маркеры, за исключением Опалы, были идентифицированы в наших разрезах (рис. 1д). Практически во всех разрезах установлены горизонты, связанные с извержениями вулкана Шивелуч (SH#11/SH₃1310 л.н. и SH#37 ~5500 л.н.

[9, 10]), с кальдерообразующим извержением вулкана Ксудач (KS_1 , ~1650 л.н. [12]), два горизонта извержений вулкана Авачинский ($AV\#39/AV_1$, ~3800 л.н. и $AV\#16/AV_4$, ~6300 л.н. [8, 10]. Кроме того, в основании одного из разрезов были обнаружены тонкие линзы пеплов субкальдерного извержения вулкана Хангар (KHG , ~7900 л.н.), а в другом – следы извержения вулкана Кизимен (KZ , ~8200 л.н.) [10 и ссылки в ней].

Горизонты тефры вулкана Кроноцкий и их возраст. На рис. 2 показано сравнение составов стекол из горизонтов шлака в наших разрезах с аналогичными данными для образцов пирокластики со склонов постройки вулкана Кроноцкий, а также с данными для продуктов извержений вулканов Крашенинникова и Гамчен [10, 11]. На диаграмме SiO_2 - K_2O (рис. 2а) большая часть точек составов вулканических стекол из двух горизонтов шлака из наших разрезов находится в поле составов стекол образцов самой постройки и хорошо отличается от вулканических стекол вулкана Гамчен более основным составом. Однако, в области содержаний SiO_2 55-57 масс. % составы стекол вулканов Кроноцкий и Крашенинникова сближаются, что не позволяет четко разграничить области их составов. Диаграмма K_2O - TiO_2 (рис. 2б) предоставляет такую возможность – составы двух объектов демонстрируют различные тренды поведения TiO_2 по мере роста содержания калия. Таким образом, на основе полученных данных по составу вулканического стекла мы выделяем в разрезах два горизонта, которые связаны с извержениями вулкана Кроноцкий. Основной горизонт шлака обнаружен в трех разрезах и представлен образцами 7939-9, 7949-6, 7949-7, 7953-3 на рис. 1г. Мощность горизонта составляет от 20 до 30 см, а крупность шлаковых лапилли достигает 2 см ближе к вулкану (точки 7939 и 7949) и уменьшается до 0.5-1 см с удалением от него (точка 7953). Горизонт шлаков во всех разрезах залегает между маркирующими тефрами вулканов Шивелуч ($SH\#37$, ~5500 л.н.) и Авачинский ($AV\#16$, ~6300 л.н.). Такая строгая стратиграфическая позиция горизонта шлака позволяет определить время его извержения около 6000 л.н. На северо-восточном подножии (точка 7949, рис. 1а) шлаки ассоциируют с отложениями лахара, что дает основание предполагать локализацию центра извержения именно в этом секторе вулкана. Еще один горизонт обнаружен только в одном разрезе (обр. 7948-9, рис. 1г) и представлен стратифицированным черным среднезернистым пеплом с примесью лапилли до 0.5 см. Пепел залегает непосредственно над маркирующим горизонтом $SH\#37$, и, следовательно, его возраст может составить около ~5200-5400 лет.

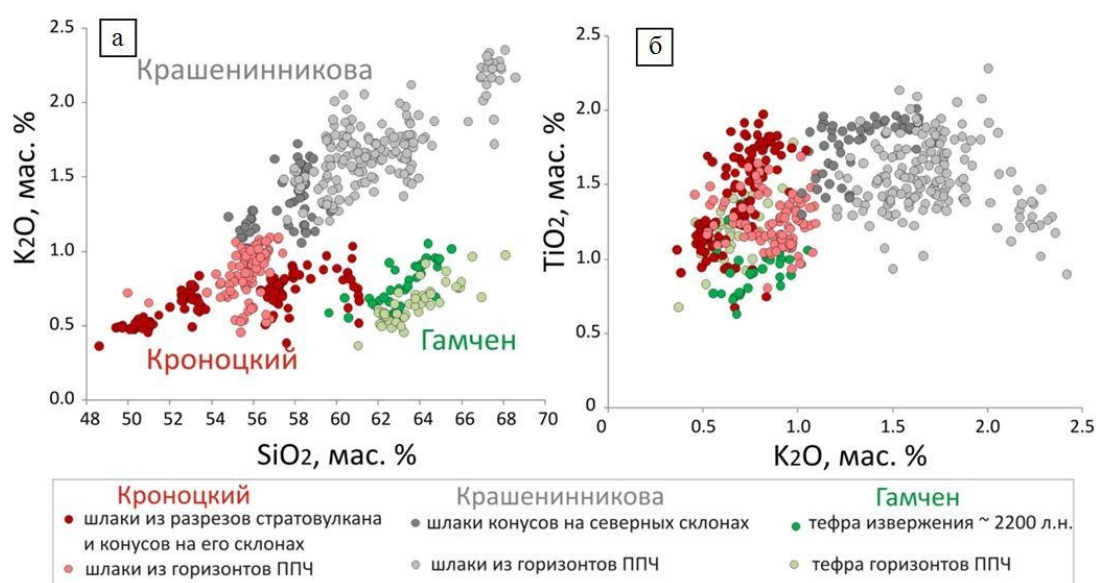


Рис. 2. Состав вулканических стекол в тефре различных вулканов района исследований на диаграммах SiO_2 - K_2O (а) и K_2O - TiO_2 (б). Референсные составы стекол тефры вулкана Крашенинникова представлены по нашим данным и по данным работы [10], а для тефры вулкана Гамчен – согласно [10, 11].

Кроме двух горизонтов шлаков, которые мы отнесли к продуктам активности Кроноцкого вулкана, во всех разрезах идентифицирован горизонт, связанный с извержением вулкана Гамчен ~2150 л.н., а также широко представлены тефры разной крупности, связанные с активностью вулкана Крашенинникова.

Заключение. В стратифицированных голоценовых почвенно-пирокластических отложениях впервые обнаружены горизонты тефры, связанные с эксплозивными извержениями вулкана Кроноцкий. Горизонт шлаков мощностью от 20 до 30 см, отвечающий по составу продуктам эксплозивного извержения Кроноцкого вулкана, залегает между тефрами извержений вулканов Шивелуч и Авачинский с возрастными ~5500 л.н. и ~6300 л.н., соответственно. Возраст этого слоя оценивается приблизительно в 6000 л.н. Еще один, менее мощный горизонт, обнаружен выше слоя тефры вулкана Шивелуч ~5500 л.н. и, наиболее вероятно, связан с извержением около ~5200-5400 л.н. Впервые установленные нами голоценовые извержения вулкана Кроноцкий позволяют подтвердить его статус действующего вулкана.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-27-00053 «Условия происхождения и эволюции магм во фронтальной зоне островной дуги на примере вулкана Кроноцкого (Восточная Камчатка)» (<https://rscf.ru/project/23-27-00053/>).

Авторы искренне признательны В.В. Пономаревой и О.В. Дирксену за обсуждение результатов работы.

Список литературы

1. *Брайцева О.А., Базанова Л.И., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д.* Крупнейшие голоценовые извержения вулкана Авачинский на Камчатке (этап 7250-3700 ¹⁴C лет назад) // *Вулканология и сейсмология*. 1998. № 1. С. 3-24.
2. *Горбач Н.В., Rogozin A.N.* Особенности геологического строения и состава пород вулкана Кроноцкого – крупнейшего стратовулкана фронтальной зоны Восточного вулканического пояса Камчатки // *Вулканология и сейсмология*. 2023. № 5. С. 26-45.
3. *Горбач Н.В., Rogozin A.N., Овсянников Г.Н.* Полевые работы на северных склонах Кроноцкого вулкана в июле-августе 2023 г. // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2023. № 4. Вып. 60. С. 114-121. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-4-60-114-121>
4. *Гуценко И.И.* Вулкан Кроноцкий // В кн.: *Действующие вулканы Камчатки*. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 52-61.
5. *Мелекесцев И.В.* Действующие и потенциально активные вулканы Курило-Камчатской островной дуги в начале XXI в.: этапы исследований, определение термина «действующий вулкан», будущие извержения и вулканическая опасность // *Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле*. 2006. № 1. Вып. 7. С. 15-35.
6. *Braitseva O.A., Ponomareva V.V., Sulerzhitsky L.D. et al.* Holocene key-marker tephra layers in Kamchatka, Russia // *Quaternary Research*. 1997. V. 47. № 2. P. 125-139. <https://doi.org/10.1006/qres.1996.1876>
7. *Gill J.B.* Orogenic andesites and plate tectonics. 1981, Berlin Heidelberg: Springer Verlag. 390 p.
8. *Krashennnikov S.P., Bazanova L.I., Ponomareva V.V., Portnyagin M.V.* Detailed tephrochronology and composition of major Holocene eruptions from Avachinsky, Kozelsky, and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2020. № 408. Art. 107088. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107088>
9. *Ponomareva V., Portnyagin M., Pendea I.F. et al.* A full Holocene tephrochronology for the Kamchatsky Peninsula region: Applications from Kamchatka to North America // *Quaternary Science Reviews*. 2017. V. 168. P. 101-122. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.04.031>
10. *Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. et al.* TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // *Earth System Science Data*. 2020. V. 12. № 1. P. 469-486. <https://doi.org/10.5194/essd-12-469-2020>
11. *Zelenin E., Kozhurin A., Ponomareva V., Portnyagin M.* Tephrochronological dating of paleoearthquakes in active volcanic arcs: A case of the Eastern Volcanic Front on the Kamchatka Peninsula (northwest Pacific) // *Journal of Quaternary Science*. 2020. V. 35. № 1-2. P. 349-361.

Сопоставление вулканической активности вулкана Шивелуч с сейсмичностью в 2016-2023 гг.

Зарипов Т.Р.

Comparison of volcanic activity of Shiveluch volcano with seismicity in 2016-2023

Zaripov T.R.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

e-mail: zaripov.tim000zaripov@yandex.ru

В работе описаны крупные извержения вулкана Шивелуч (Камчатка) с 2016 по 2023 гг., выделена и систематизирована связь этих извержений с землетрясениями в окрестностях вулкана.

Введение

В настоящем исследовании представлены и описаны крупные извержения вулкана Шивелуч, а также связанные с его активностью сейсмические явления. Анализировались данные за период с 2016 по 2023 год включительно. Целью исследования было выявление, конкретизация и систематизация связей между землетрясением и извержением, прогноз будущих извержений на основе этих данных.

Хронология извержений и их описание

За рассматриваемый промежуток времени на вулкане Шивелуч имела место активная вулканическая деятельность, в результате которой регулярно происходили выбросы пепла, фумарольная активность, сходы пирокластических потоков и т.д.

Интенсивные и значительные извержения (по данным системы VOKKIA ИВиС ДВО РАН на 2024 год, <http://geoportals.kscnet.ru/volcanoes>) произошли три раза: в 2016, 2018 и 2023 годах (таблица).

Таблица. Описание извержений вулкана Шивелуч

Период активности	Описание
18.09.2016	Рост лавового купола, фумарольная активность, разогрев вершины купола, горячие лавины.
09.01.2018 – 10.01.2018	Продолжение эруптивной активности. Взрывы выбросили пепел на высоту 10-11 км над уровнем моря. Смещение облака пепла на северо-восток. К 10.01 облако пепла достигло размеров примерно 350×180 км, (по данным системы VOKKIA ИВиС ДВО РАН на 2024 год), продолжает смещаться на восток от вулкана.
10.04.2023 – 13.04.2023	13:10 по Гринвичу 10 апреля. Пароксизмальное извержение. По данным KVERT (ИВиС ДВО РАН), взрывы выбросили пепел на высоту до 10 км над уровнем моря. 10-12 апреля отмечался непрерывный вынос пепла из вулкана. Пепловый шлейф тянулся в разных направлениях от вулкана: 10 апреля – на запад от вулкана примерно на 370 км, 11-12 апреля сначала на юг от вулкана, на 660 км, затем на восток, на 3000 км. Термическая аномалия в районе вулкана.

Примечание. Таблица составлена на основе авиационных данных и данных об извержениях вулкана за рассматриваемый промежуток времени (информация Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT)).

Сейсмические явления, их характеристики и связь с извержением

Чаще всего землетрясения, имеющие непосредственное отношение к извержению, происходят за некоторое время до начала эруптивной активности вулкана [1, 2]. В 2016 г. произошли три крупных серии землетрясений: с 31 января по 16 февраля, с 5 апреля по 2 мая и с 08 июля по 18 июля. В первый пик число землетрясений достигло 383, во второй пик – 403, в третий пик – 113 [1]. Классы всех землетрясений попадают в диапазон от 2.7 до 6.2 M_s . Из приведенных данных видно, что самое большое количество толчков происходило в среднем за 4.5 месяца до начала эруптивной активности Шивелуча в 2016 году.

В 2017 году также было зафиксировано несколько серий последовательных толчков класса M_s не менее 2.7. К сожалению, сейсмические станции, ведущие наблюдения за вулканом, в течение года находились в неустойчивом положении, из-за чего за весь 2017 год удалось зафиксировать лишь 35 сейсмических явлений. Самым мощным из них стало землетрясение класса $M_s=8.5$, которое было зарегистрировано 19 июля в 08:19 утра в постройке вулкана [1]. Так как извержение 2018 г. произошло с 9 по 10 января, то логично предположить наличие связи этого землетрясения (а также побочных толчков) с соответствующим январским извержением.

В 2023 г. произошло сильнейшее с 1964 г. катастрофическое извержение. Повышенная сейсмическая активность наблюдалась с 11 октября 2022 г. по июнь 2023 г. Всего было зарегистрировано около 18450 землетрясений [2]. По данным КФ ФИЦ ЕГС РАН, за указанный выше промежуток времени было зафиксировано три всплеска сейсмической активности – землетрясений 4 типа (поверхностные вулканические [2]). Первый всплеск произошел в начале октября 2022 г. Второй, самый сильный всплеск был зафиксирован 01 января 2023 г. Третий всплеск пришелся на начало марта 2023 г. К началу эруптивной активности вулкана Шивелуч сейсмическая активность продолжала усиливаться, что однозначно доказывает связь периодических всплесков активности с извержением 10.04-13.04.

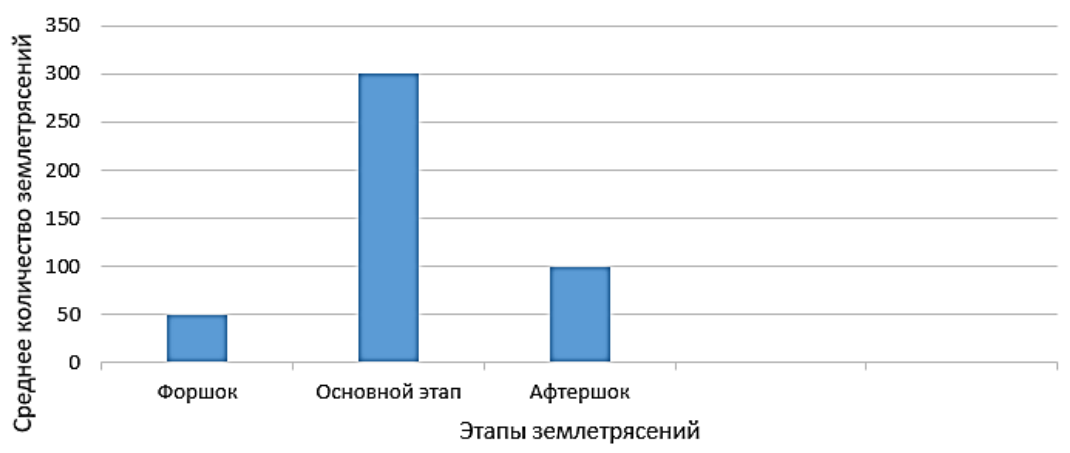


Рисунок. Примерное усредненное количество землетрясений перед началом извержения. Каждый этап представляет собой серию землетрясений, произошедших перед извержением.

Заключение

Перед крупными эруптивными извержениями вулкана Шивелуч происходили три скачкообразных всплеска сейсмической энергии в окрестностях вулкана. Сравнивая их с динамикой тектонического землетрясения, можно выделить форшоковый, основной и афтершоковый этапы землетрясений каждого всплеска (рисунок). Самый большой всплеск сейсмической активности происходил за три-четыре месяца до начала эруптивной стадии извержения. Таким образом, можно предположить, что наличие трех всплесков сейсмической активности, в каждом из которых отдельно взятая серия землетрясений имеет форшоковый, основной и

афтершоковый этап активности, является указанием на повышенную вероятность крупного извержения.

Список литературы

1. *Сенюков С.Л., Нуждина И.Н.* Сейсмичность вулканических районов Камчатки в 2016-2017 гг. // *Землетрясения Северной Евразии.* 2022. Вып. 25. С. 361-377. <https://doi.org/10.35540/1818-6254.2022.25.34>
2. *Сенюков С.Л., Нуждина И.Н., Дроздина С.Я. и др.* Предварительные результаты исследований сейсмичности в районе вулкана Шивелуч в 2022-2023 гг. // *Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Девятой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием 24-30 сентября 2023 г.* Петропавловск-Камчатский: Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 2023. С. 188-192.

Вклад научной школы к.ф.-м.н. П.И. Токарева в развитие методов прогноза вулканических извержений и изучение их механизмов

Иванов В.В.

Contribution of the scientific school by Ph.D. P.I. Tokarev to the development of methods for predicting volcanic eruptions and studying their mechanisms

Ivanov V.V.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: victorvasilievich53@gmail.com*

В связи со 100-летним юбилеем заведующего лабораторией прогноза и механизма извержений Института вулканологии ДВО РАН, председателя рабочей группы Международной ассоциации вулканологии и химии недр земли П.И. Токарева (21.06.2023 г.), рассмотрен вклад его научной школы в развитие прогнозной тематики, отечественной и мировой вулканологии.

Введение

Прогноз места, времени начала и масштаба извержений вулканов имеет целью снижение вулканического риска для населения и народного хозяйства, а также своевременную подготовку к его изучению. Прогнозирование основано на фундаментальном изучении магматических и вулканических процессов (*механизмов извержений*) и предполагает создание соответствующих наблюдательных сетей, оперативных служб, методик мониторинга и прогноза. Магматизм и его поверхностные проявления в форме активного вулканизма имеют несколько характерных особенностей, вследствие чего их поведение можно предвидеть [7]. Однако, эти попытки не всегда успешны по ряду причин [1, 2, 17]. Продвижение вперед в этой области невозможно без учета большого опыта, накопленного на Камчатке за 65-летний период инструментальных наблюдений. Большинство достижений в этой сфере во второй половине XX столетия было связано с именем к.ф.-м.н. Павла Ивановича Токарева, заведующего лабораторией Прогноза и механизма извержений (ПиМИ) Института вулканологии ДВО РАН, председателя рабочей группы по изучению землетрясений и деформаций земной поверхности вулканических районов Международной ассоциации вулканологии и химии недр Земли, а также с работами его учеников [10]. 21 июня 2023 г. исполнилось 100 лет со дня рождения этого замечательного ученого, создателя научной школы по сейсмологическому прогнозу вулканических извержений и изучению их механизмов. За выдающиеся научные результаты Павел Иванович неоднократно награждался правительственными наградами. Его школа продолжает развиваться. Детальный критический анализ работ школы опубликован в [3]. Здесь дается краткое перечисление достижений школы П.И. Токарева, перспективных, на наш взгляд, направлений исследований, а также представлений, не выдержавших проверку временем. Списки публикаций П.И. Токарева и его учеников даны в [10, 12-16].

Формирование научных направлений и их развитие

После окончания Московского университета в 1953 г. П.И. Токарев поступил на работу в Лабораторию вулканологии АН СССР в Москве, где окончил аспирантуру. В 1957 г. он был направлен на Камчатскую вулканологическую станцию в пос. Ключи как сейсмолог, где к тому времени были активно изучены Ключевская группа, состоящая из 13 вулканов, и один из самых мощных магматических центров планеты – вулкан Шивелуч, составлен каталог действующих вулканов Камчатки и Курильских островов [11]. П.И. Токарев создал сейсмическую сеть и систему оперативного слежения за состоянием действующих вулканов. Определелись его направления исследований, была защищена кандидатская диссертация [10]. После образования в 1962 г. Института вулканологии СО АН СССР П.И. Токарев возглавил лабораторию сети геофизических стационаров, а затем лабораторию ПиМИ (рис. 1). Работа велась в кооперации с группой обработки Камчатской вулканостанции (рук. к.ф.-м.н.

В.И. Горельчик). В 1971-1972 гг. силами лаборатории была организована и в течение многих лет обслуживалась удаленная Карымская комплексная геофизическая обсерватория, расположенная на расстоянии 3.5 км от одного из самых активных вулканов Камчатки – Карымского, которая проработала до 1986 года (рис. 2). В дальнейшем эти работы продолжились в Институте вулканологии и сейсмологии ДВО РАН О.П. Руленко, В.В. Ивановым и в Камчатском филиале Единой геофизической службы РАН под руководством д.ф.-м.н. П.П. Фирстова [13].



Рис. 1. Заведующий лабораторией ПиМИ Института вулканологии ДВО РАН П.И. Токарев (21.06.1923 – 08.02.1993) и лаборатория ПиМИ в начале 1980-х гг. (сфотографирована часть сотрудников). Слева направо: нижний ряд Н.И. Реутова, П.И. Токарев, Ю.В. Карпущина; верхний ряд В.В. Иванов, Е.И. Хименко, В.А. Широков, В.В. Степанов, В.Ф. Радчук и А.М. Пашенко. Фото В.А. Подтабачного.

Рис. 2. Вулкан Карымский и Карымская комплексная геофизическая обсерватория ($\Delta = 3.5$ км). Построена в 1970 г. сотрудниками лаб. ПиМИ под руководством П.И. Токарева и П.П. Фирстова. Фото Н.П. Смелова.

Направления исследований

П.И. Токаревым и лабораторией ПиМИ в Институте вулканологии ДВО РАН проводились плановые масштабные исследования по следующим направлениям: 1) тектоника и вулканизм (В.А. Широков); 2) вулкано-географическое районирование (П.И. Токарев совместно с Е.К. Мархининым, А.Н. Сириным и К.М. Тимербаевой); 3) космофизические факторы, долго- и среднесрочный прогноз (В.А. Широков); 4) краткосрочный прогноз по сейсмологическим данным и по комплексу параметров (П.П. Фирстов, В.А. Широков, А.В. Сторчеус, В.В. Иванов); 5) количественная характеристика и повторяемость извержений (В.В. Иванов); 6) механизм вулканических извержений, акустические исследования и Карымская обсерватория (П.П. Фирстов и А.В. Сторчеус); 7) электромагнитные исследования (О.П. Руленко и В.М. Трубников); 8) эруптивные вулканические облака (О.П. Руленко и В.В. Иванов); 9) методики мониторинга действующих вулканов (В.В. Иванов) (рис. 3).

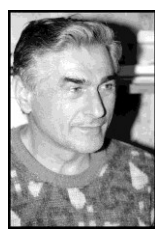


Рис. 3. Научные сотрудники лаборатории ПиМИ, ученики П.И. Токарева. Слева направо: к.ф.-м.н., в.н.с. Владимир Алексеевич Широков (3.06.1940-2.02.2021); д.ф.-м.н., зав. лабораторией Павел Павлович Фирстов (6.04.1941-20.07.2021); н.с. Александр Васильевич Сторчеус (27.08.1950-5.11.2010); ведущий инженер Валерий Митрофанович Трубников (15.05.1946-07.2005); к.ф.-м.н., с.н.с. Олег Петрович Руленко; к.г.-м.н., с.н.с. Виктор Васильевич Иванов.

Краткое обсуждение результатов работы научной школы П.И. Токарева

В 1959 г. П.И. Токаревым в его фундаментальной работе впервые исследована сейсмофокальная зона Камчатки, связь вулканизма и тектоники района [5].

Среди методик долго- и среднесрочного прогноза можно отметить, во-первых, важную для практики методика выделения групп верхнемантийных землетрясений под цепью вулканов (глубины 70-300 км) и их связи с извержениями [12]. П.И. Токарев и В.А. Широков считали, что появление землетрясений на таких глубинах свидетельствует об увеличении литостатического давления и, соответственно, избыточного давления в магматических очагах. Такие землетрясения они интерпретировали как «активизацию» среды в области зарождения магм, своего рода «возмущение», которое, по их мнению, через некоторое время распространяется к поверхности земли и приводит к извержениям. Однако предложенная интерпретация не выдержала проверки временем. В работе [4] обосновывается, что наоборот, появление верхнемантийных и коровых землетрясений свидетельствует о снижении литостатического давления в зонах субдукции, о разгрузке среды, что благоприятствует подъему магмы по субвертикальным магматическим каналам. Эта концепция хорошо согласуется с недавними извержениями вулканов Безымянный и Шивелуч, произошедшими при значительном усилении сейсмичности в Камчатском заливе. Заслуживает внимания методика выделения активных вулканических фаз в пределах солнечного цикла 18.6 года В.А. Широкова, которая показала свою высокую эффективность. Представляется перспективным дальнейшее развитие его работ по влиянию общепланетарных факторов на вулканы, например, влияния скорости вращения Земли и ведущей роли целочисленных резонансов в Солнечной системе [12].

П.И. Токаревым была предложена классификация вулканических землетрясений Камчатки, номограммы для определения их энергии. Впервые для анализа сейсмического режима вулкана им были использованы кумулятивные графики условных сейсмических деформаций Беньоффа, даны формулы для их аппроксимации и оценки времени начала извержения [6]. Впрочем, практика применения предложенных им сейсмологических методик краткосрочного прогноза показала, что они не являются универсальными. В ряде случаев эти графики перед извержениями андезитовых вулканов развиваются не по гиперболическому, а по экспоненциальному или линейному законам, которые не имеют вертикальных асимптот. Прогнозирование времени начала таких извержений сейсмологическим методом затруднительно. Показано, что различие видов сейсмологических предвестников андезитовых вулканов определяется состоянием центрального питающего канала вулкана накануне извержения (открытая или закрытая система). При этом важны как характер завершения предыдущего извержения (эксплозивное или эффузивное), так и процессы, происходящие в его питающем канале между извержениями [16]. Хорошие перспективы для краткосрочного прогноза имеет методика комплексирования факторов В.А. Широкова [12]. Главной проблемой остается прогнозирование пароксизмальных фаз извержений андезитовых и дацитовых вулканов в результате внезапного обрушения их огромных лавовых куполов или подхода к поверхности земли огромных «пузырей» газонасыщенной магмы в условиях непрерывного движения магмы (открытая система) и отсутствия предвестников [2].

Особого внимания заслуживают работы П.И. Токарева, П.П. Фирстова и А.В. Сторчеуса по механизмам вулканического дрожания, землетрясений и вулканических взрывов на основании акустических и сейсмических данных на вулканах Карымский, Ключевской и Толбачик [10, 13-14]. Выдающимся результатом следует считать реконструкцию динамики катастрофического извержения вулкана Шивелуч 12 ноября 1964 г. П.П. Фирстова [13], уточнение по сейсмологическим данным конфигурации периферического магматического очага вулкана Карымский и обнаружение связи вулканических землетрясений с тектонической обстановкой (В.А. Широков, В.В. Иванов, В.В. Степанов). Классическим является экспериментальное исследование электризации вулканических облаков, предпринятое О.П. Руленко, а также теория образования капельных парогазовых облаков (В.В. Иванов).

Разработанные методики имели практическое применение. На их основе были эффективно предсказаны следующие извержения: вулкана Шивелуч в 1964 г. (предвидение), времени и места Большого Толбачинского извержения в 1975 г., побочного извержения вулкана Ключевской в 1983 г. (П.И. Токарев), вулкана Шивелуч в 1993 г. (В.А. Широков с коллегами), вулкана Карымский в 1996 г. (А.В. Сторчеус), и извержения вулкана Шивелуч в 2001 г. (В.В. Иванов).

Исследования по прогнозу и механизму вулканических извержений на Камчатке в рамках научной школы П.И. Токарева существенно продвинули наше понимание природы вулканической деятельности, ее опасности и методик снижения вулканического риска. В рамках этой школы защищены четыре кандидатских и одна докторская диссертация, опубликованы три монографии и более 200 научных статей [6-9]. Под руководством д.ф.-м.н. П.П. Фирстова недавно были подготовлены и защищены еще три кандидатских диссертации (Е.О. Макаров, А.А. Шакирова и Р.Р. Акбашев). Научная школа П.И. Токарева продолжает развиваться. Полученные в ее рамках результаты будут способствовать появлению новых направлений в науке и практике изучения активного вулканизма, мониторинга и прогноза вулканических извержений.

Автор выражает искреннюю признательность научному руководителю П.И. Токареву, сотрудникам лаборатории ПиМИ за совместную работу, Г.А. Карпову за редактирование, В.А. Подтабачному и Н.П. Смелову за фотографии и М.В. Кузнецовой за организацию выставки к 100-летию даты со дня рождения П.И. Токарева.

Список литературы

1. *Иванов В.В.* Средне- и краткосрочные прогнозы извержений вулканов на Камчатке (1956-2012 гг.) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2013. № 2. Вып. 22. С. 98-118.
2. *Иванов В.В.* Прогноз извержений вулканов на Камчатке (основные итоги 1955-2012). Ч. II. «Пропуски цели», «ложные тревоги» и их возможные причины // История и педагогика естествознания. 2015. № 2. С. 14-19.
3. *Иванов В.В.* Исследования по прогнозу вулканических извержений на Камчатке и изучении их механизмов за 1959-2022 гг. (аналитический обзор) // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2023. № 5-6. С. 78-90.
4. *Ребецкий Ю.Л., Стефанов Ю.П.* О механизме взаимодействия сильных землетрясений и вулканизма в зонах субдукции // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2022. № 4. Вып. 56. С. 41-58.
5. *Токарев П.И.* О связи вулканической и сейсмической активности в Курило-Камчатской зоне // Труды Лаборатории вулканологии АН СССР. 1959. Вып. 17. С. 156-182.
6. *Токарев П.И.* Извержения и сейсмический режим вулканов Ключевской группы. М.: Наука, 1966. 118с.
7. *Токарев П.И.* Предсказание места и времени начала большого Толбачинского извержения в июле 1975 г. // ДАН СССР. 1976. Т. 229. № 2. С. 439-442.
8. *Токарев П.И.* Вулканические землетрясения Камчатки. М.: Наука, 1981. 164с.
9. *Фирстов П.П.* Вулканические акустические сигналы диапазона 1.0-10 Гц и их связь с взрывным процессом. Петропавловск-Камчатский: Издательство КГПУ, 2003. 90 с.
10. <http://www.kscnet.ru/ivs/memory/TokarevPI/> (электронный ресурс, П.И. Токарев).
11. http://www.kscnet.ru/ivs/lkamv/kamchat_volc_station/index.html (электронный ресурс).
12. <http://www.kscnet.ru/ivs/memory/ShirokovVA/> (электронный ресурс, В.А. Широков).
13. <http://www.kscnet.ru/ivs/memory/FirstovPP/> (электронный ресурс, П.П. Фирстов).
14. https://scholar.google.com/scholar?start=0&q=author:%22a+v+storcheus%22+OR+author:%22a+v+storcheus%22&hl=ru&as_sdt=0,5 (электронный ресурс, А.В. Сторчеус).
15. https://www.mathnet.ru/php/person.phtml?option_lang=rus&personid=123411 (электронный ресурс, О.П. Руленко).
16. <http://www.kscnet.ru/ivs/bibl/sotrudn/ivanovvv.html> (электронный ресурс, В.В. Иванов).
17. *Sparks R.S.J.* Forecasting volcanic eruptions // Earth and Planetary Science Letters. 2003. V. 210. P. 1-15.

Прошлые суперизвержения вулканов мира и возможное мегаизвержение Йеллоустона в Северной Америке

Кирьянов В.Ю.¹, Карпов Г.А.²

Past super-eruptions of the worldwide volcanoes and possible mega-eruption of Yellowstone volcano in North America

Kiryanov V.Yu., Karpov G.A.

¹ «ООО АЛСИ НОРД», г. Санкт-Петербург;

e-mail: kiryanov@mail.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Извержения супервулканов (мегаизвержения) происходят не чаще одного раза в 20-70 тысяч лет, но каждое из них оставляет значительный след в истории Земли. Мощность и продолжительность подобных извержений может варьировать, однако объем изверженных продуктов достаточен, чтобы радикально изменить ландшафт и значительно повлиять на глобальный климат планеты, вызывая катастрофические последствия для жизни.

К супервулканам принято относить те вулканы, которые в доисторическое время извергали более 1000 км³ вулканического материала. Это значительно больше, чем извергают вулканы в настоящее время.

Считается, что супервулканы образуются в случае, когда магма десятки-сотни тысячелетий не имеет свободного выхода на поверхность Земли. За счет этого формируется супербольшой магматический очаг с напряжениями, которые уже невозможно сдерживать вышележащим слоям Земной коры.

Подобные условия создаются над «горячими точками» Земли (пример – кальдера-вулкан Йеллоустон) или на конвергентных границах плит (например, вулкан Тоба). Супервулканы характеризуются отсутствием конусообразных вершин.

После извержения с индексом вулканической эксплозивности VEI=6-7, при объемах выбросов уже с первых сотен кубических километров, вследствие попадания вулканического пепла и пыли в атмосферу и отражения от них солнечных лучей, может наступить относительно краткосрочное похолодание планетарного масштаба, чему есть недавние исторические свидетельства. В отличие от «современных» катастрофических извержений вулканов, с объемом выброшенного материала от 1 до 100 км³, кратковременные по времени извержения супервулканов могут вызвать более серьезные и длительные климатические последствия.

Приведем примеры таких суперизвержений:

1. Порядка 26 500 лет назад – извержение супервулкана Таупо, Северный остров, Новая Зеландия. Объем изверженной тefры составил примерно 1170 км³.

2. Около 74 000 лет назад – извержение супервулкана Тоба (Индонезия). Объем выброшенной породы составил порядка 2800 км³.

3. Около 640 000 лет назад – извержение Йеллоустоунской кальдеры (Лава Крик Туф, штат Вайоминг, США). Извергнуто около 1000 км³ породы.

Произошедшее 26 500 лет назад извержение Таупо, известное как извержение Оруануи, стало крупнейшим вулканическим извержением в мире за последние 70 000 лет и было оценено в 8 баллов по шкале VEI. Извержение сформировало кальдеру размерами 33×46 км [8, 12]. После этого вулкан Таупо извергался еще 28 раз. Последнее значительное извержение произошло около 180 года н.э. Оно стало одним из самых сильных на планете за последние пять тысяч лет. Эта катастрофа уничтожила жизнь на половине Северного острова, покрыв пеплом территорию в 16 000 км². Римские и китайские исторические источники донесли до нас сведения о «красном небе» в год извержения. Это значит, что в атмосферу попало очень много вулканического аэрозоля.

Извержение вулкана Тоба (Событие Тоба) произошло примерно 69 000-77 000 лет назад. Оно достигало 8 баллов по шкале VEI и, скорее всего, стало самым

мощным на Земле за последние миллионы лет. Извержение стало последним из серии, состоящей, по крайней мере, из трех эпизодов извержений вулкана Тоба, которые начали формировать современную кальдеру размером 100×30 км в районе 700 000-840 000 лет назад. Как полагают ученые, объем выпавшего пепла был настолько велик, что вся Южная Азия оказалась покрыта его 15-сантиметровым слоем. На территории современной Индии толщина выпавшего пепла местами достигала шести метров, а отдельные районы Малайзии были покрыты девятиметровым слоем вулканических выбросов. Кроме того, по разным подсчетам, в результате извержения в атмосферу было выброшено до 10 миллиардов тонн серной кислоты или 6 миллиардов тонн диоксида серы; это вызвало выпадение кислотных дождей.

Хотя невозможно точно установить год, когда произошло это извержение, ученым удалось узнать время года: только летний муссон может отнести пепловые облака в Южно-Китайское море, то есть извержение, скорее всего, произошло летом и продолжалось около двух недель. Оно привело к понижению средней глобальной температуры на 3-3.5 °С в течение нескольких лет. Ледовые керны Гренландии зафиксировали резкое снижение уровня органического поглощения углерода. Очень немногие растения и животные в Юго-Восточной Азии смогли выжить в результате извержения, и не исключено, что оно вызвало массовое вымирание по всей планете [4, 9, 10]. По данным антропологов, именно в эту эпоху наступил демографический кризис, когда на Земле осталось не более 10 000 людей. После этого гигантского извержения сформировавшаяся кальдера Тоба заполнилась водой, что привело к образованию озера Тоба. Остров в центре озера является возрождающимся вулканическим куполом [1-3].

Небольшие извержения кальдеры Тоба происходили и после основного извержения. В южной части кальдеры сформировался небольшой вулкан Пусубукит, отличающийся фумарольной активностью. После землетрясения 2004 г. в Индийском океане, спутники системы GRACE зафиксировали небольшое изменение формы Земли и сдвиг острова Суматра на расстояние в несколько десятков метров. Таким образом, сильная локальная сейсмическая активность инициирует увеличение магматической деятельности кальдеры, что может привести к новому грандиозному извержению.

В настоящее время опасность для цивилизации исходит, в первую очередь, от Йеллоустоунской кальдеры, в которой расположен одноименный национальный парк, на северо-западе США. Размер кальдеры Йеллоустоун – около 55×72 км, был определен в 1960-70-х гг. геологическими исследованиями Боба Кристиансена из Геологической Службы США. Разглядеть кальдеру таких размеров можно лишь со спутника. Йеллоустоунский вулкан располагается не на границе тектонических плит (как вулкан Тоба), а посередине Североамериканской плиты, над практически не изученной «горячей точкой». В настоящее время Йеллоустонская горячая точка перекрыта Йеллоустоунским плато. Североамериканская плита движется в направлении запад-юго-запад над неподвижным «дном» горячей точки. За последние примерно 17 миллионов лет из Йеллоустоунской горячей точки произошло более 140 извержений, формировавших кальдеру. Как минимум около десятка таких извержений классифицируются как суперизвержения [5-7].

Профессоры Роберт Смит и Майкл Жданов из Университета Юты, проследив за распространением сейсмических волн от недавних мощных землетрясений, определили, что магматический очаг Йеллоустона тянется на 240 км в одну сторону и почти на 700 км – в другую. Измерив электрическую проводимость недр, ученые уточнили трехмерную картину. Оказалось, что магма уходит в глубину не столь круто, как предполагалось ранее: под углом менее 40 градусов, а не 60. Верхняя зона этого слоя, имеющего общую толщину более 100 километров, располагается довольно близко к поверхности.

В настоящее время тепловой поток в Йеллоустоунской кальдере в 30-40 раз превышает таковой на остальной территории США, и, по всей видимости, если бы не было подпитки магмой, вся система начала бы остывать со времени последнего извержения, а этого не происходит. С 1923 по 1984 гг. центральная часть кальдеры приподнялась на 86 см (со средней скоростью 23 мм в год). С 1985 по 1995 гг. эта скорость уменьшилась до 14 мм/год, затем до 5-9 мм/год. С 2004 по 2007 гг. она вновь возросла до 60 мм/год.

Тысячи слабых землетрясений регистрируются в Йеллоустоуне ежегодно. Глубина их гипоцентров составляет 15-20 км за пределами кальдеры и 3-5 км – внутри кальдеры. В 1959 г. произошло крупнейшее в западной континентальной части США землетрясение с магнитудой 7.5, а в 1975 г. – еще одно с магнитудой 6.1. С 1989 г. по настоящее время в пределах кальдеры регистрируются землетрясения с магнитудами до 2.7, причем в январе 2010 г. было зарегистрировано 250 землетрясений всего за два дня. 22 августа 2018 г. в северном секторе кальдеры внезапно ожил гейзер «Steamboat», не извергавшийся более трех лет.

Для того чтобы распознать предвестники извержения Йеллоустона, уже давно проявляющего признаки активизации, в 2001 г. Геологическая служба США создала на базе сотрудников Йеллоустоунского парка и Университета штата Юта, Йеллоустоунскую вулканологическую обсерваторию (YVO), которая разработала 40-летнюю программу геологического мониторинга, включающего: анализ грунтовых вод, сейсмический, деформационный и GPS мониторинг. Вопросы два:

1. Возможно ли вообще в Йеллоустоуне суперизвержение?
2. Когда произойдет следующее катастрофическое извержение Йеллоустоуна?

Геологи отталкиваются от эмпирического правила, основанного на статистических оценках: чем длиннее период покоя вулкана, тем более мощным может быть его извержение. Поскольку Йеллоустоунский вулкан извергался с определенной периодичностью: 2.1 млн лет назад, 1.2 млн лет назад и 640 000 лет назад, то Геологическая служба США ожидает следующее извержение не ранее чем через 40-70 тыс. лет. Но в 1999 г. британский геолог, профессор Мак-Гир подготовил для правительства Великобритании специальный доклад, в котором заявил, что, по его расчетам, Йеллоустоун взорвется в 2074 году. По одному из сценариев компьютерного моделирования извержение ожидалось до 2016 года.

Специалисты озабочены возможностью активизации супервулкана, которая может привести к грандиозным разрушительным последствиям для всего Североамериканского континента.

Предлагается примерный сценарий извержения. За несколько дней до взрыва земная кора поднимется над вулканом на несколько десятков метров. По периметру супервулкана возникнут многочисленные кольцевые трещины и жерла. Затем произойдет выброс огромного количества магмы и вулканического пепла, который поднимется на высоту до 50 км. По подсчетам геологов, этого хватит, чтобы покрыть всю территорию США слоем порядка 15 см. Реальная толщина пеплового слоя будет уменьшаться по мере удаления от центра извержения и, например, в районе столицы США г. Вашингтон составит всего 1-3 см.

В первые часы разрушению будет подвергнута площадь в радиусе 1000 км. По территории 10 000 км² пройдет пирокластическая волна.

По худшему из возможных сценариев, 100-километровая зона вокруг кальдеры будет выжжена пирокластическими потоками в течение нескольких минут. Миллионы тонн вулканической породы, поднятой взрывом на десятки километров, начнут оседать на колоссальной площади, убивая все живое. Там, где толщина слоя выпавшего пепла составит более 30 сантиметров, в случае дождя и увлажнения пепла, у 90 % зданий произойдет обрушение кровли.

Пепел толщиной 5-10 см покрывает основные пахотные земли и луга, на которых ничего нельзя будет выращивать несколько десятков лет. Даже там, где слой пепла будет незначительным (1-2 сантиметра), этого будет достаточно, чтобы закрыть аэропорты. Поэтому можно предположить транспортный коллапс и полную потерю авиасообщения [2].

По расчетам нейросуперкомпьютера «HAZUS-4», от вулканического пепла могут погибнуть около полумиллиона человек. На то, чтобы пересечь Атлантику, пепловой туче потребуется менее недели, и постепенно пепел закроет Солнце по всему Северному полушарию [11].

При извержении будет выбрасываться диоксид серы, который образует аэрозоли серной кислоты в стратосфере. Эти аэрозоли образуют завесу, которая будет отражать солнечный свет, и от этого температура на Земле понизится в среднем на 3-5 градусов. Через три недели после начала Йеллоустоунского извержения аэрозоли образуют над земной поверхностью экран, который может стать причиной глобального похолодания. То есть большая часть планеты будет покрыта снегом почти круглый год. И так минимум 3-4 года. Впрочем, по данным Геологической службы США, содержание серы в магме под Йеллоустоуном гораздо ниже, чем при извержениях вулканов Эль Чичон в 1984 г. и Пинатубо в 1991 г., поэтому влияние извержения на климат может быть существенно слабее, чем в предлагаемом сценарии.

К настоящему времени технически возможного решения проблемы прогноза извержений супервулканов не существует. Предотвратить подобное извержение ни США, ни человечество в целом не в силах. По словам Дэна Дзурисина (Геологическая служба США), «история изменений Йеллоустона стала более запутанной ввиду появления лучших технологий для ее изучения».

«Пусть и очень редкие, но эти события неизбежны. В будущем люди непременно столкнутся с ними и должны будут справляться с последствиями суперизвержения» (Стивен Спаркс, веб-сайт «Live Science», 2005).

Список литературы

1. Карпов Г.А., Кирьянов В.Ю. Вулканизм и цивилизация. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2020. 375 с.
2. Карпов Г.А., Кирьянов В.Ю. Дремлющие драконы // Вокруг Света. 2023. № 3. С. 84-91.
3. Кирьянов В.Ю. Современный вулканизм. Санкт-Петербург: Литера Скрипта, 2009. 331 с.
4. Мелекесцев И.В. Вулканизм как возможная причина оледенения. В сб. Вулканы и извержения. М.: Наука, 1969. С. 140-149.
5. Савино Д., Джонс М.Д. Супервулкан. Катастрофа, изменившая мир. М.: Рипол Классик, 2009. 316 с.
6. Уолтхэм Т. Катастрофы: неистовая Земля. Л.: Недра, 1982. 223 с.
7. Britt R. Supervolcano will challenge civilization // Geologists Warn, Live Science. 2010
8. Froggatt P.C., Nelson C.S., Carter L. et al. An exceptionally large late Quaternary eruption from New Zealand // Nature. 1986. V. 319. P. 578-582.
9. Kirianov V.Yu. Environmental impacts of volcanic eruptions // Encyclopedia of Life Support Systems (EOLLS), Natural and Human Induced Hazards, 2003. 12 p.
10. Rampino M.R., Self S. Climate-volcanic feedback and the Toba eruption of 74 000 years ago // Quaternary Research. 1994. V. 40. № 3. P. 269-280. <https://doi.org/10.1006/qres.1993.1081>
11. Rampino M.R. Super-volcanism and other geophysical processes of catastrophic import. In: Global Catastrophic Risks. Eds.: N. Bostrom, M.M. Cirkovic. Oxford University Press, 2008. P. 205-221. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198570509.003.0015>
12. Wilson C.J.N. The 26.5 ka Oruanui Eruption, Taupo Volcano, New Zealand: Development, Characteristics and Evacuation of a Large Rhyolitic Magma Body // Journal of Petrology. 2006. V. 47. № 1. P. 35-69. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi066>

Магматическая активность Ключевского вулкана, предшествующая извержениям вулкана Безымянный

Кириухин А.В., Бергаль-Кувикас О.В., Лемзиков М.В.

Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano preceding the eruptions of Bezymianny volcano

Kiryukhin A.V., Bergal-Kuvikas O.V., Lemzikov M.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: AVKiryukhin2@mail.ru

Frac-Digger метод применен для выявления трехмерного распределения и хронологии инъекций даек и силлов из магматических резервуаров Ключевского вулкана, предшествующих извержениям вулкана Безымянный в период с 2000 по 2020 гг. Показана система магматического питания вулкана Безымянный за счет вулкана Ключевской.

Введение

Ключевская группа вулканов (КГВ) включает действующие вулканы Ключевской, Крестовский, Ушковский, Безымянный и Плоский Толбачик; в 80 км к северо-востоку от Ключевского вулкана находится действующий вулкан Шивелуч. Гигантский стратовулкан Ключевской (возраст менее 7 тыс. лет) является самым продуктивным. Он извергает в среднем 60 млн тонн базальтов в год, или 1/4 от общего годового объема магмы всех 70 вулканов Курило-Камчатского вулканического пояса [11]. Стратовулкан Безымянный расположен всего в 10 км к югу от вулкана Ключевской. Вулкан Безымянный стал известен с 1956 года, когда после 2.5 тысяч лет относительного покоя он внезапно обрушился и выбросил 3 км³ пирокластических потоков [16]. С тех пор продолжается его бурная деятельность в виде частых эпизодических пирокластических извержений (не менее 44 значительных извержений с 1955 года) и куполообразования [16].

Теория проточных магматических камер для КГВ представлена в [11]. Она предполагает наличие нескольких магматических камер, размеры которых меняются в зависимости от температуры поступающей и выходящей магмы, возраста существования и интенсивности теплообмена с вмещающими породами. Предполагается стабильное существование под действующими вулканами однородных магматических камер эллипсоидной формы. Эта концепция согласуется с геофизическими моделями системы магматического питания КГВ [12], где предполагается наличие стабильных коровых магматических камер под Ключевским вулканом на глубинах от 0 км до 3 км и от 33 км до 25 км (общий объем 750 км³) и под Безымянным вулканом на глубинах от 7 км до 20 км (объем 100 км³).

В последние годы проблемы динамики магматических систем Ключевского вулкана были исследованы с помощью методов сейсмической томографии [23, 24]. В работе [1] метод сейсмотомографии применяется с расстановкой большого количества сейсмоприемников. В результате в диапазоне глубин до 150 км под Северной группой вулканов выявлены зоны насыщения земной коры магматическим расплавом.

В обобщающей работе [8, 9] отмечается в некоторых случаях синхронизация извержений Северной группы вулканов (Шивелуча, Ключевского, Безымянного): «Три вулкана часто работали в сближенных временных интервалах в течение одного года. Например, высокая активность вулканов Шивелуч, Ключевской и Безымянный регистрировалась в 2005, 2010 и 2017 гг. В 2005 г. 11 января наблюдалось извержение Безымянного, 15 января началось извержение Ключевского, продолжавшееся в течение трех месяцев, ... 30 ноября были отмечены извержения Безымянного. В 2010 г. на фоне извергавшегося с 16 сентября 2009 г. по 12 декабря 2010 г. Ключевского, произошло два мощных извержения – Безымянного 31 мая и Шивелуча 27 октября. В июне 2017 г.

на фоне эруптивной деятельности вулкана Ключевской произошло ... пароксизмальное извержение Безымянного 16 июня».

Статистический анализ извержений вулкана Безымянный в 2015-2020 гг. позволил предложить методику краткосрочного прогноза его извержений по сейсмическим данным (функция сейсмической энергии, выделившейся за 5 суток) [10].

Применение геохимических методов для магматических систем вулканов Ключевской и Безымянный позволило выявить концентрацию H_2O в родительских магмах вулкана Ключевской на уровне 3.5 масс. %, диапазон измеренных содержаний CO_2 варьирует от 0.01 до 0.13 масс. % [7]. Продукты извержения вулкана Ключевской характеризуются значительным разнообразием состава (52.0-55.5 масс. % SiO_2) и подразделяются на высокомагнезиальные базальтовые андезиты и глиноземистые андезиты. Высокомагнезиальные базальтовые андезиты с более низким содержанием К и более высоким содержанием Mg (>9 масс. % MgO) имеют петрологические характеристики, указывающие на то, что они могут быть первичными или близкими к первичным мантийными магмами [14]. Для определения времени пребывания свежих порций магмы, поступающих в неглубокую магматическую камеру вулкана Безымянный, была использована диффузионная хронометрия. Для шести извержений 2006-2012 гг. диапазон времени пребывания в камере составил от 2 месяцев до 3 лет до извержения [15].

В данной работе для выявления инъекций даек и силлов под вулканом Ключевской по сейсмическим данным [13, 25] применяется Frac-Digger метод [6]. Суть этого метода заключается в выявлении плоско-ориентированных кластеров гипоцентров землетрясений в заданном интервале времени. Выявленные объекты рассматриваются как инъекции магмы в форме даек или силлов. Описание и обоснование применимости метода изложено в монографии [2], а также в публикациях по его практическому применению для изучения вулканов Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Мутновский, Корякский и Авачинский [3-5, 19-22]. Полученная с использованием Frac-Digger метода динамическая 3D картина магматической деятельности позволяет ясно представить пути транспорта и аккумуляции магмы в фундаменте вулканов. Задачей данного исследования является выявление гидродинамического взаимодействия близрасположенных вулканов Ключевской и Безымянный, с учетом данных об общности их магматического питания [1].

Полученные результаты

Выявлена магматическая активность под вулканами Ключевской и Безымянный в период с 2000 по 2020 гг. по сейсмогенным инъекциям магмы в виде даек и силлов. 3D-анализ последовательностей даек и силлов, предшествующих 17 извержениям вулкана Безымянный, показывает, что большинство извержений (10 из 17) инициированы дайками, инжектированными из глубинной магматической камеры Ключевского вулкана (K2, расположенной на интервале глубин от -31 до -27 км) в малоглубинную магматическую камеру Безымянного вулкана (B1, в интервале глубин от -3 до +2 км). В некоторых случаях извержениям вулкана Безымянный предшествовали дайки (4 из 17) или силлы (3 из 17), инжектированные из малоглубинной магматической камеры вулкана Ключевской (K1, расположенной на глубине от -1 до +2 км) (рисунок).

Двумерные численные модели распределения напряжений в условиях наклонного залегания слоев [18] указывают на возможность питания вулкана Безымянный за счет крутопадающих даек из глубинного магматического резервуара Ключевского вулкана K2, а также механизма дебондинга Кука-Гордона [17], открывающего слабый контакт на небольшой глубине для формирования силлов между малоглубинными магматическими резервуарами вулканов Ключевской K1 и Безымянный B1.

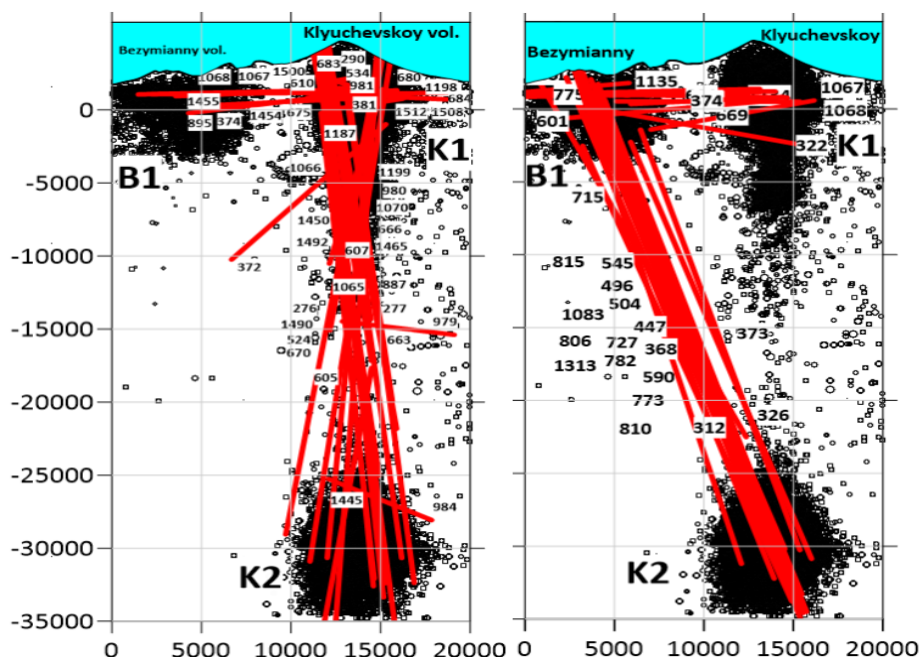


Рисунок. Магматическая активность, предшествующая извержениям вулкана Ключевской в 2003-2021 гг. (слева) и вулкана Безымянный в 2000-2020 гг. (справа). Красные линии – трассы сейсмогенных разрывов (дайки и силлы). Кружками обозначены проекции гипоцентров микроземлетрясений на плоскость разреза.

Геохимические характеристики продуктов извержений вулканов Безымянный и Ключевской свидетельствуют об общем источнике магм. Химическая история продуктов извержений этих двух вулканов показывает родительские свойства магмы вулкана Ключевской для продуктов вулкана Безымянный с некоторыми отклонениями в макрокомпонентах, которые могут быть объяснены с точки зрения химико-механических взаимодействий в магмоводах.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда «Исследования магмо-газо-водопроводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127 (<https://rscf.ru/project/23-27-00127/>).

Список литературы

1. Гордеев Е.И., Кулаков И.Ю., Шапиро Н.М. Система магматического питания Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2020. Т. 493. № 2. С. 68-73.
2. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем // Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
3. Кирюхин А.В., Бергаль-Кувикас О.В., Лемзиков М.В., Журавлев Н.Б. Магматическая система Ключевского вулкана по сейсмическим данным и их геомеханической интерпретации // Записки Горного института. 2023. № 263. С. 698-714.
4. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Геомеханическая интерпретация локальной сейсмичности, связанной с извержениями и активизацией вулканов Толбачик, Корякский и Авачинский, Камчатка, 2008-2012 гг. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 5. С. 3-20.
5. Кирюхин А.В., Федотов С.А., Кирюхин П.А. Магматические системы и условия глубинной гидротермальной циркуляции Ключевской группы вулканов по данным локальной сейсмичности и термогидродинамического моделирования // Вулканология и сейсмология. 2018. № 4. С. 3-14.

6. *Кирюхин П.А., Кирюхин А.В.* Frac-Digger. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016612168 от 21.06.2016.
7. *Мионов Н.Л., Портнягин М.В.* Содержание H₂O и CO₂ в магмах источника Ключевского вулкана по данным изучения расплавных и флюидных включений в оливине // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 11. С. 1718-1735.
8. *Озеров А.Ю.* Ключевской вулкан: вещество, динамика, модель. М.: Геос, 2019. 306 с.
9. *Озеров А.Ю., Гирина О.А., Жаринов Н.А. и др.* Извержения в Северной группе вулканов, на Камчатке, в начале XXI века // Вулканология и сейсмология. 2020. Т. 14. С. 1-17.
10. *Салтыков В.А.* Прогнозирование извержений вулкана Безымянный (Камчатка) 2015–2020 гг.: результаты использования методики на основе СОУС'09, верификация параметров // Вулканология и сейсмология. 2022. № 6. С. 76-86.
11. *Федотов С.А.* Магматические питающие системы и механизм извержений вулканов. М.: Наука, 2006. 456 с.
12. *Федотов С.А., Жаринов Н.А., Гонтовая Л.И.* Магматическая питающая система Ключевской группы вулканов (Камчатка) по данным об ее извержениях, землетрясениях и глубинном строении // Вулканология и сейсмология. 2010. № 1. С. 3-35.
13. *Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А. и др.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66-91.
14. *Bergal-Kuvikas O., Nakagawa M., Kuritani T. et al.* A petrological and geochemical study on time-series samples from Klyuchevskoy volcano, Kamchatka arc // Contributions to Mineralogy and Petrology. 2017. V. 172. № 5. P. 1-16.
15. *Davydova V.O., Shcherbakov V.D., Plechov P.Y., Perepelov A.B.* Petrology of mafic enclaves in the 2006–2012 eruptive products of Bezymianny Volcano, Kamchatka // Petrology. 2017. V. 25. № 6. P. 592-614.
16. *Girina O.A.* Chronology of Bezymianny Volcano activity, 1956-2010 // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. № 263. P. 22-41.
17. *Gudmundsson A.* Deflection of dykes into sills at discontinuities and magma-chamber formation // Tectonophysics. 2011. № 500. P. 50-64.
18. *Gudmundsson A.* How local stresses control magma-chamber ruptures, dyke injections, and eruptions in composite volcanoes // Earth-Sci. Reviews. 2006. № 79. P. 1-31.
19. *Kiryukhin A.V., Bergal-Kuvikas O.V., Lemzikov M.V.* Magmatic activity of Klyuchevskoy volcano triggering eruptions of Bezymianny volcano based on seismological and petrological data // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2023. V. 442. Art. 107892.
20. *Kiryukhin A., Chernykh E., Polyakov A., Solomatin A.* Magma Fracking Beneath Active Volcanoes Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity Observations // Geosciences. 2020. V. 10. P. 52.
21. *Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P., Voronin P.* Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2017. V. 2017. Art. 4279652.
22. *Kiryukhin A.V., Polyakov A.Y., Voronin P.O. et al.* Magma Fracking and Production Reservoirs Beneath and Adjacent to Mutnovsky Volcano Based on Seismic Data and Hydrothermal Activity // Geothermics. 2022. V. 105. Art. 102474.
23. *Koulakov I., Abkadyrov I., Al Arifi N. et al.* Three different types of plumbing system beneath the neighboring active volcanoes of Tolbachik, Bezymianny, and Klyuchevskoy in Kamchatka // Journal of Geophysical Research: Solid Earth. 2017. V. 122. P. 3852-3874.
24. *Koulakov I., Gordeev E.I., Dobretsov N.L. et al.* Rapid changes in magma storage beneath the Klyuchevskoy group of volcanoes inferred from time-dependent seismic tomography // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 75-91.
25. *Senyukov S.L.* Prediction of eruptions of volcanoes Klyuchevskoy and Bezymianny in Kamchatka. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 144 p.

Микровключения металлов, сплавов и минералов в андезито-дацитах вулкана Бакенинг (Камчатка)

Кожемяко Н.В., Кеpezжинская П.К., Бердников Н.В.

Microinclusions of metals, alloys and minerals in andesites and dacites of the Bakening Volcano (Kamchatka)

Kozhemyako N.V., Kepezhinskas P.K., Berdnikov N.V.

Институт тектоники и геофизики ДВО РАН, г. Хабаровск;

e-mail: nadezdavitman78925@gmail.com

В работе приводятся новые данные о составе микровключений самородных металлов (Bi, Cu, Co-W), сплавов Cu-Ag-Au и Cu-Sn, хлоридов и сульфидов Ag и Cu, халькопирита, пирротина, пирита и барита в фенокристах и кислом стекле андезито-дацитов вулкана Бакенинг. Предполагается, что в их образовании участвовал богатый Cl и S субдукционный флюид.

Вулкан Бакенинг находится в тыловой зоне активного вулканического фронта Восточной Камчатки, примерно в 125 км от фронтальной группы активных вулканов Корякского и Авачинского. Собственно плейстоцен-голоценовый лавовый конус вулкана сложен амфибол-плагиоклаз-порфиrowыми кремнекислыми андезитами и дацитами и покоится на миоценовом (13.95 млн лет) дислоцированном вулканогенно-осадочном разрезе (в основном плагиоклаз-двупироксеновые андезито-базальты, андезиты и дациты), в свою очередь перекрытом плиоценовыми (3.05 млн лет) субгоризонтальными потоками оливин-двупироксеновых базальтов и андезитов [12]. В составе плиоценового комплекса также выделяется небольшая лавовая постройка оливин-клинопироксен-плагиоклазовых щелочных базальтов с K-Ag возрастом 2.66 млн лет, содержащих обильные ксенолиты шпинелевых верлитов, клинопироксенитов, вебстеритов, реже дунитов. Рядом со стратовулканом Бакенинг находится позднеплейстоценовый (0.16 млн лет [12]) или раннеголоценовый [1] вулкан Ново-Бакенинг, сложенный плагиоклаз-роговообманковыми андезитами и дацитами [9, 12]. Оба андезито-дацитовых вулкана окружены многочисленными средне-кислыми экструзиями и шлаковыми конусами оливин-плагиоклазовых и пироксен-плагиоклазовых базальтов, наиболее молодые из которых (группа конусов Костакан) имеют возраст 500-600 лет [2].

Андезито-дацитовые лавы вулкана Бакенинг характеризуются порфиrowыми структурами, представленными вкрапленниками плагиоклаза и интенсивно опацизированной роговой обманки, содержащими обильные включения титаномагнетита и погруженными в трахитовый матрикс, сложенный дацитовым стеклом и микролитами плагиоклаза, биотита и ванадий-содержащего (до 2 вес. % V_2O_5) титаномагнетита. В составе микрофенокристов присутствует биотит, калий-натровый полевой шпат и кварц. Амфиболы ряда эденитовой и паргаситовой роговых обманок характеризуются варьирующей магнезиальностью. Давление их кристаллизации, рассчитанное по амфиболовому геобарометру [14], соответствует глубинам около 15 км. Вкрапленники плагиоклаза часто зональны, образуют гломеропорфиrowые срастания и варьируют по составу от практически чистого анортита ($An_{>90}$; ядра более крупных зональных фенокристов или мегакристов) до битовнита-андезина-олигоклаза (An_{30-80} ; более мелкие вкрапленники и внешние зоны зональных фенокристаллов). Среди Fe-Ti окислов присутствуют микровкрапленники и микролиты ильменита. Микрофенокристы ильменита характеризуются повышенным содержанием гейкелитового компонента (до 3-4 вес. % MgO), что может свидетельствовать об относительно восстановительных условиях их кристаллизации [10], в то время как микролиты ильменита обеднены MgO и обогащены MnO, что характерно для известково-щелочных вулканических серий [5]. Геохимически андезито-дациты вулкана Бакенинг отвечают кислым дериватам типичных островодужных магм [9], обнаруживающим повышенные отношения Sr/Y (>30), свойственные адакитам [12].

Микровключения металлов размером до 5 микрон и минералов халькофильных и сидерофильных элементов размером от 2 до 15 микрон характеризуются неправильными изометричными или слегка вытянутыми овальными очертаниями (рисунок). Наиболее разнообразные ассоциации микровключений наблюдаются в плагиоклазе и кислом дифференцированном стекле основной массы. Вкрапленники и микрофенокристы плагиоклаза содержат микровключения самородной меди, окиси висмута и Ti-Co-вольфрама, сплавов системы Cu-Ag-Au, нестехометрических хлоридов серебра и сульфидов системы Cu-Ag-S, барита и Cu-содержащего пирротина. Последний также содержится в титаномagnetите.

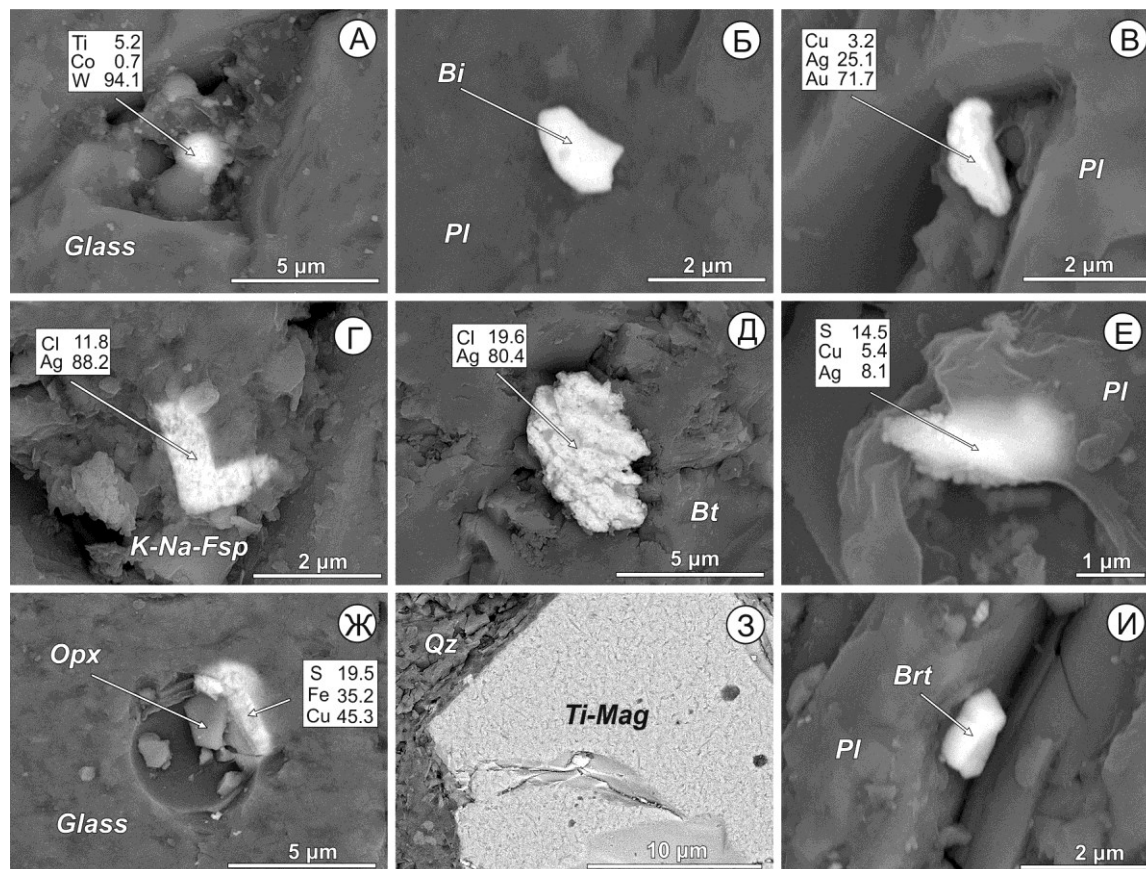


Рисунок. Микровключения самородных металлов и сплавов (а-в), сульфидов Ag и Cu (г-е), сульфидов и сульфатов (ж-и): а – Ti-Co-W в кремнекислом стекле; б – самородный висмут в плагиоклазе; в – сплав Cu-Ag-Au в плагиоклазе; г – хлорид Ag в K-Na полевоом шпате; д – хлорид Ag в биотите; е – медистый акантит в плагиоклазе; ж – халькопирит и ортопироксен в кремнекислом стекле; з – титаномagnetит (Ti-Mag) в кварце; и – микровключение барита (Brt) в плагиоклазе. Pl – плагиоклаз, Орх – ортопироксен, K-Na-Fsp – K-Na полевой шпат, Bt – биотит; Qz – кварц, Glass – стекло.

В кислом стекле встречаются микровключения титаномagnetита (иногда с сульфидами меди), пирита, касситерита (в ассоциации с кристаллитами кварца), рутила, Ст-Fe шпинели, сплавов Cu-Sn, а также нестехиометрических соединений меди, серебра, серы и хлора. Присутствуют единичные композитные включения ильменита и magnetита с хлорapatитом. В ассоциации с K-Na полевым шпатом в стекловатой основной массе диагностированы выделения сплава Cu-Ag, хлорида серебра, халькопирита, пирротина и magnetита. Вкрапленники амфибола содержат микровключения хлорида серебра, единичное зерно кварца – хлорид меди и серебра, а биотит – сплав Cu-Sn и хлорид серебра.

В целом, ассоциации микровключений металлов, сплавов и минералов в андезито-дацитах вулкана Бакенинг отражают физико-химические условия эволюции известково-щелочных андезитовых расплавов, в частности, участие обогащенных серой

и хлором водных флюидов в процессах фракционирования в относительно малоглубинных промежуточных магматических очагах под вулканическим центром Бакенинг. Важная роль промежуточных коровых очагов дифференциации в эволюции андезитовых магм Камчатки отмечалась неоднократно [3, 4], а присутствие таких очагов под относительно близкой (расстояние чуть более сотни км) Авачинско-Корякской группой вулканов надежно установлено по данным сейсмической томографии [7]. Присутствие хлоридов серебра среди микровключений в лавах Бакенинга свидетельствует в пользу интенсивного массопереноса благородных металлов обогащенными хлором флюидонасыщенными андезитовыми расплавами. Экспериментальные данные и теоретические построения показывают, что повышенные концентрации хлора в субдукционном флюиде резко повышают растворимость в нем металлов с низким (щелочные металлы) или высоким (Sb, Bi, Cu и благородные металлы – Ag, Au, Pt, Pd) потенциалом ионизации, оставляя элементы с промежуточным потенциалом (высокозарядные литофилы) относительно слабо мобильными [8]. Например, в бессолево-водном флюиде коэффициент распределения меди между флюидом и твердой фазой ($D^{\text{fluid/solid}}$) меньше единицы. При солёности водного флюида 10 вес. % NaCl, $D^{\text{fluid/solid}}$ возрастает до 10, вызывая существенное обогащение гидротермального субдукционного флюида медью [13]. Абсолютно такое же поведение обнаруживает и серебро, чья растворимость увеличивается экспоненциально с ростом содержания хлора в высокотемпературном магматическом флюиде [15]. Именно об этом может свидетельствовать присутствие среди микровключений в андезито-дацитах Бакенинга сплавов меди с оловом и серебром, медь-содержащих хлоридов серебра, самородного висмута и меди, а также кобальт-содержащего вольфрама. Все эти металлы достаточно высоко мобильны при повышенных концентрациях хлора в субдукционном флюиде [13]. Вольфрам в отсутствие стабильного рутила выделяется в самородном виде.

Мобильность рудных элементов в андезитовом расплаве вулкана Бакенинг может увеличиваться и за счет повышенного содержания в нем серы, фиксирующегося присутствием микровключений сульфидов (халькопирит, пирротин, пирит, сульфиды меди и серебра), и барита. Большинство халькофильных и сидерофильных элементов накапливается в остаточном расплаве при высокой активности серы, обогащая при этом среднекислые магмы в процессе их кристаллизации в промежуточных очагах под вулканами современных островных дуг [6]. При этом микровключения пирротина и халькопирита в полево-шпате, возможно, отражают несколько более восстановленные условия [11] на ранних этапах эволюции магмы вулкана Бакенинг, в то время как присутствие барита в кислом стекле может свидетельствовать о повышении потенциала серы и кислорода на заключительных этапах ее дифференциации.

Исследование осуществлено в рамках Госзадания ИТиГ ДВО РАН, при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-17-00023 (<https://rscf.ru/project/22-17-00023/>), с использованием научного оборудования Хабаровского инновационно-аналитического центра ИТиГ ДВО РАН.

Список литературы

1. *Брайцева О.А., Певзнер М.М.* О возрасте вулкана Ново-Бакенинг (Камчатка) и тефростратиграфии этого района // Вулканология и сейсмология. 2000. № 6. С. 3-12.
2. *Дирксен О.В., Мелекесцев И.В.* Хронология, динамика формирования и морфология эруптивных центров голоценового этапа ареального вулканизма бассейна р. Авача (Камчатка, Россия) // Вулканология и сейсмология. 1999. № 1. С. 3-19.
3. *Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д.* Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика. 2012. Т. 53. № 12. С. 1633-1661.
4. *Иванов Б.В., Кадик А.А., Максимов А.П.* Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов (на примере Ключевской группы вулканов). Москва: Наука, 1986. 161 с.

5. Кеpezжинская П.К. Кайнозойские вулканические серии обрамления окраинных морей. Москва: Наука, 1990. 176 с.
6. Agangi A., Reddy S.M. Open-system behaviour of magmatic fluid phase and transport of copper in arc magmas at Krakatau and Batur volcanoes, Indonesia // Journal of volcanology and geothermal research. 2016. V. 327. P. 669-686.
7. Bushenkova N., Koulakov I., Senyukov S. et al. Tomographic images of magma chambers beneath the Avacha and Koryaksky volcanoes in Kamchatka // Journal of geophysical research solid earth. 2019. V. 124. P. 9694-9713.
8. Castillo P.R. Arc magmatism and porphyry-type ore deposition are primarily controlled by chlorine from seawater // Chemical geology. 2022. V. 589. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2021.120683>
9. Dorendorf F., Churikova T., Koloskov A., Wörner G. Late Pleistocene to Holocene activity at Bakening volcano and surrounding monogenetic centers: volcanic geology and geochemical evolution // Journal of volcanology and geothermal research. 2000. V. 104. P. 131-151.
10. Evans B.W., Scaillet B. The redox state of Pinatubo dacite and the ilmenite-hematite solvus // American Mineralogist. 1997. V. 82. P. 625-629.
11. Georgatou A., Chiaradia M., Kouzmanov K. T-P-fO₂ conditions of sulfide saturation in magmatic enclaves and their host lavas // Lithos. 2021. V. 398-399. <https://doi.org/10.106/j.lithos.2021.106313>
12. Kepezhinskas P., McDermott F., Defant M.J. et al. Trace element and Sr-Nd-Pb isotopic constraints on a three-component model of Kamchatka Arc petrogenesis // Geochimica et Cosmochimica Acta. 1997. V. 61. P. 577-600.
13. Liu S., Keppler H. The mobility of copper, zinc, molybdenum, and tungsten in subduction zone fluids // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2024. V. 365. P. 174-185.
14. Mutch E.J.F., Blundy J.D., Tattitch B.C. et al. An experimental study of amphibole stability in low-pressure granitic magmas and a revised Al-in-hornblende geobarometer // Contributions to mineralogy and petrology. 2016. V. 171. Art. 85. <https://doi.org/10.1007/s00410-016-1298-9>
15. Yin Y., Zajacz Z. The solubility of silver in magmatic fluids: implications for silver transfer to the magmatic-hydrothermal ore-forming environment // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2018. V. 238. P. 235-251.

Происхождение и алмазоносность кимберлитовых пород

Костровицкий С.И.^{1,2}

Origin and diamond potential of kimberlite rocks

Kostrovitsky S.I.

¹ *Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск;*

e-mail: serkost@jgc.irk.ru

² *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск*

Кимберлиты отличаются от всех вулканических пород своей гибридной природой, что затрудняет понимание их происхождения. В работе будут освещены 3 вопроса: 1) с чем связан разный состав кимберлитов из разных провинций, полей, отдельных кустов трубок; 2) какой был первичный состав кимберлитов; 3) основные закономерности проявления алмазоносности кимберлитов.

При разработке модели важное значение мы придали петрохимической классификации кимберлитов [3], а также выводу, принятому ведущими исследователями [6, 7] о существовании генетической связи кимберлитов с низко-Sr, высоко-Ti мегакристной ассоциацией минералов, которая кристаллизовалась в астеносферном расплаве. Согласно классификации, существуют 3 основных петрохимических типа: высоко-Mg, Mg-Fe и Fe-Ti. Далее, мы полагаем [3, 5, 9], что астеносферный источник расплава под Якутской кимберлитовой провинцией (ЯКП) был относительно однородный по Sr-Nd-Hf систематике, по содержанию, особенностям распределения некогерентных элементов.

Предполагается, что образование разных по составу кимберлитов было обусловлено процессом контаминации кимберлитовым расплавом при его восхождении через породы литосферной мантии (ЛМ), имеющие разный состав. Этот вывод был обоснован [7] построением графика (усредненное отношение Mg/Fe для кимберлитов из разных провинций и пород литосферной мантии под соответствующими провинциями), показавшего высокий уровень положительной корреляции. Причиной наличия корреляции явилось разное количество в ЛМ пород дунит-гарцбургитового парагенезиса, содержащих ортопироксен – минерал, наиболее подверженный процессу контаминации. Полностью соглашаясь с выводом авторов, мы, однако, полагаем, что он нуждается в уточнении тех генетических следствий, к каким ведет его принятие.

Следствие 1. Поскольку только процесс контаминации ведет к увеличению магнезиальности первичного кимберлитового расплава, изначально последний имел относительно высоко-Fe состав, вероятнее всего, близкий к составу наиболее железистого Fe-Ti петрохимического типа кимберлитов.

Следствие 2. Поскольку, по мнению авторов данного вывода [7], решающее значение для увеличения магнезиальности кимберлитового расплава имеет состав пород ЛМ, необходимо сравнить их состав под разными провинциями, под отдельными полями не только по Mg/Fe отношению (что было сделано авторами!), но и по другим оксидам и, в первую очередь, по содержанию TiO₂.

Следствие 3. Проведенные нами исследования [5, 9] состава ЛМ под южными алмазоносными и северными с убогой алмазоносностью полями ЯКП, контрастно отличающимися по составу кимберлитов (первые выполнены высоко-Mg и Mg-Fe петрохимическими типами, а вторые преимущественным образом выполнены Fe-Ti петрохимическим типом [1-3]), показали, что породы ЛМ под северными полями, в основном, являются более низко-Ti, чем под южными полями. А, следовательно, высоко-Ti состав кимберлитов из северных полей невозможно объяснить процессом контаминации породами ЛМ.

Мы полагаем, что различия в составе кимберлитовых пород непосредственно обусловлены не самим процессом контаминации, а интенсивностью его проявления (насколько значителен процент вовлекаемых в этот процесс высоко-Mg пород ЛМ).

Отсутствие в ЛМ под северными полями дунит-гарцбургитовых пород (за исключением Куойкского поля) сводит процесс контаминации чаще всего к нулю, и поэтому расплав, формирующий высоко-Fe, высоко-Ti кимберлитовые породы, по составу остается близким к первичному расплаву.

Согласно предложенной модели, формирование каждого из петрохимических типов кимберлитов было связано с составом первичного расплава, в котором при восхождении изменялось соотношение карбонатной и силикатной компонент астеносферного расплава. Предполагается, что астеносферный расплав в момент его активации, предшествующий началу кимберлитового вулканизма, оказался подверженным процессу дифференциации на фазы, характеризующиеся существенно карбонатным и карбонатно-силикатным составами. Различная дезинтегрирующая и проникающая способность этих фаз предопределила при их подъеме разный объем обломочного материала ЛМ, захваченного и частично ассимилированного кимберлитовым расплавом.

Кимберлит высоко-Mg типа образовался во время подъема астеносферного расплава существенно карбонатного состава, обладающего высокой дезинтегрирующей способностью, что привело к дроблению и последующему захвату максимального количества обломочного материала ЛМ. В формировании кимберлита Mg-Fe и Fe-Ti типов участвовал астеносферный расплав преимущественно силикатного состава, характеризующийся относительно низкой дезинтегрирующей способностью. Отметим, что силикатная часть расплава содержала, как правило, минералы низко-Sr мегакристной ассоциации.

Существенную роль в формировании разных типов кимберлитов сыграла мощность ЛМ под тем или иным полем. Максимальное число кимберлитовых тел, выполненных высоко-Mg типом кимберлита установлено в южных полях ЯКП, под которыми мощность ЛМ составляет 150-200 км. При этом самая максимальная мощность ЛМ отмечена [8] под Накынским полем, в котором были обнаружены кимберлитовые тела, выполненные только высоко-Mg типом кимберлита. И, напротив, под северными полями, которые характеризуются относительно низкой мощностью ЛМ (150-200 км [4]), доминирующее число кимберлитовых тел выполнено Fe-Ti типом.

Возвращаясь к вопросу о составе первичного кимберлитового расплава, отметим, что при изучении расположенных рядом двух кимберлитовых тел Куойкского поля (трубка Обнаженная и дайка Великан находятся всего в 1 км друг от друга), выяснилось, что они выполнены контрастными по текстуре и составу кимберлитами. Трубка Обнаженная выполнена пирокластическим брекчиевой текстуры кимберлитом высоко-Mg, низко-Ti состава, а дайка Великан – гипабиссальным кимберлитом массивной текстуры и относительно высоко-Fe, высоко-Ti состава. Если кимберлит из трубки Обнаженная характеризуется очень высокой насыщенностью обломочным материалом ЛМ (и ксеногенными макрокристаллами, и мантийными ксенолитами), то кимберлит дайки Великан совершенно лишен его, и это дало основание для вывода, что исходный кимберлитовый расплав для дайки Великан не был подвергнут процессу ассимиляции, и поэтому может рассматриваться как первичный. Его состав, усредненный по нашим неопубликованным и литературным данным [2] (в вес. %): SiO₂ – 21.8, TiO₂ – 3.5, Al₂O₃ – 4.0, FeO – 10.6, MnO – 0.19, MgO – 21.0, CaO – 17.2, Na₂O – 0.24, K₂O – 0.78, P₂O₅ – 0.99, CO₂ – 12.6.

Исследования проведены за счет гранта РФФИ № 22-77-10073 (<https://rscf.ru/project/22-77-10073/>). Автор признателен геологическому руководству АК АЛРОСА за многолетнее предоставление финансовой и технической помощи при проведении полевых работ, дирекции Института геохимии СО РАН, создавшей благоприятные условия для творческой работы. Все аналитические работы были проведены в ЦКП Института геохимии СО РАН.

Список литературы

1. *Бородин Л.С., Лапин А.В., Пятенко И.К.* Петрология и геохимия даек щелочно-ультраосновных пород и кимберлитов. М.: Недра, 1976. 244 с.
2. *Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францесон Е.В.* Геохимия кимберлитов. М.: Недра, 1978. 352 с.
3. *Костровицкий С.И., Морикио Т., Серов И.В. и др.* Изотопно-геохимическая систематика кимберлитов Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 3. С. 350-371.
4. *Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.V. et al.* The Siberian lithosphere traverse: mantle terranes and the assembly of the Siberian Craton // Tectonophysics. 1999. V. 310. № 1-4. P. 1-35. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00156-0)
5. *Kostrovitsky S.I., Tappe S., Yakovlev D.A. et al.* Lithospheric mantle heterogeneity beneath the Siberian craton: Evidence from garnet xenocryst database with implications for kimberlite compositions // Gondwana Research. 2024 V. 128. P. 298-314. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2023.10.021>
6. *Mitchell R.H.* Kimberlites: mineralogy, geochemistry, and petrology. New York. Plenum Press, 1986. 442 p.
7. *Pearson D.G., Woodhead J., Janney P.E.* Kimberlites as Geochemical Probes of Earth's Mantle // Elements. 2019. V. 15. № 6. P. 387-392. <https://doi.org/10.2138/gselements.15.6.387>
8. *Pokhilenko N.P., Agashev A.M., McDonald J.A. et al.* Kimberlites of the Nakyn field, Siberia, and the Snap lake/King lake dyke system, Slave craton, Canada: a new variety of kimberlite with a proposed ultradeep origin. // 8th IKC, Victoria, Canada. Extended Abstracts. 2003. V. 8. <https://doi.org/10.29173/ikc3102>
9. *Sun J., Liu C.-Z., Tappe S. et al.* Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: insights from in situ U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope analysis // Earth and Planetary Science Letters. 2014. V. 404. P. 283-295. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2014.07.039>

Фумаролы Корякского вулкана: состояние и состав газа в 2023 г.

Малик Н.А.

Activity and gas composition of Koryaksky volcano fumaroles in 2023

Malik N.A.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: malik@kscnet.ru

Представлено современное состояние фумарольных площадок Корякского вулкана на его северо-западном склоне в июле 2023 г., а также состав газа фумарол в сравнении с данными 1983 и 1994 гг. Обследование показало, что вулкан находится в стадии пониженной фумарольной активности.

Введение

Корякский вулкан относится к Авачинской группе, представленной рядом вулканов, вытянутым вкост Восточного вулканического пояса Камчатки. Корякский вулкан является стратовулканом, его высота 3456 м н.у.м., сложен породами от базальтов до андезитов [2]. В историческое время отмечены только его слабые фреатические извержения в 1926, 1956-1957, 2008-2009 гг. [3]. Вулкан расположен в 25-30 км от городов Петропавловск-Камчатский и Елизово.

Фумарольная активность Корякского вулкана до извержения 1956-1957 гг. была приурочена преимущественно к его кратеру (мульде). В результате фреатического извержения 1956-1957 гг. на северо-западном склоне вулкана образовалась радиальная трещина на высотах ~2700-3200 м н.у.м., с которой в последующие годы и до настоящего времени связана наиболее активная фумарольная деятельность, сконцентрированная в пределах 2-3 фумарольных площадок [1, 4]. К ним же были приурочены эруптивные жерла извержения 2008-2009 гг.; вынос пепла был связан преимущественно с верхним центром, из нижних происходила парогазовая эмиссия [3].

Представлены результаты обследования и опробования фумарол Корякского вулкана в июле 2023 г., дополненные наблюдениями на фумаролах и результатами аэрофотосъемок прошлых лет.

Описание фумарольных площадок

28 июля 2023 г. были проведены работы на фумаролах, расположенных на северо-западном склоне Корякского вулкана, на высоте около 2900-3000 м н.у.м. (<http://www.kscnet.ru/ivs/media/index.php?/category/181>). Заброска осуществлялась вертолетом на высоту 3000 м с высадкой на краю верхнего жерла извержения 2009 г. (рис. 1а). Размеры жерла в верхней части составляли около 10×15 м, глубже оно сужалось до ~2×4 м и прослеживалось вглубь более чем на 50 м (оценка по времени падения камней). Видимых признаков термальной активности ни в жерле, ни возле него обнаружено не было, запах газов не ощущался. Однако, тот факт, что жерло и канал не зполнились снегом и льдом, говорит о поступлении по нему тепла. В 100 м ниже, на высоте около 2900 м н.у.м., в овраге у гребня находилась единственная (как по наблюдениям с вертолета, так и в процессе наземного обследования) на этот момент фумарольная площадка, представлявшая собой малодобитные выходы газа температурой 94 °С, устья которых были инкрустированы серой (рис. 1б). Примерно в этом же месте, по данным GPS-навигатора и фотоснимкам, находилось нижнее эруптивное жерло в 2008-2009 гг. и основная фумарольная площадка в последующие годы, например, в 2014 г. Максимальная температура ее фумарол в 2014 г., по данным автора, составляла 317 °С (http://www.kscnet.ru/ivs/volcanoes/inform_messages/2014/AvachKor042014/index.html). Из фумаролы с напорным выходом газа были отобраны: 5 проб газа в ампулы Гиггенбаха и барботеры со щелочным поглотителем, пробы конденсата газа, пробы сухого газа (рис. 1б, таблица).



Рис. 1. Термопроявления Корякского вулкана 28.08.2023 г.: а – верхнее жерло извержения 2008-2009 гг., б – нижняя фумарольная площадка, отбор газа.

Описанные термопроявления находятся в пределах кулуара, ограниченного с двух сторон гребнями, прогретыми в пределах высот ~ 2800 - 3100 м н.у.м. Прогревы обнаруживаются по выходам пара с температурой 84 - 86 °С, весной – по проталинам. В кратере вулкана в апреле 2022 г. и июле 2023 г. термопроявлений отмечено не было.

Судя по температуре, площади фумарольных площадок и расходу газа, оцененному по высоте и площади проекции парогазовых струй, фумарольная активность вулкана значительно снизилась, как по сравнению с 1962-1963, 1983 и 1994 гг. [1, 4, 6], так и с 2014 г. (данные автора). Ослабление фумарольной активности было отмечено нами при восхождении к фумаролам еще в апреле 2022 г. Судя по фотоматериалам облетов прошлых лет, периоды пониженной фумарольной активности отмечались и ранее, например, в 1991, 2005, мае 2008 гг.

Состав газа фумарол

Пробы газа, отобранные в ампулы Гиггенбаха, содержали незначительное количество воздуха. Содержание кислорода (показатель загрязнения пробы воздухом) в непоглощенных щелочью газах составляло ~ 1.5 %, что в пересчете на общий состав газа равнялось 0.006 ммоль/моль. В пробах, отобранных в барботеры с резиновыми шлангами, эти показатели были больше: соответственно, 5 - 7 % и 0.03 - 0.05 ммоль/моль. Состав газа был скорректирован с учетом загрязнения воздухом. В таблице представлены среднее значение состава для 5 проб газа фумаролы Корякского вулкана, отобранного в июле 2023 г., и пределы вариаций концентраций компонентов, а также составы газа фумарол в 1983 и 1994 гг. Изменение состава газа Корякского вулкана во времени, а также сравнение с составами газов фумарол разной температуры Авачинского вулкана представлены на рис. 2. Концентрации компонентов в газе Корякского вулкана в 2023 г. находятся в пределах значений для проб 1983 и 1994 гг. (таблица, рис. 2), за исключением более низких содержаний HCl , HF и H_2 , что является следствием понижения температуры. В сравнении с низкотемпературными (93 °С) газами Авачинского вулкана, отобранными в северо-западной части кратерного гребня в 2015-2020 гг., газы Корякского вулкана содержат в 5 - 10 раз больше HCl и HF , в 2 раза больше CO_2 , в 2 - 5 раз меньше CH_4 (рис. 2).

Равновесная температура для состава газа 2023 г., рассчитанная по серному и углеродному геотермометрам [5], составила, соответственно, 410 и 450 °С. Для проб газа 1983 г. температуры химических и изотопных равновесий были оценены в диапазоне 500 - 540 °С [4].

Таблица. Химический состав фумарольных газов Корякского вулкана, ммоль/моль

№	1	2	3	4
Место	НФ	К1 – ВФ	К2 – ВФ	К3 – ВФ
Дата	29.08.2023	20.09.1994	20.09.1994	20.05.1983
T, °C	94	220	220	213
H ₂ O	955 ± 7	982.5	981.1	940.3
CO ₂	39 ± 7	13.5	13	49.7
H ₂ S	1.9 ± 0.1	0.71	1.9	1.8
SO ₂	2.2 ± 0.3	0.63	5	1.5
HCl	0.42 ± 0.09	1.1	1	0.8
HF	0.013 ± 0.006	0.04	0.03	0.03
CO	0.00088 ± 0.0002	0.0002	0.0007	н.п.о.
CH ₄	0.035	0.01	0.03	0.6
H ₂	0.1	0.21	0.36	0.73
N ₂	0.24	1.3	2	1.3
Ar	0.0003	0.014	0.011	0.01
He	0.000039	0.00002	0.00003	0.00018

Примечание. НФ – нижние фумаролы, ВФ – верхние фумаролы. Н.п.о. – ниже порога определения. Концентрации N₂, Ar и He скорректированы с учетом загрязнения воздухом. Пробы № 2-4 – по данным [6].

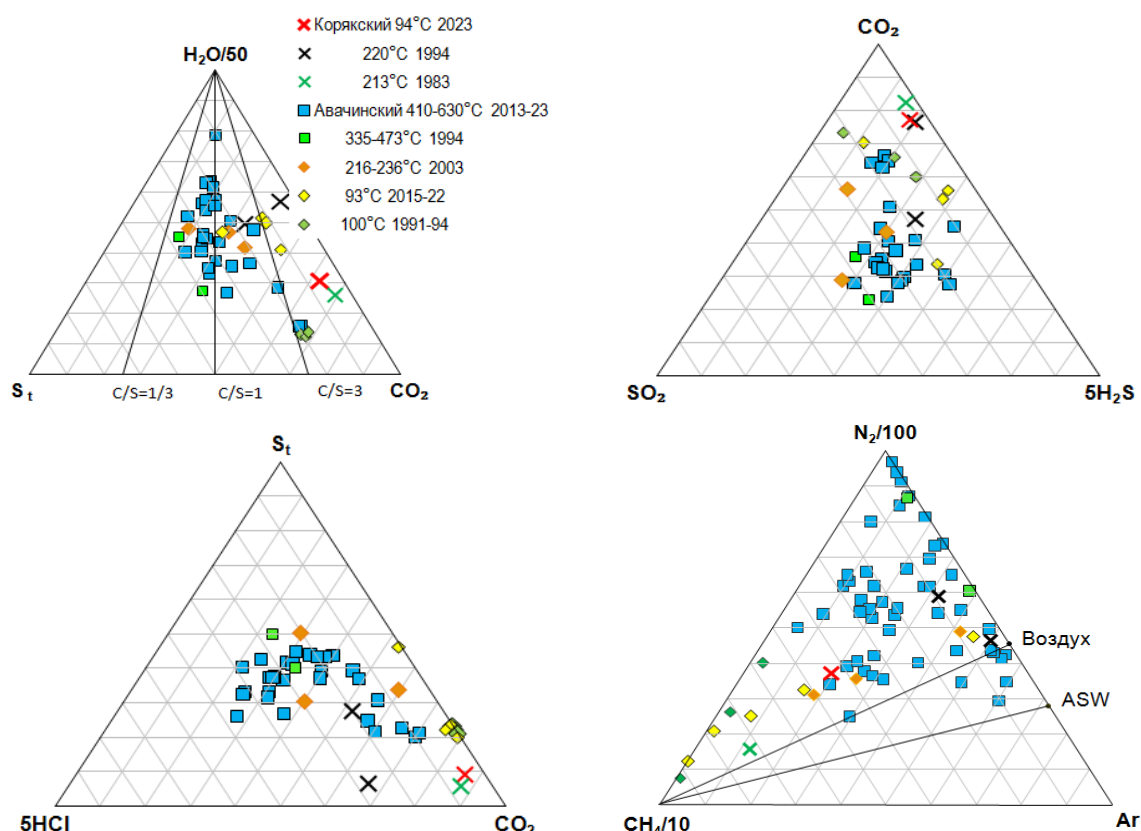


Рис. 2. Относительное содержание компонентов в газах вулканов Корякский и Авачинский. ASW – Air Saturated Water, метеорная вода, насыщенная воздухом. Данные для Корякского вулкана 1983 г. – из работы [4], 1994 г. - [6], Авачинского 1991-1994 гг. – [6], 2003 г. – отбор А.А. Овсянникова и С.В. Ушакова (неопубл.), остальные – данные автора.

Изотопный состав Н (δD) и О ($\delta^{18}O$) воды конденсата газа, отобранного в 2023 г., оказался легче, чем в пробах 1983 и 1994 гг. [6], т.е. ближе к составу метеорных вод, чего следовало ожидать из-за более низкой температуры фумарол. Несмотря на это, расчеты показали, что доля магматической воды в газе фумарол составляет около 60 %. Спустя 40 лет был определен изотопный состав углерода ($\delta^{13}C$) CO₂, который оказался

значительно тяжелее, чем проанализированный в 1983 г. [4], и соответствует изотопному составу углерода CO₂ высокотемпературных газов Авачинского вулкана и MORB. Впервые в истории изучения фумарол Корякского вулкана были получены данные об изотопном составе углерода ($\delta^{13}\text{C}$) метана, которые указывают на его abiогенный генезис. Это не подтверждает предположение, высказанное в [6] о возможном источнике повышенных концентраций метана в газе Корякского и Авачинского вулканов – минеральных метановых водах Авачинской депрессии, метан которых, судя по изотопному составу углерода, имеет термогенное происхождение [7].

Заключение

Вулкан Корякский находится в стадии пониженной фумарольной активности: малодобитные низкотемпературные (94 °C) струи газа имеются только на нижней фумарольной площадке, не считая прогретых (парящих) участков двух гребней, ограничивающих кулуар с фумарольными площадками.

Результаты анализа отобранных проб газа позволили сделать вывод, что состав газа вулкана за 30-40 лет существенно не изменился, за исключением снижения концентраций HCl, HF и H₂, увеличения доли метеорной воды, что связано со снижением температуры фумарол. Были получены данные по $\delta^{13}\text{C}$ -CO₂, существенно отличающиеся от предыдущих (1983 г. [4]), а также первые данные по $\delta^{13}\text{C}$ -CH₄, отвечающие abiогенному генезису метана, в фумарольном газе Корякского вулкана.

Исследование выполнено за счет средств гранта РФФИ № 23-27-00156 (<https://rscf.ru/project/23-27-00156/>). Автор выражает благодарность Е.О. Дубининой (ИГЕМ РАН) за определение изотопного состава воды конденсата газа, Б.Г. Покровскому (ГИН РАН) за определение изотопного состава углерода CO₂ и CH₄ в газе методом масс-спектрометрии, сотрудникам КФ ФИЦ ЕГС РАН: И.Д. Лукашевской за выполнение анализов газа методом газовой хроматографии и А.Н. Биченко за помощь в проведении полевых работ, сотрудникам ИВиС ДВО РАН: М.А. Назаровой (Аналитический центр) за выполнение анализов поглощенных в щелочи газов методами классического химического анализа, Ю.А. Тарану за плодотворное обсуждение предстоящих работ и полученных результатов, А.В. Сокоренко за помощь в подборе и анализе фотоматериалов, Н.В. Горбач за данные о местоположении эруптивных центров в 2009 г.

Список литературы

1. *Кирсанов И.Т., Медведева Г.Г., Серафимова Е.К.* Фумарольная деятельность Авачинского и Корякского вулканов // Бюллетень вулканологических станций. 1964. № 38. С. 3-32.
2. *Масуренков Ю.П., Пузанков М.Ю., Егорова И.А.* Вулкан Корякский // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 230-240.
3. *Мелекесцев И.В., Карташева Е.В., Кирсанова Т.П., Кузьмина А.А.* Загрязненная свежевывавшей тефрой вода как фактор природной опасности (на примере извержения вулкана Корякский, Камчатка, в 2008-2009 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2011. № 1. С. 19-32.
4. *Таран Ю.А.* Фумарольная активность Корякского вулкана в 1983 г. // Вулканология и сейсмология. 1985. № 3. С. 82-84.
5. *Giggenbach W.F.* Chemical composition of volcanic gases. In: Scarpa R., Tilling R.I. (Eds.), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*. Springer Verlag, Berlin, 1996. P. 221-256.
6. *Taran Y.A., Cornor C.B., Shapar V.N. et al.* Fumarolic activity of Avachinsky and Koryaksky volcanoes, Kamchatka, from 1993 to 1994 // *Bulletin of Volcanology*. 1997. V. 58. № 8. P. 441-448. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.020>
7. *Taran Y.A., Ryabinin G.V., Pokrovsky B.G. et al.* Methane-rich thermal and mineral waters of the Avachinsky Depression, Kamchatka // *Applied Geochemistry*. 2022. V. 145. Art. 105414. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105414>

Фантомные ренит-содержащие парагенезисы высокоглиноземистых дочерних фаз расплавных включений в оливине голоценовых вулканов кальдеры Медвежья (о. Итуруп, Курильские острова)

Низаметдинов И.Р., Шевко А.Я., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З., Секисова В.С., Тимина Т.Ю.

Phantom rhonite-containing parageneses of high-alumina daughter phases in olivine-hosted melt inclusions of the Holocene volcanoes of the Medvezhya Caldera (Iturup Island, Kuril Islands)

Nizametdinov I.R., Shevko A.Ya., Kuzmin D.V., Smirnov S.Z., Sekisova V.S., Timina T.Yu.

*Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск;
e-mail: inizametdinov@igm.nsc.ru*

Расплавные включения в оливине из лав и алливалитов вулканов Меньший Брат и Кудрявый содержат высокоглиноземистые дочерние фазы, среди которых присутствуют остаточное стекло (Al_2O_3 до 25 масс. %), Al-пироксены, шпинель и минерал подгруппы ренита. Состав минерала ренит-куратитовой серии позволяет назвать его низкотитанистым Fe^{2+} аналогом ренита.

Введение

При детальном исследовании дочерних кристаллических фаз частично раскристаллизованных расплавных включений во вкрапленниках оливина из голоценовых лавовых потоков вулканов Кудрявый и Меньший Брат кальдеры Медвежья впервые в пределах Курильской островной дуги был обнаружен низкотитанистый аналог ренита в ассоциации с магнетитом, шпинелью, глиноземистыми пироксенами, и стеклом с содержанием Al_2O_3 до 25 масс. % [2, 3].

В отличие от пород повышенной щелочности, находки минералов подгруппы ренита в известково-щелочных вулканитах островодужных обстановок редки. Его находки описаны в ассоциации с клинопироксеном, Al-шпинелью и кислым остаточным стеклом среди дочерних фаз в расплавных включениях в оливине из алливалитов вулкана Семячик и базальтов Ключевского вулкана на Камчатке [1].

В докладе представлены данные о составах экзотических дочерних минералов расплавных включений в оливине, а также предложены механизмы их образования.

Образцы и методы

Нами изучены наиболее молодые продукты посткальдерных извержений – голоценовые базальт-андезибазальтовые потоки вулкана Меньший Брат (потоки кратеров Коротышка и Восток) и поток Черныш вулкана Кудрявый, сложенный андезибазальтами и андезитами (рис. 1). Отличительной особенностью лав вулкана Меньший Брат является сравнительно высокое для Курильской островной дуги содержание MgO (до 10 масс. %), а также присутствие вкрапленников оливина с содержанием Fo от 84 до 90 мол. %, что предполагает исходно мантийную природу расплавов, из которых они образовались. Валовый состав пород потока Черныш показывает, что он претерпел более глубокую эволюцию в сторону кислых пород в сравнении с базальтами лавовых вулкана Меньший Брат, что выражается в более низких содержаниях MgO (до 5 масс. %) и более высоких содержаниях SiO_2 (до 61 масс. %).

Повсеместно в оливине в образцах базальтов и андезибазальтов лавовых потоков вулканов Меньший Брат и Кудрявый были обнаружены первичные, частично раскристаллизованные, расплавные включения. Для установления фазового состава этих включений и определения химического состава минералов-узников включения были выведены на поверхность путем шлифовки и отполированы. Определение содержания главных элементов в оливине-хозяине, минералах-узниках и стеклах расплавных включений проводилось на сканирующем электронном микроскопе MIRA 3 LMU (Tescan Ltd) с системой микроанализа INCA Energy 450 + XMax 80

(Oxford Instruments Ltd) методом энергодисперсионной спектроскопии в «Центре коллективного пользования научным оборудованием много-элементных и изотопных исследований СО РАН» (ИГМ СО РАН).

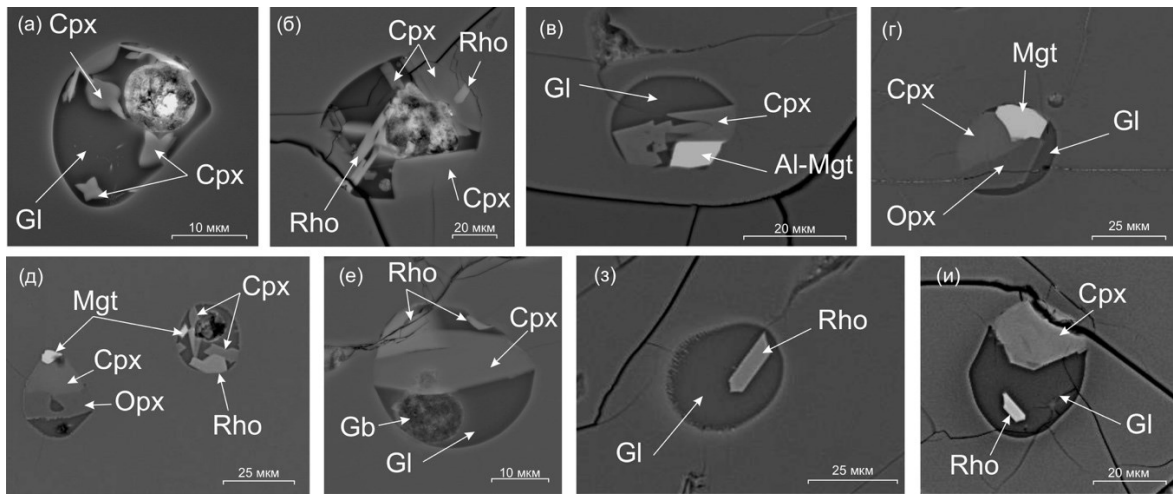


Рис. 1. Частично раскристаллизованные расплавные включения в оливине из оливин-анортитовых сферолитов вулкана Кудрявый (поток Черныш) в обратно-рассеянных электронах. Принятые сокращения: Rho – ренит, Cpx – клинопироксен, Opx – ортопироксен, Mgt – магнетит, Gl – остаточное стекло, Gb – газовый пузырек.

Результаты

Первичные частично раскристаллизованные включения в оливине из оливин-анортитовых сферолитов потока Черныш [4] имеют округлую или овальную форму и размер от 15 до 75 мкм (рис. 1). Постзахватная эволюция включений выражается в кристаллизации дочерних минералов и осаждении оливина-хозяина на стенках включений.

Первичные частично раскристаллизованные расплавные включения в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат имеют размер до 80 мкм. Среди дочерних фаз в частично раскристаллизованных включениях обнаружены высокоглиноземистый клинопироксен, шпинель, минерал подгруппы ренита, силикатное стекло и газовый пузырек (рис. 2).

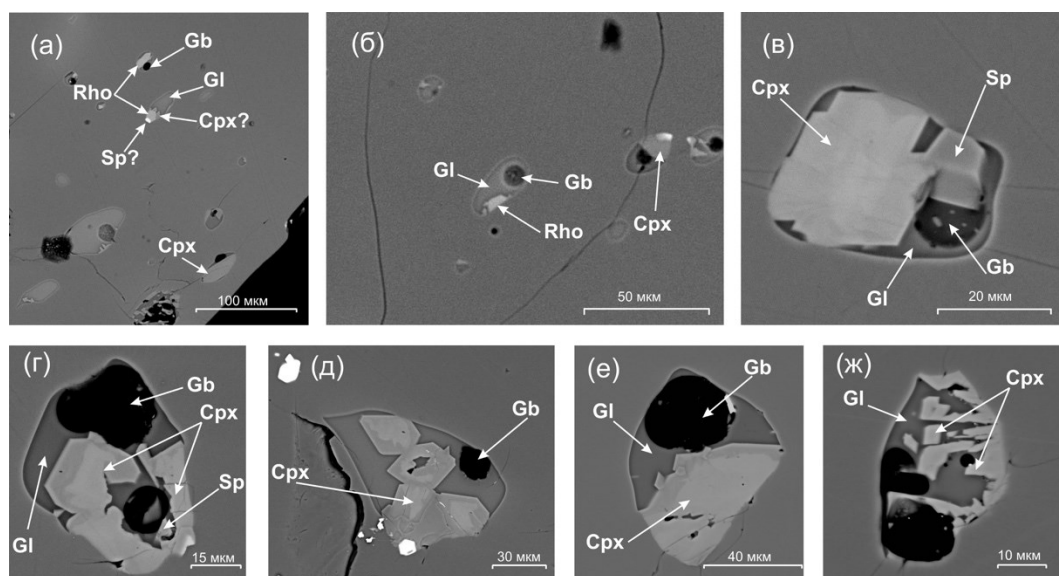


Рис. 2. Изображения частично раскристаллизованных расплавных включений в обратно-рассеянных электронах в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат. Принятые сокращения аналогично рис. 1.

Ренит из расплавных включений в оливине базальтов вулкана Меньший Брат по содержанию железа и магния наиболее близок по составу к идеальному рениту [2]. Наблюдаемые небольшие вариации состава этой фазы позволяют составить следующую усредненную кристаллохимическую формулу – $(Ca_{3.47}Mg_{0.31}Na_{0.22})(Mg_{4.78}Fe_{3.41}^{3+}Fe_{2.30}^{2+}Al_{0.97}Ti_{0.53}Mn_{0.01})O_4[Si_{6.78}Al_{5.22}O_{36}]$.

Нехарактерным для ренита является высокое содержание трехвалентных катионов, занимающих позиции двухвалентных катионов и титана ($Al+Fe^{3+} > 4$ ф.е. на 40 атомов кислорода).

Гораздо более широкие вариации по составу отмечаются у ренита из расплавных включений в оливине из сферолитов вулкана Кудрявый. Наиболее магниевые составы близки к ренитам вулкана Меньший Брат. Наиболее железистые разновидности ($X_{Mg} < 0.5$) приближаются к куратиту и соответствуют формуле – $(Ca_{3.2}Na_{0.5}Mg_{0.2})(Fe_{4.6}^{2+}Mg_{3.5}Al_{2.9}Fe_{0.7}^{3+}Ti_{0.3})O_4[Si_{8.2}Al_{3.8}O_{36}]$. В целом, рениты из расплавных включений в оливине сферолитов характеризуются более высокими содержаниями Fe, чем в оливине базальтов вулкана Меньший Брат (рис. 3).

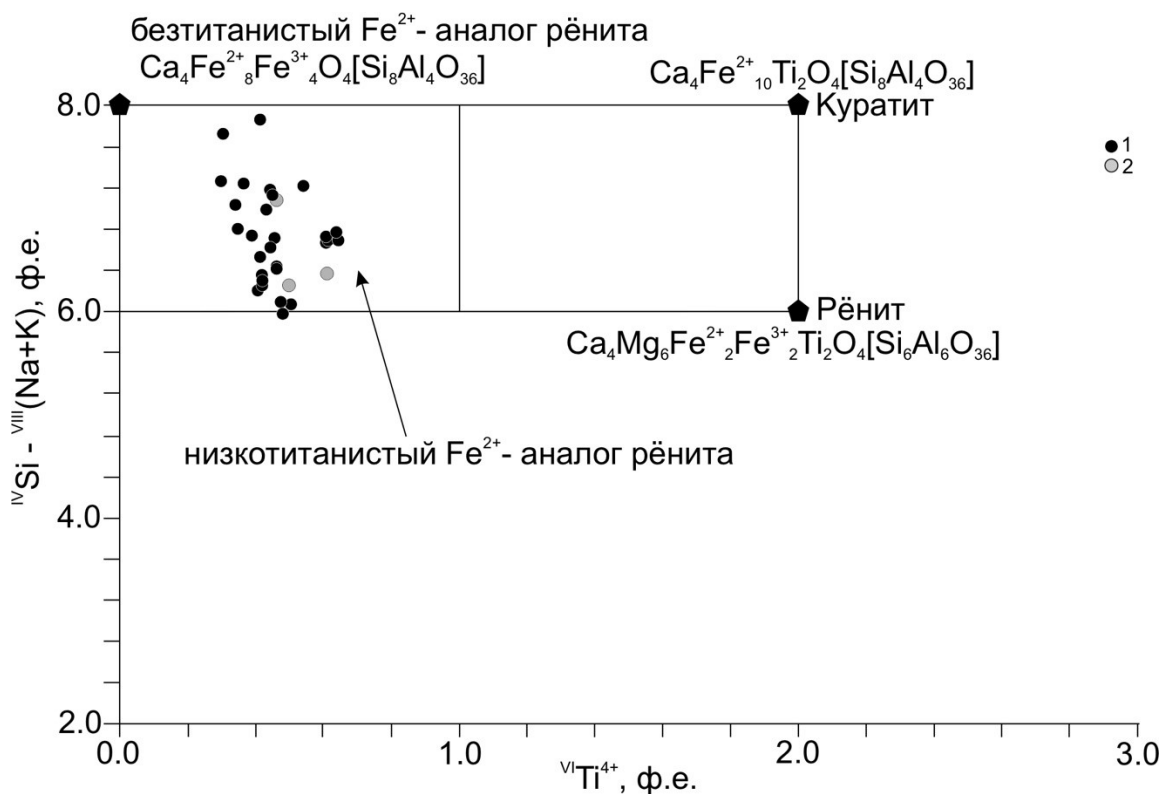


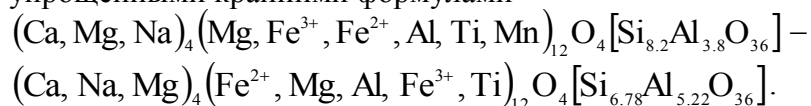
Рис. 3. Соотношение ^(IV)Si-^(VIII)(Na+K) – ^(VI)Ti⁴⁺ (рассчитаны на 28 катионов и 40 атомов кислорода) в обнаруженных минералах ренит-куратитовой серии. Условные обозначения: 1 – ренит из расплавных включений в оливине из сферолитов влк. Кудрявый; 2 – ренит из расплавных включений во вкрапленниках оливина из базальтов влк. Меньший Брат. Названия полей из [5].

Кристаллические фазы в расплавных включениях образуются в следующей последовательности: магнетит – клинопироксен – ортопироксен – плеонаст (ферриплеонаст). При этом низкотитанистый Fe²⁺ аналог ренита может выделяться как первым, так и после магнетита, и после клинопироксена. На основании взаимоотношений минералов в расплавных включениях в оливине из базальтов вулкана Меньший Брат выделяется следующая последовательность кристаллизации дочерних фаз во включениях: шпинель – Fe²⁺ аналог ренита – клинопироксен.

Выводы

Изученные ассоциации высокоглиноземистых дочерних фаз в расплавных включениях в оливине голоценовых лавовых потоков в кальдере Медвежья показали, что минералы подгруппы ренита могут кристаллизоваться из исходных расплавов базальтового и андезибазальтового состава известково-щелочной серии.

Обнаруженный в виде дочерней фазы минерал подгруппы ренита относится к ренит-куртитовой серии. Его отличительной особенностью является пониженное содержание титана и магния и более высокое содержание железа в степени окисления 2+. В целом, их можно называть низкотитанистыми Fe^{2+} аналогами ренита с упрощенными крайними формулами



Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-27-00216, <https://rscf.ru/project/23-27-00216/>).

Список литературы

1. *Ананьев В.В., Селянгин О.Б.* Ренит в расплавных включениях из оливина алливалитовых нодулей вулкана Малый Семячик и базальтов вулкана Ключевской (Камчатка) // Вулканология и Сейсмология. 2011. Вып. 5. С. 1-7.
2. *Низаметдинов И.Р., Кузьмин Д.В., Смирнов С.З., Секисова В.С.* Ренит-содержащая ассоциация из расплавных включений как индикатор эволюции магнезиальных базальтов вулкана Меньший Брат (о. Итуруп) // Материалы Всероссийской конференции: физико-химические факторы петро- и рудогенеза: новые рубежи, посвященной 120-летию со дня рождения выдающегося российского ученого академика Д.С. Коржинского, 7-9 октября 2019 г. Москва: ИГЕМ РАН, 2019. С. 130-132.
3. *Шевко А.Я., Гора М.П., Кузьмин Д.В. и др.* Оливин-анортитовые сферолиты вулкана Кудрявый (о. Итуруп) // Геологические процессы в обстановках субдукции, коллизии и скольжения литосферных плит. Материалы Третьей Всероссийской конференции с международным участием, 20-23 сентября 2016 г. Владивосток: ДВГИ ДВО РАН, 2016. С. 262-265.
4. *Шевко А.Я., Смирнов С.З., Гора М.П. и др.* Низкотитанистый аналог ренита в расплавных включениях из оливин-анортитовых сферолитов вулкана Кудрявый (о. Итуруп) // Материалы XVII Всероссийской конференции по термобарогеохимии, посвященной 80-летию со дня рождения д-ра геол.-минерал. наук Феликса Григорьевича Рейфа (1936-2008), 12-17 сентября 2016 г. Улан-Удэ: ГИН СО РАН, 2016. С. 186-188.
5. *Peretyazhko I.S., Savina E.A., Khromova E.A.* Minerals of the rhönite-kuratite series in paralavas from a new combustion metamorphic complex in the Choir–Nyalga basin (Central Mongolia): composition, mineral assemblages and formation conditions // Mineralogical Magazine. 2017. V. 81. №. 4. P. 949-974. <https://doi:10.1180/minmag.2016.080.144>

Ксенолиты оливиновых габбро в лавах Кронцового вулкана (Восточная Камчатка)

Овсянников Г.Н.^{1,2}, Горбач Н.В.¹, Rogozin A.N.¹, Tobelko D.P.^{1,3}

Olivine gabbro xenoliths from the Kronotsky volcano rocks (Eastern Kamchatka)

Ovsyannikov G.N., Gorbach N.V., Rogozin A.N., Tobelko D.P.

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: george_ovs@mail.ru

² МГУ им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, г. Москва

³ ГЕОХИ РАН им. В.И. Вернадского, г. Москва

Ксенолиты оливинсодержащих, оливиновых габбро и габброноритов обнаружены на северном склоне Кронцового вулкана в лавах низко-К высоко-Fe базальтов и андезибазальтов. Ксенолиты интерпретированы как продукты кристаллизационной дифференциации очага Кронцового вулкана, P-T параметры предварительно оценены в 1100 °С и 3.47 кбар.

Кронцовый – крупнейший из стратовулканов фронтальной зоны Восточного вулканического пояса Камчатки (ВВП). Его постройка сложена преимущественно лавами и туфами толеитовых низко-К высоко-Fe базальтов и андезибазальтов (SiO_2 47.04-53.15 масс. %; K_2O 0.24-0.65 масс. %; FeO^*/MgO 1.2-2.89), реже андезитов [2].

Ксенолиты оливинсодержащих и оливиновых габбро, реже габброноритов обнаружены нами в лавах и бомбах на северном склоне вулкана и на острове Линдера Кронцового озера в ходе полевых работ 2022-2023 гг. [3]. Ксенолиты размером от 1 до 20 см в диаметре имеют пористую или массивную текстуру, структуру от мелкозернистой до крупнозернистой, резкие или размытые контакты с вмещающими породами, округлую, реже угловатую форму (рис. 1).

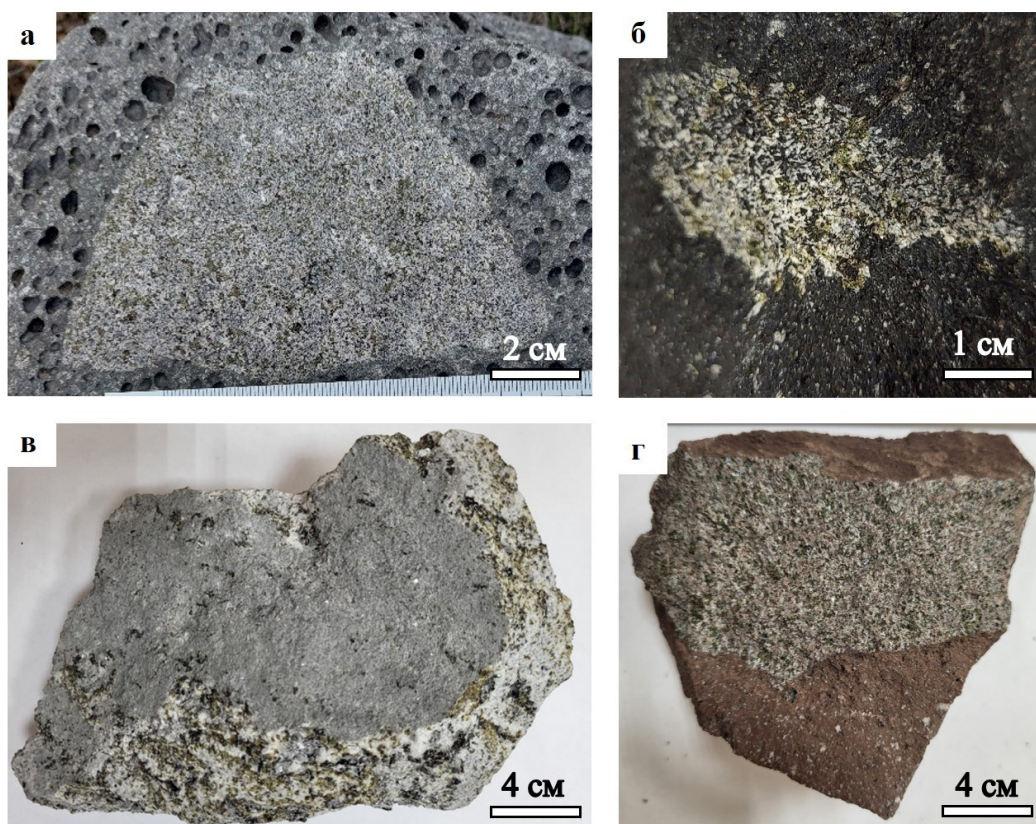


Рис. 1. Макрофото образцов ксенолитов из пород северного склона Кронцового вулкана. а – массивный ксенолит оливиновых габброноритов из пористых ОI-Срх-РI андезибазальтов; б – пористый ксенолит оливиновых габбро из ОI-Срх базальтов; в – крупный массивный крупнозернистый ксенолит оливинового габбро из Орх-Срх-РI андезита; г – слабопористый ксенолит среднезернистого оливинсодержащего габбро из измененного Орх-Срх-РI андезита.

Петрографическое исследование

Микроскопически ксенолиты имеют офитовую и пойкилофитовую структуру с существенным идиоморфизмом удлиненного плагиоклаза (45-55 об. %) по отношению к клинопироксену (35-40 об. %) и ортопироксену (0-5 об. %). Кристаллы ксеноморфного оливина (5-10 об. %) содержатся в пироксенах или выделяются отдельно. Рудные минералы, как правило, не встречаются. Интерстиции в пористых ксенолитах заполнены минералами и стеклом вмещающей породы. Химический состав представительного ксенолита, масс. %: SiO₂ 50.60; TiO₂ 0.24; Al₂O₃ 20.50; FeO* 6.70; MnO 0.13; MgO 7.11; CaO 12.60; Na₂O 2.14; K₂O 0.12; P₂O₅ 0.01; (результаты нормированы; аналитик В.М. Чубаров, Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН). Параметры минерального состава ксенолитов и вмещающих пород отражены в таблице. Состав минералов определен при помощи электронно-зондового микроанализа в лабораториях Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН (аналитик Т.М. Философова) и Геологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова (аналитик Н.Н. Коротаева).

Таблица. Параметры фенокристаллов ксенолитов и вмещающих пород северного склона Кроноцкого вулкана

	Оливин, Fo, мол. %	Плагиоклаз, An, мол. %	CPX, Mg#	OPX, Mg#
Ксенолиты	66-76; 71	71-85; 76	75-79; 76	70-78; 74
Вмещающие				
Базальты	65-83; 75	67-81; 72	58-84; 74	–
Андезибазальты	62-80; 69	66-84; 75	44-72; 56	–
Андезиты	–	63-80; 72	65-79; 69	49-66; 56

Примечание. Через тире указаны вариации значений, после точки с запятой – средние. Прочерк в таблице означает систематическое отсутствие минерала в данном типе пород.

Взаимодействие ксенолитов с вмещающими породами

На основе петрографического изучения выделено три типа взаимодействия ксенолита и вмещающей породы – (1) отсутствие видимых изменений ксенолита; (2) частичное плавление внешних кайм минералов ксенолитов, локальная закалка стекла вмещающей породы, образование новых внешних зон на минералах ксенолита; (3) существенное плавление минералов ксенолита в его краевых частях, образование ортопироксен-титаномагнетитовых симплектитов по оливину, замещение моноклинного пироксена ромбическим, изменение содержания кальция в породообразующих минералах, образование сростаний титаномагнетита, ильменита и сульфидов железа, окисление данных минералов. Реакционные взаимодействия тем существеннее, чем больше разница валового состава ксенолита и породы, они наиболее проявлены в андезибазальтах и андезитах (рис. 2).

Оценка параметров образования ксенолитов

Параметры образования ксенолитов предварительно оценены по двупироксеновому геобарометру и геотермометру [8] в 3.47 Кбар и 1100.7 °С соответственно.

Обсуждение результатов

Минералогические особенности ксенолитов не позволяют отнести их к алливалитам, многократно описанным для объектов фронтальной зоны ВВП [1, 4, 6]. Оливин изученных ксенолитов содержит меньше форстеритовой, а плагиоклаз – меньше анортитовой компоненты, чем в алливалитах, кроме того, отмечается значительное содержание пироксенов.

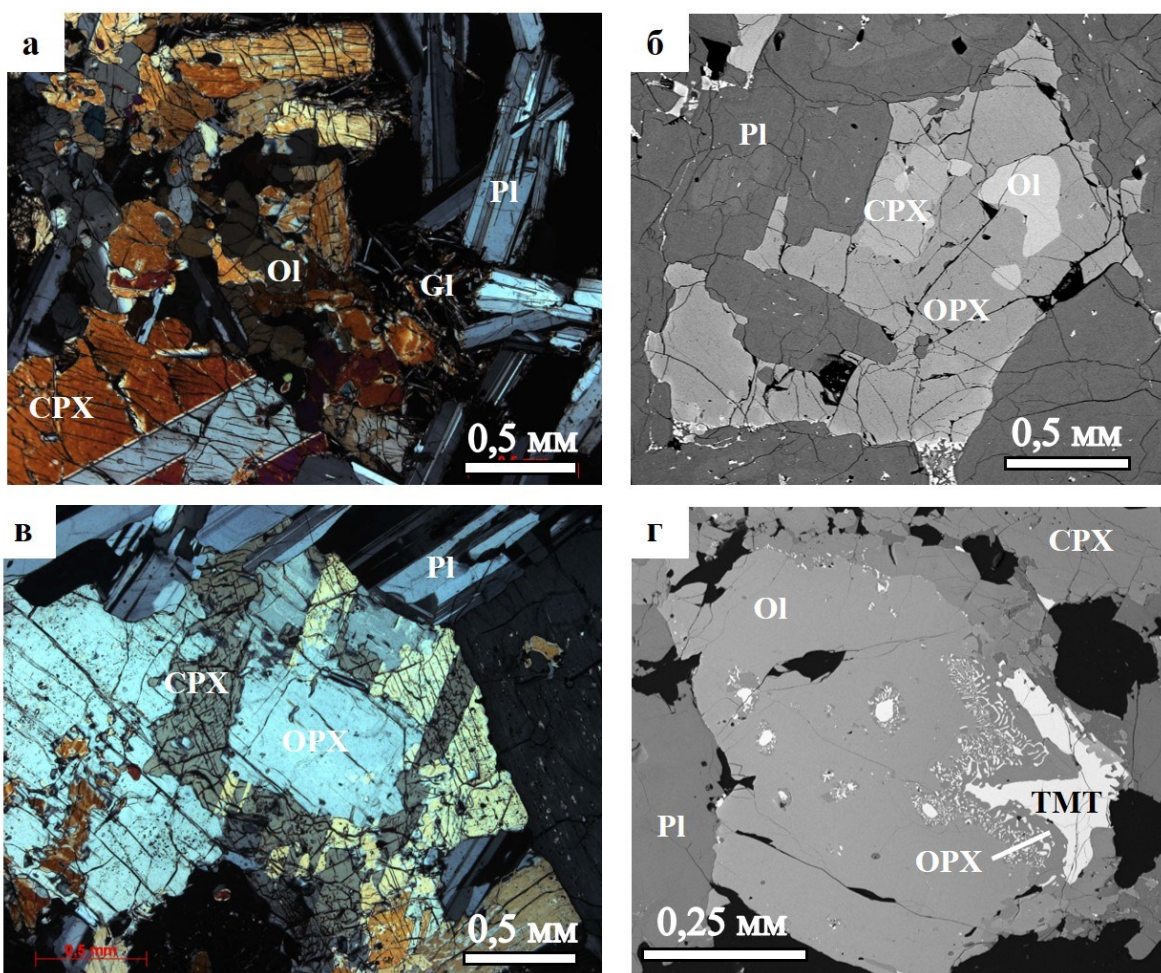


Рис. 2. Микрофото образцов ксенолитов из пород северного склона Кроноцкого вулкана. а – слабопористое оливинсодержащее габбро с продуктами кристаллизации вмещающего андезибазальта в интерстициях, б – ойокристалл клинопироксена с вростками ортопироксена и оливина в окружении идиоморфных кристаллов плагиоклаза в оливиновом габбронорите. По паре ортопироксен-клинопироксен определены Р-Т параметры, в – реакционное взаимодействие оливинового габбро и Орх-Срх-Pl андезита: ортопироксен замещает клинопироксен, г – реакционное взаимодействие оливинового габбро и Срх-Pl андезибазальта: развитие ортопироксен-титаномагнетитовых симплектитов по оливину. Фото а, б – в проходящем свете в скрещенных николях, фото в, г – в отраженных электронах (аналитики Т.М. Философова, Н.Н. Коротаева). Pl – плагиоклаз, Ol – оливин, Срх – клинопироксен, Орх – ортопироксен, Gl – стекловатый участок вмещающей породы с микролитами, ТМТ – титаномагнетит.

На основе сходства химического и минерального составов ксенолитов и вмещающих пород Кроноцкого вулкана (рис. 3) мы предполагаем, что ксенолиты являются продуктами кристаллизационной дифференциации толеитового расплава в его магматическом очаге. Оливин вмещающих пород в целом более магнезиальный, чем оливин ксенолитов, а в некоторых случаях демонстрирует обратную зональность, что может быть связано с поступлением в магматический очаг менее дифференцированных порций расплава с последующим выносом кристаллической каши и твердых фрагментов габбро. Структурно-текстурные и минералогические особенности изученных ксенолитов схожи с ксенолитами вулкана Килауэа [7], которые интерпретированы как дифференциаты расплава в магматическом очаге. Полученные нами оценки Р-Т параметров образования ксенолитов близки к таковым для магматического очага базальтов вулкана Жупановский — еще одного крупного объекта во фронтальной зоне ВВП [5].

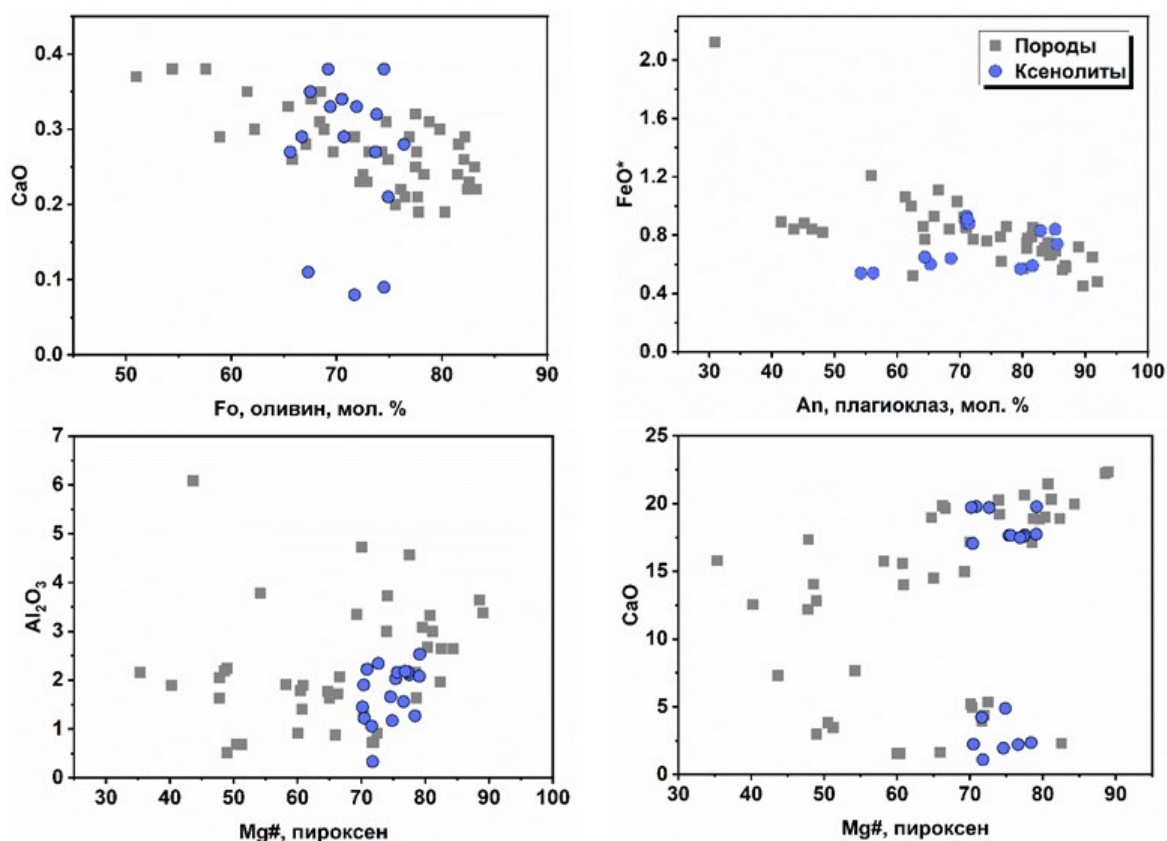


Рис. 3. Диаграммы CaO, масс. %–Fo, мол. %, FeO* масс. %–An, мол. %, Al₂O₃, масс. %–Mg#, CaO, масс. %–Mg# для сравнения составов оливина, плагиоклаза и пироксенов пород и ксенолитов северного склона Кроноцкого вулкана. $Mg\# = Mg/(Mg+Fe^{2+}+Fe^{3+}+Mn)$.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-27-00053 «Условия происхождения и эволюции магм во фронтальной зоне островной дуги на пример вулкана Кроноцкого (Восточная Камчатка)» (<https://rscf.ru/project/23-27-00053/>).

Список литературы

1. Вольнец О.Н., Щека С.А., Дубик Ю.М. Оливин-анортитовые включения вулканов Камчатки и Курил // Включения в вулканических породах Курило-Камчатской островной дуги. М.: Наука. 1978. С. 124-167.
2. Горбач Н.В., Rogozin A.H. Особенности геологического строения и состава пород вулкана Кроноцкого – крупнейшего стратовулкана фронтальной зоны Восточного вулканического пояса Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2023. № 5. С. 26-45.
3. Горбач Н.В., Rogozin A.H., Овсянников Г.Н. Полевые работы на северных склонах Кроноцкого вулкана в июле-августе 2023 г. // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 4. Вып. 60. С. 114-121. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-4-60-114-121>
4. Плечов П.Ю., Шишкина Т.А., Ермаков В.А., Портнягин М.В. Условия формирования алливалитов – оливин анортитовых кристаллических включений – в вулканитах Курило-Камчатской дуги // Петрология. 2008. Т. 16. № 3. С. 275-276.
5. Плечова А.А., Портнягин М.В., Базанова Л.И. Происхождение и эволюция исходных магм фронтальных вулканов Камчатки по данным изучения магматических включений в оливине вулкана Жупановский // Геохимия. 2011. № 8. С. 787-812.
6. Шишкина Т.А., Плечов П.Ю., Портнягин М.В. Условия формирования оливин-плагиоклазовых кумулятов вулкана Ксудач (Камчатка) // Геология и разведка. 2009. № 1. С. 8-17.
7. Fodor R.V., Moore R.B. Petrology of gabbroic xenoliths in 1960 Kilauea basalt: crystalline remnants of prior (1955) magmatism // Bulletin of Volcanology. 1994. V. 56. P. 62-74.
8. Putirka K.D. Thermometers and barometers for volcanic systems // Reviews in mineralogy and geochemistry. 2008. V. 69. №. 1. P. 61-120.

Определение причины фонтанирования раскаленных бомб во время извержений базальтовых-андезиобазальтовых вулканов

Озеров А.Ю.

Defining the cause of igneous bombs spouting during the eruptions of basalt–basaltic-andesite volcanoes

Ozerov A. Yu.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: ozerov@ozerov.ru

Исследования динамики извержений базальтовых-андезиобазальтовых вулканов и экспериментальные работы на созданных автором лабораторных установках показали, что на границе двух сред – при переходе газового пузыря из магматического расплава в открытое атмосферное пространство – возникает кумулятивная сила, преобразующая расплав, окружающий пузырь, в вулканическую бомбу, выбрасываемую вверх на сотни метров.

Доклад посвящен исследованию причин фонтанирования раскаленных бомб в ходе извержений базальтовых-андезиобазальтовых вулканов. Такой тип деятельности характерен для гавайских, исландских и стромболианских извержений.

Фонтанирование раскаленных бомб

Это яркое и зрелищное явление, которое наблюдается во время извержений вулканов с низковязкими, высокоподвижными магмами. Струя раскаленных вулканических бомб в виде узкого вертикального столба (рис. 1а), веера, или огненной стены поднимается на высоту десятков-сотен метров, в редких случаях – до ~1 км. В процессе фонтанирования поверхностное сечение кратера одномоментно пересекают раскаленные вулканические бомбы, количество которых, в зависимости от интенсивности извержения, достигает первых десятков или даже сотен. Крупная фракция бомб обладает сходным размером. Общей особенностью фонтанов является то, что высота выброса бомбы в среднем на 3 порядка превышает диаметр бомбы.

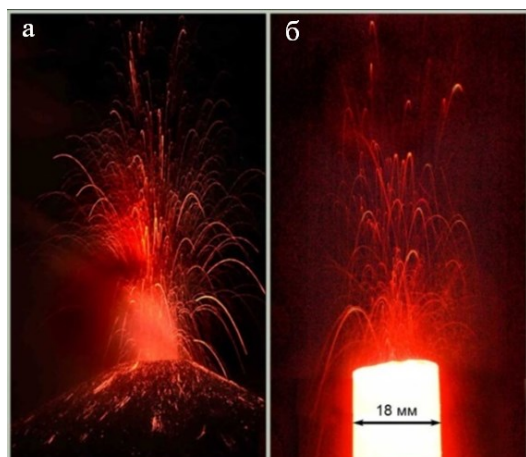


Рис. 1. а – фонтанирование раскаленных бомб в вершинном кратере Ключевского вулкана. Фото Ю.В. Демянчука.

б – фонтанирование водяных капель в процессе экспериментальных исследований с помощью низкотемпературной аэро-, газо-, гидродинамической установки. Фото А.Ю. Озерова.

Фонтанирование может продолжаться минуты, часы, сутки и более, обычно оно возникает в динамике уже происходящего извержения. В некоторых случаях, над кратером, кроме бомб, наблюдается вулканический пепел. Фонтанирование может сопровождаться одновременным излиянием лавовых потоков или происходить без них. Это явление наблюдается в ходе вершинных, побочных, трещинных и моногенных извержений. В результате эпизодов фонтанирования на поверхности земли в прикратерной зоне могут образовываться шлаково-бомбовые слои мощностью от первых сантиметров до метров.

Совокупный анализ данных о фонтанировании, полученных в результате наших исследований, и литературных обобщений, позволил сформировать критерии, которые были положены в основу экспериментальных работ.

Состояние изученности. Несмотря на значительную мощность, непредсказуемость и большую опасность, природа фонтанирования остается одним из слабоизученных вопросов в вулканологии. Общеизвестно, что взрывчатая составляющая базальтовых-андезитовых извержений обеспечивается свободной газовой фазой (газовыми пузырями, находящимися в поднимающемся магматическом расплаве). Важно отметить, что в физической науке были проведены исследования, направленные на изучение трансформации газового пузыря в каплю при переходе границы жидкость-воздух [1], результаты этих работ были учтены при интерпретации наших данных. Участие в конференциях и литературный обзор вулканологических данных показали, что конкретный механизм, объясняющий причину фонтанирования раскаленных бомб на базальтовых-андезитовых вулканах, до сих пор не установлен. В этой связи мы провели комплекс работ: вулканологические и сейсмологические исследования, конструирование аппаратуры и лабораторные эксперименты, которые позволили объяснить механизм этого явления.

Цель исследований – выявление механизма фонтанирования раскаленных бомб при извержениях жидких магматических расплавов и моделирование этого процесса на основе вулканологических, сейсмологических и экспериментальных данных.

Основные методы: 1 – экспедиционное изучение фонтанирования раскаленных бомб на вулканах, 2 – исследование сейсмических записей фонтанирования; 3 – создание барботажных лабораторных установок физического моделирования, 4 – экспериментальное изучение процессов на границе расплав-воздух и на границе жидкость-воздух, превращающих пузырьки в капли, 5 – синтез природных и экспериментальных результатов, определение природы фонтанирования.

Объект изучения – газогидродинамические процессы, происходящие на верхней границе жидкого магматического расплава в кратере вулкана во время извержения (поверхность экспериментальной жидкости) и взрывчатые аэрогидродинамические эффекты во время извержений над кратером вулкана (над лабораторной барботажной установкой).

Главным природным объектом исследований является Ключевской вулкан, где широко проявлены процессы периодического фонтанирования. Это грандиозный вулкан, крупнейший в Евразии (высота 4 822 м), типичный представитель базальтового-андезитового вулканизма, изучавшийся многими исследователями, в том числе автором. Учитывались данные по фонтанированию на вулканах Килауэа, Ньирагонго, Питон-де-ля-Фурнез, Стромболи, Толбачик, Эребус, Этна, Ясур.

Экспериментальное моделирование. В современной литературе нет объяснения природы фонтанирования раскаленных бомб, поэтому мы приступили к созданию 2 лабораторных установок (высокотемпературной и низкотемпературной) для проведения физического моделирования процессов, определяющих фонтанирование.

Высокотемпературная аэро-, газо-, гидродинамическая лабораторная установка

Конструкция установки включает (рис. 2а): высокотемпературную печь для получения расплава, тугоплавкий тигель, газовый баллон, редуктор тонкой настройки, барботажную систему; в качестве модельной жидкости используется легкоплавкое стекло. Максимальная температура нагрева в печи ~1 350 °С.

Задача использования высокотемпературной установки – моделирование формирования единичных капель расплава из пузырей, находящихся в расплаве, и выброса этих капель вверх, на высоту, на 3 порядка превышающую диаметр капли.

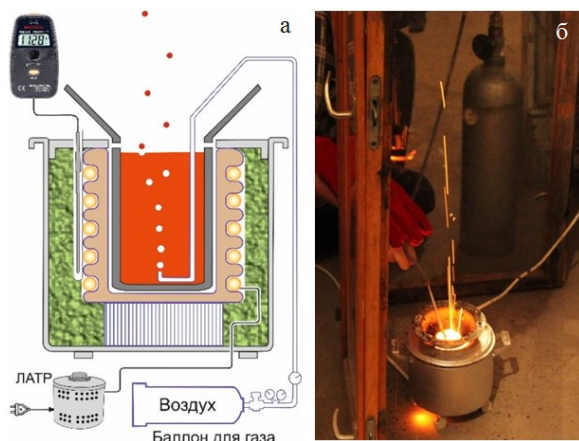


Рис. 2. а – высокотемпературная экспериментальная лабораторная установка, для изучения выброса одиночных капель, формирующихся из пузырьков, барботирующих сквозь расплав. б – фотография трасс раскаленных капель, выброшенных над поверхностью расплава кумулятивными силами лопающихся пузырьков.

Экспериментальные исследования на высокотемпературной установке. При температуре 1 000 °С расплав становится жидким, в него помещается барботер, сквозь который в расплав поступает воздух со скоростью несколько пузырьков в секунду. Достигая поверхности расплава, пузыри трансформируются в капли расплава ($\varnothing \sim 3$ мм), которые на большой скорости отлетают вверх от поверхности. Движение капель фиксируется фотоаппаратом в виде протяженных ярко желтых трасс. При температуре расплава 1 128 °С и при внутреннем диаметре сопла барботера 5 мм была достигнута максимальная высота выброса капель. Наибольшее их количество вылетало на высоту 40-90 см (рис. 2б), но некоторые достигали высоты около 3 метров.

Результат эксперимента: установлено, что максимальная высота вылета капель над поверхностью расплава на 3 порядка превышает размер капли. В вулканическом масштабе такое значение соответствует высоте выброса реальной раскаленной бомбы над кратером.

Низкотемпературная аэро-, газо-, гидродинамическая лабораторная установка

Конструкция установки включает (рис. 3): прозрачную трубку ($h=300$ мм, $\varnothing_{\text{внутр.}}=18$ мм), герметичную в нижней части, механизм крепления иглы, газовый баллон, редуктор тонкой настройки, мощный источник света; в качестве модельной жидкости используется слабо-солевой водный раствор. Фото-регистрация выброса капель производится в темноте при мощном источнике красного цвета, который придает каплям цвет магматического расплава. Это необходимо для визуального сопоставления структуры экспериментального и реального вулканического фонтанирования.

Задача низкотемпературной установки – моделирование группового поведения образующихся из пузырей капель, вылетающих из жидкости и создающих непрерывно фонтанирующую струю, которая имеет максимальное структурное сходство с фонтанами раскаленных вулканических бомб.

Экспериментальные исследования на низкотемпературной установке. В нижнюю часть трубки через иглу поступает газ, и в слабо-солевом растворе воды формируются пузырьки, которые, создавая поток, барботируют вверх (рис. 3), вплоть до поверхности жидкости. На границе раздела двух сред (вода – атмосферный воздух) пузырьки трансформируются в капли, которые отрываются от поверхности воды и вылетают вверх. Диаметр капли ~ 2 мм, высота вылета до 200 мм, т.е. максимальная высота вылета на 2 порядка превышает диаметр капли (см. рис. 1б).

Результат эксперимента: установлено, что поток барботирующих пузырьков, достигая поверхности жидкости, трансформируется в поток фонтанирующих капель. Сопоставление структур фонтанов раскаленных бомб и лабораторных фонтанов капель воды, показывает их большое морфологическое сходство, см. рис. 1а-б.

Природа фонтанирования раскаленных бомб во время извержений жидких магматических расплавов

Использование результатов экспериментальных исследований и анализ литературных источников [1] позволил автору составить поэтапную схему преобразования пузырька в каплю (рис. 4).

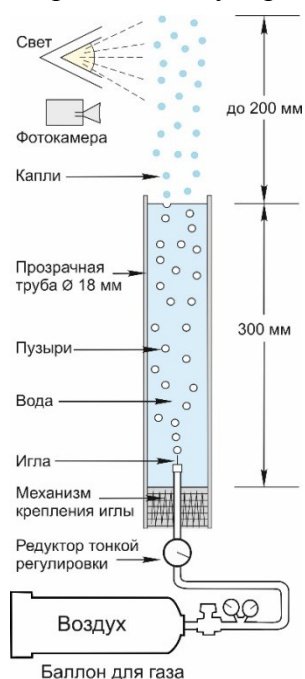


Рис. 3. Низкотемпературная установка для изучения эффектов группового выброса капель, формирующихся из пузырьков, барботирующих сквозь воду и создающих непрерывно фонтанирующую капельную структуру.

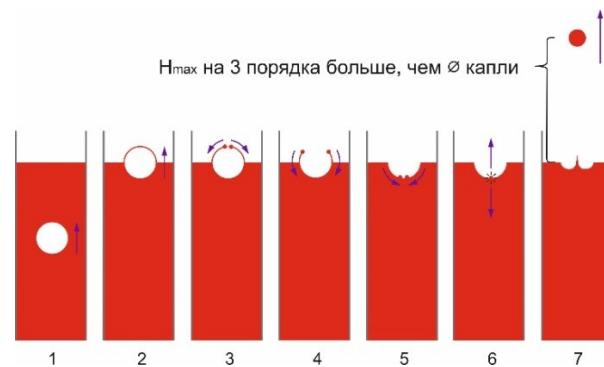


Рис. 4. Схематическое изображение механизма формирования одиночной капли из газового пузырька, всплывающего в жидкости и реализуемого на границе жидкость-атмосфера, составлено А.Ю. Озеровым.

Синтез результатов представленных исследований позволяет сформулировать следующее заключение: установлен механизм фонтанирования раскаленных бомб на вулканах с жидкими магматическими расплавами на основе анализа извержений, результатов лабораторного моделирования на специально сконструированных авторских аэро-, газо-, гидродинамических установках и литературных данных о трансформации пузырей в капли. Экспериментально установлено, что максимальная высота вылета капель над поверхностью расплава на 3 порядка превышает собственный размер капель и, что поток пузырьков в жидкости, достигая поверхности, трансформируется в поток капель. Эти данные позволяют объяснить как отдельные элементы процесса фонтанирования раскаленных бомб, так и весь процесс в целом. Показано, что выброс вулканических бомб на высоту десятки-сотни метров происходит при давлении близком к 1 атмосфере за счет силы поверхностного натяжения, существующей в пузырях. Предложен принципиально новый механизм фрагментации жидких магм, обусловленный поверхностным натяжением пузырей, достигающих поверхности раздела двух сред: магматический расплав – атмосфера.

Автор выражает благодарность инженерам ИВиС ДВО РАН А.В. Буткачу и В.С. Шульге за высокий профессионализм, изобретательность и терпение, а также Н.А. Озеровой за подготовку графических материалов.

Список литературы

1. *Brennen C.E. Fundamentals of Multiphase Flows. Cambridge University Press, 2005. 410 p.*

Вулканические породы Охотско-Чукотского вулканического пояса и проблема происхождения геомагнитных суперхронов

Павлов В.Э.

Volcanic rocks of the Okhotsk-Chukotka volcanic belt and the problem of the origin of the Cretaceous Normal Polarity superchron

Pavlov V.E.

Институт физики Земли РАН, г. Москва;

e-mail: pavlov.ifz@gmail.com

По вулканическим породам Охотско-Чукотского вулканического пояса получены оценки амплитуды вековых геомагнитных вариаций во время Мелового геомагнитного суперхрона, которые поддерживают гипотезу о том, что суперхроны являются особым состоянием геодинамо, вызванным внешней причиной, связанной с мантийными геодинамическими процессами.

Введение

При изучении эволюции геомагнитного поля одной из наиболее актуальных задач является выяснение природы геомагнитных суперхронов. «Суперхронами» в современной научной литературе называют интервалы времени (и соответствующие им состояния геомагнитного поля), в течение которых обычный для любого другого отрезка геологической истории процесс смены полярности геомагнитного поля останавливается, и поле как бы «замораживается» на многие миллионы и десятки миллионов лет в одном из двух возможных стационарных состояний. Суперхроны являются наиболее яркими и, вероятно, наиболее загадочными событиями в истории геомагнитного поля. Вопрос о том, как и почему возникают и прекращаются суперхроны, до сих пор остается нерешенным и представляет собой одну из важных проблем современного естествознания. Преобладавшая до последнего времени точка зрения состояла в том, что переходы между суперхронным и инверсионным режимами происходят в результате постепенных изменений теплового потока на границе ядро-мантия, являющихся отражением мантийной динамики. С другой стороны, имеются свидетельства того, что такие переходы могут иметь резкий, спонтанный характер и быть связанными с нелинейным характером процессов, генерирующих земное магнитное поле. Для того чтобы лучше понять характер перехода между суперхронным и инверсионным режимом поля и, тем самым, приблизиться к решению загадки суперхронов, в течение ряда лет нами проводится работа по изучению поведения геомагнитного поля самого молодого из известных геомагнитных суперхронов – Мелового суперхрона прямой полярности. Этот суперхрон начался в раннем мелу 121 млн лет назад и завершился в позднем мелу 84 млн лет назад.

Основной целью этих исследований является получение надежных данных о характеристиках геомагнитного поля во время суперхрона и сравнение их с соответствующими характеристиками геологических эпох, характеризовавшихся частой сменой магнитной полярности. В том случае, если эти характеристики будут значительно отличаться, можно будет говорить о том, что геомагнитные суперхроны, действительно, отвечают особым режимам работы геодинамо, контролируемым, вероятно, мантийной динамикой. Если такое отличие не будет найдено, это будет рассматриваться как свидетельство спонтанного возникновения суперхронов, никак не связанного с процессами, происходящими в мантии и в других оболочках нашей планеты.

Одной из немногих характеристик геомагнитного поля геологического прошлого, которые мы умеем определять, является амплитуда его вековых вариаций. Оценки амплитуды древних вековых вариаций (paleosecular variations – PSV) могут быть получены по результатам детального палеомагнитного изучения вулканических последовательностей, сформировавшихся в течение рассматриваемых геологических

эпох. Перспективным объектом для решения поставленной задачи являются породы Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП), время формирования которых (~110-70 млн лет назад) значительно перекрывается с Меловым суперхроном.

Таким образом, конкретная задача настоящего исследования состояла в выполнении детальных исследований вулканических пород ОЧВП, в получении на их основе оценки амплитуды вековых вариаций и сравнении этой оценки с таковыми, существующими для эпох частой смены полярности геомагнитного поля.

Объект исследований

Район наших исследований находится в западной части Чукотки на границе Анадырского и Центрально-Чукотского сегментов ОЧВП в верховьях реки Малый Анюй (рис. 1). Здесь нами было опробовано более 80 вулканических потоков кайемраваамской и коваленковских свит [3], 78 из которых, как показали дальнейшие лабораторные измерения, содержат достаточно четкий палеомагнитный сигнал хорошего качества.

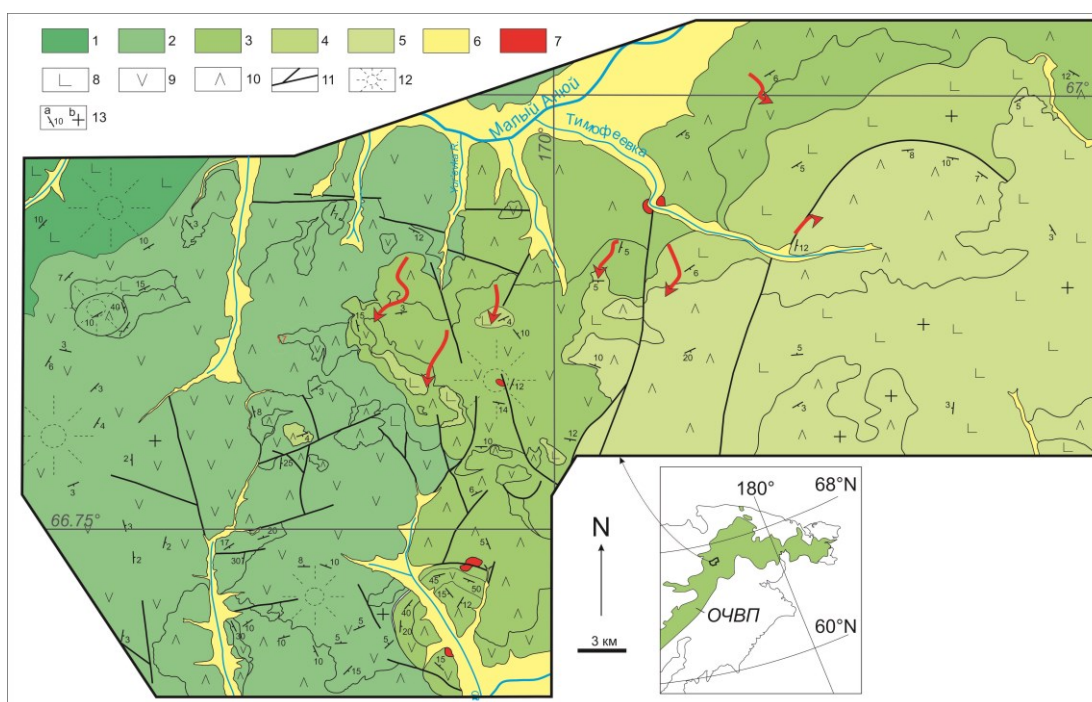


Рис. 1. Схема геологического строения района. (1) – вилковская свита; (2) – мечкеревская свита; (3) – кайемраваамская свита; (4) – коваленковская свита; (5) – вышележащие вулканические толщи; (6) – четвертичные отложения; (7) – расположение опробованных разрезов; (8) – базальты; (9) – андезиты; (10) – риолиты; (11) – главные разломы. (12) – реликты вулканических построек; (13) – элементы залегания.

Из каждого потока отбиралось 12-15 ориентированных палеомагнитных образцов, общее число которых составило около 1000 штук. Ориентация образцов производилась либо с помощью солнечного компаса, либо специальным методом с использованием теодолита, описанным в работе [2].

Кайемраваамская свита включает в себя лавы и туфы андезитов, базальтов, дацитов, риолитов, присутствуют также горизонты вулканомиктовых песчаников. Коваленковская свита сложена лавами оливинных базальтов. Породы не испытывали сколько-нибудь значительных деформаций, залегают обычно со слабым наклоном в сторону структур компенсационного погружения – кальдер и вулканотектонических депрессий [3]. Данные изотопных исследований показывают, что эти породы сформировались перед окончанием Мелового суперхрона в интервале времени 89-84 млн лет назад.

Метод

Лабораторные палеомагнитные исследования, выделение и расчет характеристических компонент намагниченности выполнялись по стандартной методике [4, 11] в палеомагнитной лаборатории ИФЗ РАН (Москва). Сравнение результатов температурной магнитной чистки и чистки переменным магнитным полем образцов пилотной коллекции показало, что статистически значимо они не различаются. Поэтому чистка основной коллекции в дальнейшем производилась переменным магнитным полем. Для исключения влияния на результат межпотоковой корреляции, средние палеомагнитные направления, рассчитанные для последовательных потоков, сравнивались по методике, предложенной в работе [5]. По результатам этого сравнения определялись дирекционные группы и индивидуальные направления, для которых рассчитывались виртуальные геомагнитные полюсы (VGP). Амплитуда палеомагнитных вариаций S_b рассчитывалась традиционным способом [6] как среднеквадратичное отклонение индивидуальных VGP от их среднего. Для исключения переходных направлений мы использовали угол отсечения, который либо принимался равным 45° , либо рассчитывался итеративным методом Вандамма [12].

Результаты и их обсуждение

При анализе данных магнитной чистки в большинстве образцов ясно определяется характеристическая компонента намагниченности. В пределах сайтов рассчитанные для образцов направления хорошо группируются, кучность соответствующих распределений нередко достигает 100 или больших значений. В пользу первичности выделенной характеристической компоненты говорят положительный тест складок, результаты магнитоминералогических исследований [1], а также близость рассчитанного по характеристической компоненте среднего VGP к близкому по возрасту палеомагнитному полюсу, ранее определенному для региона [9].

По результатам сравнения средних палеомагнитных направлений последовательных вулканических потоков нами выделены 57 дирекционных групп и индивидуальных направлений и рассчитаны координаты соответствующего среднего виртуального геомагнитного полюса. Эти координаты составляют 170.0° E, 76.8° N с радиусом круга доверия $A95=5.2^\circ$ и означают, что исследуемые породы формировались гораздо севернее их современного положения в области очень высоких приполярных широт $\sim 80^\circ$ N.

Наши данные позволяют выполнить оценку амплитуды высокоширотных палеомагнитных вариаций в конце Мелового суперхрона. Эта оценка составляет 21.5° при 95 % доверительном интервале $19.3-24.0^\circ$.

Этот результат скорректирован за внутрисайтовый разброс и за межпотоковую корреляцию и, практически, не зависит от использованных критериев отбора данных. Полученный результат блестяще согласуется с другим единственным высокоширотным определением PSV для Мелового суперхрона [10] и с широтной зависимостью PSV для Мелового суперхрона, построенной на основании низко- и среднеширотных данных [7, 8].

Сравнение оценок, полученных нами и в работе [10], с высокоширотными данными по позднему Кайнозой (рис. 2) показывает, что амплитуда вековых геомагнитных вариаций на высоких широтах во время Мелового суперхрона была на $\sim 15\%$ меньше, чем в течение последних 10 млн лет (время относительно высокой частоты геомагнитных инверсий). Этот результат подтверждает возможную связь между вековыми вариациями и частотой геомагнитных инверсий и поддерживает гипотезу о том, что суперхрон является особым состоянием геодинамо, вызванным, вероятно, внешней причиной, связанной с мантийными геодинамическими процессами.

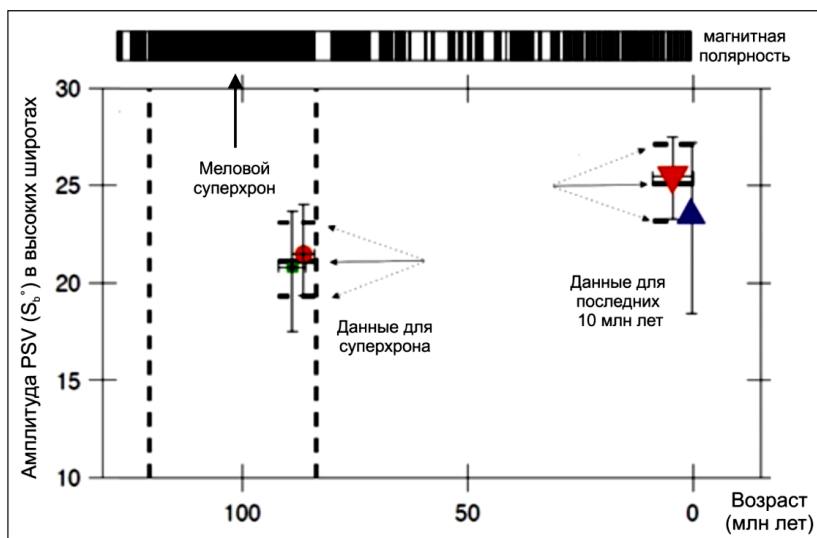


Рис. 2. Сравнение амплитуды высокоширотных геомагнитных палеовариаций (PSV) во время суперхрона (кружки) и во время высокой частоты геомагнитных инверсий в последние 10 млн лет (треугольники). Верхний кружок – наши данные, нижний – [10]; верхний и нижний треугольники – соответственно [7, 8].

Работа выполнена при поддержке РФФ, грант № 23-17-00112 (<https://rscf.ru/project/23-17-00112/>).

Список литературы

1. Лебедев И.Е., Бобровникова Е.М., Тихомиров П.Л. и др. Амплитуда вековых геомагнитных вариаций в позднем мелу по результатам палеомагнитных исследований вулканитов Охотско-Чукотского пояса верхнего течения реки Малый Аной (Западная Чукотка) // Физика Земли. 2022. № 2. С. 41-59.
2. Лебедев И.Е., Павлов В.Э., Минаев П.А. Ошибки ориентирования палеомагнитных образцов при использовании магнитного компаса и возможные пути их преодоления // Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. 2023. Т. 165. № 4. С. 633-645.
3. Тихомиров П.Л. Меловой окраинно-континентальный магматизм Северо-Востока Азии и вопросы генезиса крупнейших фанерозойских провинций кремнекислого вулканизма. М.: ГЕОС, 2020. 376 с.
4. Храмов А.Н., Гончаров Г.И., Комиссарова Р.А. и др. Палеомагнитология. Л.: Недра. 1982. 312 с.
5. Chenet A.-L., Fluteau F., Courtillot V. et al. Determination of rapid Deccan eruptions across the Cretaceous-Tertiary boundary using paleomagnetic secular variation: Results from a 1200-m-thick section in the Mahabaleshwar escarpment // Journal of Geophysical Research. 2008. V. 113. № B4. Art. B04101.
6. Cox A. Latitude dependence of the angular dispersion of the geomagnetic field // Geophysical Journal International. 1970. V. 20. P. 253-269.
7. Dembo N., Kraus E., Seliverstov I. et al. Geomagnetic field behaviour during the early Cretaceous normal superchron from palaeomagnetic analysis of the Ramon volcanics, Israel // Geophysical Journal International. 2022. V. 231. № 3. P. 1982-1995.
8. Doubrovine P.V., Veikkolainen T., Pesonen L.J. et al. Latitude dependence of geomagnetic paleosecular variation and its relation to the frequency of magnetic reversals: Observations from the Cretaceous and Jurassic // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2019. V. 20. № 3. P. 1240-1279.
9. Stone D.B., Layer P.W., Raikevich M.I. Age and paleomagnetism of the Okhotsk-Chukotka Volcanic Belt (OCVB) near Lake El'gygytgyn, Chukotka, Russia // Stephan Mueller Special Publication Series. 2009. V. 4. P. 243-260.
10. Tarduno J.A., Cottrell R.D., Smirnov A.V. The Cretaceous superchron geodynamo: Observations near the tangent cylinder // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2002. V. 99. № 22. P. 14020-14025.
11. Tauxe L. Essentials of Paleomagnetism. University of California Press, 2010. 489 p.
12. Vandamme D. A new method to determine paleosecular variation // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1994. V. 85. Is. 1-2. P. 131-142.

Массив Хангар (Срединный хребет, Камчатка): хронология эруптивной активности в позднемиоцен-четвертичное время

Певзнер М.М.¹, Толстых М.Л.², Лебедев В.А.³, Костицын Ю.А.², Бабанский А.Д.³, Овсянников Г.Н.⁴

Khangar massif (Sredinny Range, Kamchatka): chronology of Late Miocene-Quaternary eruptive activity

Pevzner M.M., Tolstykh M.L., Lebedev V.A., Kostitsyn Yu.A., Babansky A.D., Ovsiannikov G.N.

¹ Геологический институт РАН, г. Москва;

e-mail: m_pevzner@mail.ru

² Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

³ Институт геологии, геохимии и минералогии рудных месторождений РАН, г. Москва

⁴ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Впервые приводятся данные об изотопном К-Аг возрасте и механизме заложения кальдеры Хангар, а также шести этапов активизации посткальдерного вулканизма.

Хангар – уникальный для Камчатки вулканический центр; он расположен в пределах Срединно-метаморфического массива, составляющего южную часть Срединного хребта Камчатки (рис. 1, врезка). Массив Хангар представляет собой сложнопостроенную кальдеру (рис. 1б, 2а), внутри которой расположен одноименный стратовулкан (54°45' с.ш., 157°24' в.д., 2000 м), проявляющий активность в голоцене.

Степень изученности, постановка задачи

Возраст заложения кальдеры оценивается разными авторами от конца миоцена и постмиоценового времени [1, 5, 6] до среднего [7] или даже позднего неоплейстоцена [2]. Нет единства и в оценке причин ее образования. Так, например, согласно [5], кальдера имеет тектоническое происхождение и сформирована без участия вулканизма. А в работе [7], напротив, предполагается эксплозивная модель кальдерообразования с выбросом значительных объемов кислой пироклаستيку. Таким образом, на сегодняшний день вопрос о возрасте и характере происхождения кальдеры Хангар остается дискуссионным.

К моменту написания данной работы для доголоценовых вулканитов массива было опубликовано лишь несколько изотопных дат. По стекловатому дациту, опробованному в ЮВ части кальдеры, Аг-Аг методом были получены две даты около 0.4 млн лет [7]. Нами впервые были обнаружены и датированы К-Аг методом лавы начальной стадии вулканической активности (~7 млн лет), установлен возраст одной из подстилающих интрузий (~11 млн лет) внутри кальдеры [6].

Главная цель наших исследований – установить изотопный возраст заложения кальдеры Хангар и этапов активизации посткальдерного вулканизма.

Заложение кальдеры, излияние ранних эффузивов массива Хангар

Наиболее ранним проявлениям вулканической активности (I этап) в пределах кальдеры Хангар отвечают сильно разрушенные лавы, перекрывающие гипабиссальные гранитные интрузии, которые выходят на поверхность в южной части кальдеры (рис. 1). Нами обнаружены всего четыре выхода этих лав, три из них датированы в интервале 7.2-7.0 млн л.н. Абсолютная высота залегания этих лав (700-1100 м) существенно меньше, чем высота бровки кальдеры (1300-1800 м). Следовательно, лавы изливались уже внутри кальдеры, а сама кальдера не может быть моложе 7 млн лет. С другой стороны, кальдера не может быть древнее 11 млн лет – в это время происходило внедрение интрузии, т.е. породы фундамента еще не были разрушены.

В миоцене внедрение интрузий было характерно, в основном, для северной части Срединно-метаморфического массива [6]. На рис. 1а видно, что в интервале 19-8 млн л.н.

интрузивный процесс шел периодически. Этот тектоно-магматический цикл активизации с режимом растяжения неизбежно приводил к воздыманию гранитно-метаморфического свода и, как следствие, к его активному разрушению (эродированные интрузии). По-видимому, на завершающей стадии цикла магма заполнила близповерхностный резервуар. Это привело к локальному подъему вмещающих пород с образованием купольной структуры, а также к заложению кольцевых разломов и глубоких трещин. С трещинами могла быть связана умеренная газо-пирокластическая активность. Заложение кальдерной депрессии было обусловлено опусканием пород купола, вследствие чего по трещинам, ограничивающим опущенный блок, происходило излияние лав I этапа. Одна из таких даек, прорывающая гранитную интрузию, была датирована нами на ЮЗ борту кальдеры (рис. 1б). Лавы I этапа представлены высоко-Mg основными андезитами; для извержения подобных пород высокая эксплозивность не характерна. Ни внутри, ни за пределами кальдерного уступа пирокластические отложения этого возраста не установлены. Вряд ли в это время возник крупный щитовой вулкан, более вероятным представляется образование некоторого количества мелких лавовых тел по периферии кальдеры. При этом объем образованной депрессии мог в разы превышать объем излившихся лав. Значительная разница в объемах излившихся лав и сформированной депрессии зарегистрирована, например, при заложении кальдеры на вулкане Фернандина в 1968 г. [9, 10]. Таким образом, кальдера Хангар заложилась около 7 (7.2-7.0) млн л.н. как вулканотектоническая кальдера обрушения.

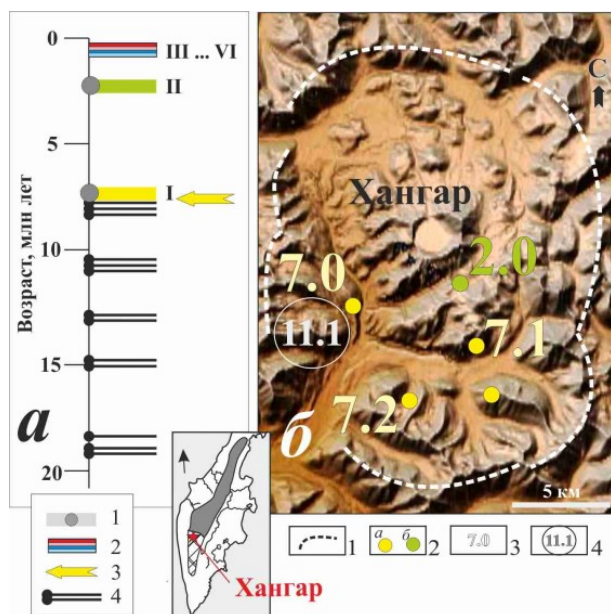


Рис. 1. Тектоно-магматическая и вулканическая активность в районе массива Хангар. На врезке положение массива на карте Камчатки. *а* – хронология тектоно-магматической и вулканической активности района в миоцен-раннечетвертичное время: 1-2 – этапы вулканической активности, черная точка – К-Аг возраст, 3 – эпизод заложения кальдеры, 4 – возраст интрузий южной части Срединного хребта по [2-4, 6]; *б* – ранние эффузивы Хангара: 1 – уступ кальдеры, 2 – выходы лав: *а* – I этапа (~7 млн лет), *б* – II этапа (~2 млн лет), 3-4 – округленный К-Аг возраст, млн лет: 3 – для лав, 4 – для интрузии. Прочие пояснения см. в тексте и на рис. 2.

Посткальдерный вулканизм четвертичного времени

II этап активизации вулканизма зафиксирован ~2 млн л.н. по лавам в верхнем течении руч. Водопадный (рис. 1). Либо этому этапу предшествовал длительный (около 5 млн лет) период покоя, либо породы с возрастом 7-2 млн лет не обнаружены.

III этап маркируется десятком крупных дацитовых экстрезивных куполов, приуроченных к кольцевым или полукольцевым структурам (рис. 2а). С куполами связаны потоки стекловатых дацитов преимущественно черного цвета, реже туфы. Возраст пород около 0.4 млн лет (рис. 2б). По морфологии и текстурам лав эти купола занимают промежуточное положение между экстрезиями и очень вязкими лавами; такой тип вулканизма обычно приурочен к трещинам, в том числе кольцевым, и не подразумевает значительной эксплозивной активности [8]. Не исключено, что на этом этапе могла произойти просадка северной части кальдеры.

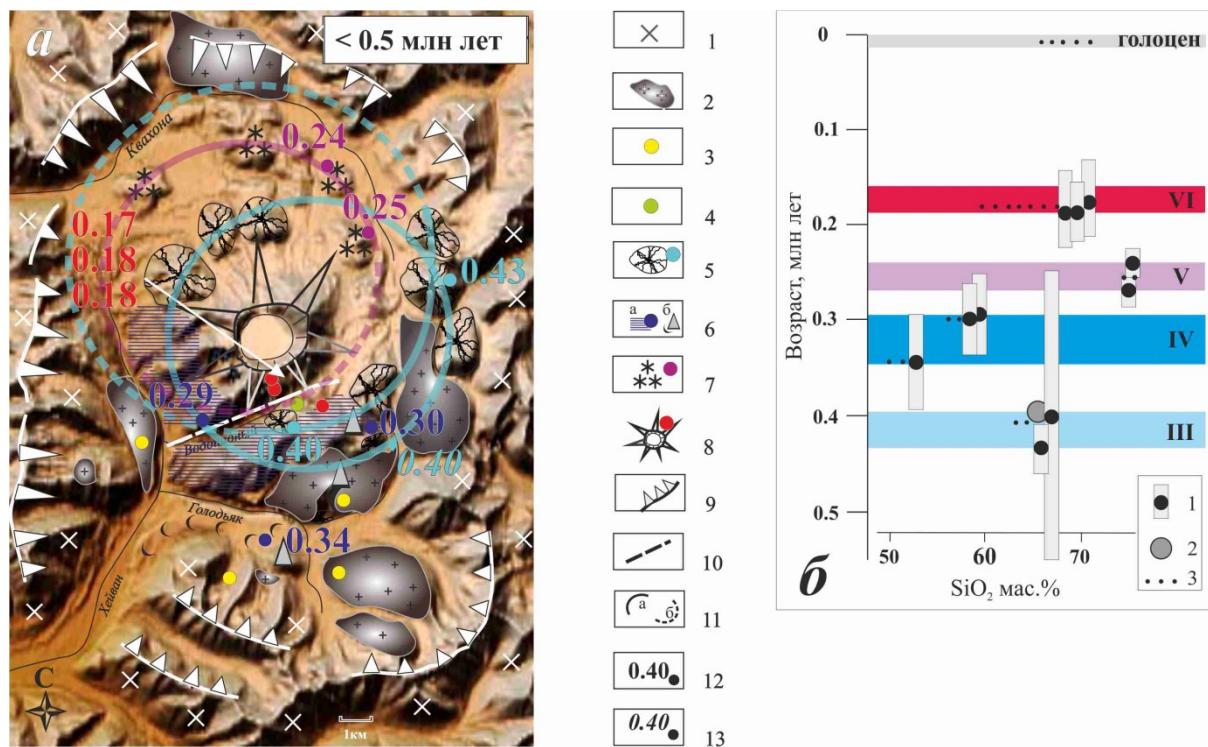


Рис. 2. Возраст пород массива Хангар (а): 1-2 – породы основания массива: 1 – мел-палеогенового возраста нерасчлененные, 2 – интрузии миоценового возраста; 3-4 – выходы лав: 3 – ~7 млн лет (этап I), 4 – ~2 млн лет (этап II); 5 – дацитовые купола, туфы и потоки обсидианов (этап III, ~0.4 млн лет); 6 – щитовой вулкан (а), шлаковые конусы и лавовые потоки (б) (этап IV, ~0.3 млн лет); 7 – риолитовые купола, туфы и потоки обсидианов (этап V, ~0.25 млн лет); 8 – постройка стратовулкана (этап VI, <0.18 млн лет); 9 – современный кальдерный уступ; 10 – разлом ручья Водопадного по [5]; 11 – кольцевые разломы (цвет линий соответствует символам пород 5-8): а – достоверные, б – предполагаемые; 12-13 – округленные изотопные даты в млн лет: 12 – К-Аг авторские, 13 – Аг-Аг по [7]. (б) – хронология эруптивной активности массива за последние 0.5 млн лет: 1 – значение К-Аг возраста (черная точка) с доверительным интервалом (серый фон), авторские данные; 2 – Аг-Аг дата из [7]; 3 – показатели кремнекислотности для пород выделенных этапов. Этапы: I – ранние эффузивы, II – лавы ~2 млн лет, III – дацитовые купола, обсидианы и туфы, IV – андезитовый щитовой вулкан центрального типа и наложенная цепочка базальтовых шлаковых конусов, V – риолитовые купола, обсидианы и туфы, VI – начало формирования андезидацитового стратовулкана. Голоценовые дациты (в работе не обсуждаются).

IV этап. Около 0.3 млн л.н. образуется андезитовый вулкан центрального типа (рис. 2а). Крупные фрагменты его постройки слагают ЮЗ сектор основания стратовулкана Хангар, аналогичные по типу породы установлены и на водоразделе ручьев Водопадный и Голодьяк. На этом этапе сформировались шлаковые конусы, образующие цепочку ССЗ простирания: наиболее крупные лавовые излияния приурочены к конусу Голодьяк, который расположен в южной части кальдеры в долине одноименного ручья. На рис. 2б видно, что доверительные интервалы дат по вулкану и конусу перекрываются. Морфологически конус Голодьяк появился позже, чем сформировался вулкан.

V этап отмечен извержением около 0.25 млн л.н. самых кислых пород в истории массива (рис. 2б). В северной части кальдеры расположено не менее четырех крупных риолитовых куполов, приуроченных к полукольцевой структуре (рис. 2а), с ними связаны небольшие проявления туфов и обсидианов. Выжимание экструзивно-эффузивных куполов, также как и на III этапе (дацитовые купола), не сопровождалось существенной эксплозивной активностью.

VI этап датируется около 0.18 млн л.н. (рис. 2б) и отвечает началу формирования конуса стратовулкана (рис. 2а). В строении конуса отчетливо

прослеживается переслаивание мощных горизонтов лав и пирокластики андезидацитового состава. Именно в это время в массиве Хангар начинаются крупные эксплозивные извержения, тефра которых могла распространяться далеко за пределы кальдеры. Примечательно, что лавы стратовулкана обнаружены (и датированы) на водоразделе ручьев Водопадный и Голодьяк. Очевидно, что поперечник вулкана был существенно больше, чем в наши дни. Кроме того, лавы не могли бы дотечь сюда, если бы тогда уже существовала глубокая долина руч. Водопадный. Следовательно, заложение разлома руч. Водопадный могло произойти в более позднее время, т.е. уже после 0.18 млн л.н.

Выводы

Впервые установлен К-Аг возраст (~7 млн лет) заложения кальдеры Хангар – вулcano-тектонической кальдеры обрушения. Предложен механизм ее образования. Событие сопровождалось незначительной эффузивной активностью.

Выделены и датированы шесть этапов посткальдерной вулканической активности (~2; 0.4; 0.3; 0.25 и 0.18 млн л.н.). Показано, что высокая эксплозивность характерна только для извержений наиболее молодого этапа (<0.18 млн л.н.), на этом же этапе произошло заложение разлома ручья Водопадный.

Работа выполнена в соответствии с Госзаданиями ГИН РАН и ГЕОХИ РАН.

Список литературы

1. Балугев Э.Ю., Перепелов А.Б., Базанова Л.И., Пузанков М.Ю. Геологическое строение и эволюция вулканизма Хангарской вулканотектонической структуры // Вулканизм, структуры и рудообразование. Тезисы VII вулканологического совещания. Иркутск, 1992. С. 42-43.
2. Государственная геологическая карта РФ. М-6 1:200 000. Издание второе. Серия Хангарская. Лист N-57-VIII. СПб: ВСЕГЕИ. 2010.
3. Государственная геологическая карта РФ. М-6 1:200 000. Издание второе. Серия Хангарская. Лист N-57-XIV. СПб: ВСЕГЕИ. 2010.
4. Колосков А.В., Коваленко Д.В. Новые возрастные датировки проявления кайнозойского магматизма на Камчатке // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2009. № 1. Вып. 13. С. 231-236.
5. Кутыев Ф.Ш., Лебедев М.М., Максимовский В.А. О природе вулcano-тектонической структуры Хангар // Известия высш. учеб. заведений. Геология и разведка. 1976. № 7. С. 35-46.
6. Певзнер М.М., Вольнец А.О., Лебедев В.А. и др. Начало вулканической деятельности в пределах Срединно-метаморфического массива (Срединный хребет, Камчатка) // Доклады Академии наук. 2017. Т. 475. № 5. С. 546-550. DOI: 10.7868/S0869565217230153
7. Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E. et al. Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar–Ar and U–Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2010. V. 189. P. 57-80. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2009.10.009
8. Calder E.S., Lavallée Y., Kendrick J.E., Bernstein M. Lava Dome Eruptions // The encyclopedia of volcanoes. Chapter 18. 2015. P. 343-362. DOI: 10.1016/B978-0-12-385938-9.00018-3
9. Corbi F., Rivalta E., Pinel V. et al. How caldera collapse shapes the shallow emplacement and transfer of magma in active volcanoes // Earth and Planetary Science Letters. 2015. V. 431. P. 287-293. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.09.028
10. Howard K.A., Simkin T., Geist D.J. et al. Large hydromagmatic eruption related to Fernandina Volcano's 1968 caldera collapse – Deposits, landforms, and ecosystem recovery // Field Volcanology: A Tribute to the Distinguished Career of Don Swanson / Eds: M.P. Poland, M.O. Garcia, V.E. Camp, A. Grunder. 2019. V. 538. DOI: 10.1130/2018.2538(18)

Индикаторная роль элементов платиновой группы в установлении источников щелочно-базальтовых и НЕВ-адакитовых магм кайнозойских вулканических комплексов Камчатки

Перепелов А.Б.¹, Пузанков М.Ю.², Иванов А.В.³, Палесский С.В.⁴, Цыпукова С.С.¹, Щербаков Ю.Д.¹, Жгилев А.П.¹

Indicator role of platinum group elements in determining the sources of alkaline-basalt and NEB-adakite magmas of Cenozoic volcanic complexes of Kamchatka

Perepelov A.B., Puzankov M.Yu., Ivanov A.V., Palesskii S.V., Tsyrukova S.S., Shcherbakov Yu.D., Zhgilev A.P.

¹ *Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, г. Иркутск;*

e-mail: alper@igc.irk.ru

² *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

e-mail: puzankov@kscnet.ru

³ *Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск;*

e-mail: aivanov@crust.irk.ru

⁴ *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск;*

e-mail: stas@igm.nsc.ru

Кайнозойские К-На щелочные и субщелочные базальты, а также породы НЕВ-адакитовой ассоциации Камчатки в сравнении с базальтами надсубдукционных вулканических поясов (IAB) обеднены элементами платиновой подгруппы (Pd, Pt). Одним из источников таких магм может являться субдуцированная и эклогитизированная океаническая литосфера.

В кайнозойской истории геодинамического развития структуры Камчатки, помимо формирования собственно надсубдукционных вулканических поясов, проявлялись магмы К-На и калиевого щелочного и субщелочного типов, а также магмы НЕВ-адакитового и Mg# андезитового составов. Районы проявления таких типов магм приурочены, главным образом, к тыловым зонам и зонам деструкции литосферы, в частности, к поперечным разломным структурам активной окраины. Если источниками надсубдукционных магм является вещество литосферной мантии, метасоматизированной при участии гидратированного флюида, отделяющегося от океанической литосферы в процессе ее активной субдукции, то вопросы о происхождении щелочно-базальтовых и примитивных кислых магм в таких обстановках остаются дискуссионным.

В поисках возможных источников магм К-На щелочного и субщелочного типов, а также магм НЕВ-адакитового и Mg# андезитового составов, рассмотрены закономерности распределения в породах элементов платиновой группы (ЭПГ). В анализ включены оригинальные и литературные данные по содержаниям в вулканических породах Камчатки отдельных элементов иридиевой (Os, Ir) и платиновой подгрупп (Pd, Pt). Изучение характера распределения ЭПГ в вулканических породах Камчатки проведено с использованием диаграмм (Os+Ir)-(Pd+Pt) (рис. 1-4). Аналитические исследования оригинальной коллекции вулканических пород выполнены в ИГМ СО РАН по методике [1].

Особенности распределения ЭПГ в вулканических породах определяются, с одной стороны, природой и составом источников магм, а с другой – условиями магмообразования и дифференциации магм с участием богатых ЭПГ фаз, к примеру, сульфидных или самородных [4]. Установлено, что кайнозойские К-На щелочные и субщелочные базальты Западной Камчатки, Срединного хребта и Восточной Камчатки, а также породы НЕВ-адакитовой ассоциации Центральной Камчатской депрессии (ЦКД) обеднены элементами платиновой подгруппы (Pd, Pt) в сравнении с породами надсубдукционных вулканических поясов (рис. 1, 2; табл.). В то же время, щелочные и субщелочные породы калиевого ряда Западной Камчатки и Срединного хребта по характеру распределения в них ЭПГ соответствуют породам IAB типа.

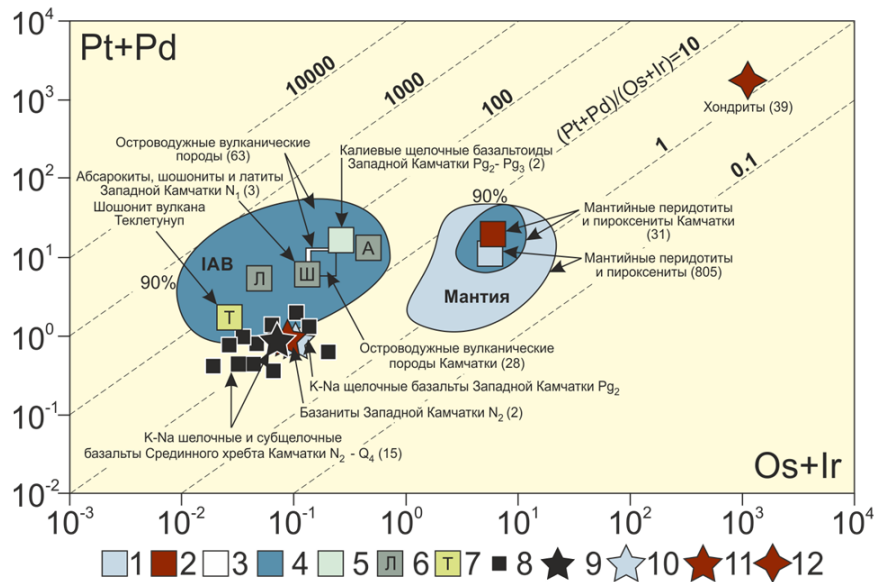


Рис. 1. Распределение элементов платиновой группы (ЭПГ), в литосферной мантии, вулканических породах островных дуг (IAB) и в K-Na и калиевых щелочных и субщелочных вулканических породах Камчатки.

Содержания ЭПГ в ppb, шкала логарифмическая. В скобках указано количество анализов для полей составов и средних составов пород. Поля составов пород приведены для 90% доверительного интервала. Точки составов: 1 – средний состав перидотитов и пироксенитов различных районов Мира; 2 – средний состав перидотитов и пироксенитов Камчатки; 3 – средний состав вулканических пород островных дуг; 4 – средний состав пород островодужного геохимического типа Камчатки по литературным и неопубликованным данным авторов; 5 – средний состав позднеэоцен-раннеолигоценовых калиевых щелочных базальтов Западной Камчатки; 6 – составы ранне-среднемиоценовых абсарокитов (А), шошонитов (Ш) и латитов (Л) Западной Камчатки; 7 – средний состав шошонитов и латитов вулкана Теклетунуп; 8-9 – составы (8) и средний состав (9) позднеплиоцен-плейстоценовых K-Na щелочных и субщелочных базальтов Срединного хребта Камчатки; 10 – состав среднеэоценовых K-Na щелочных базальтов Западной Камчатки; 11 – средний состав раннеплиоценовых базанитов Западной Камчатки (2); 12 – средний состав хондритовых метеоритов (39).

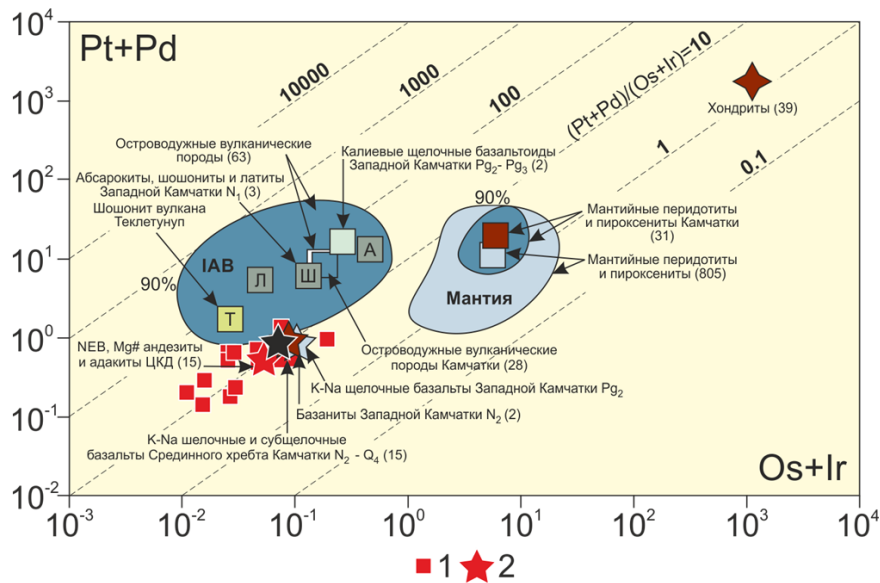


Рис. 2. Распределение элементов платиновой группы (ЭПГ) в литосферной мантии, вулканических породах островных дуг (IAB) и в породах NEB-адакитовой ассоциации ЦКД. Камчатки.

Точки составов: 1 – составы и 2 – средний состав (15) пород NEB-адакитовой ассоциации ЦКД. Другие обозначения см. на рис. 1.

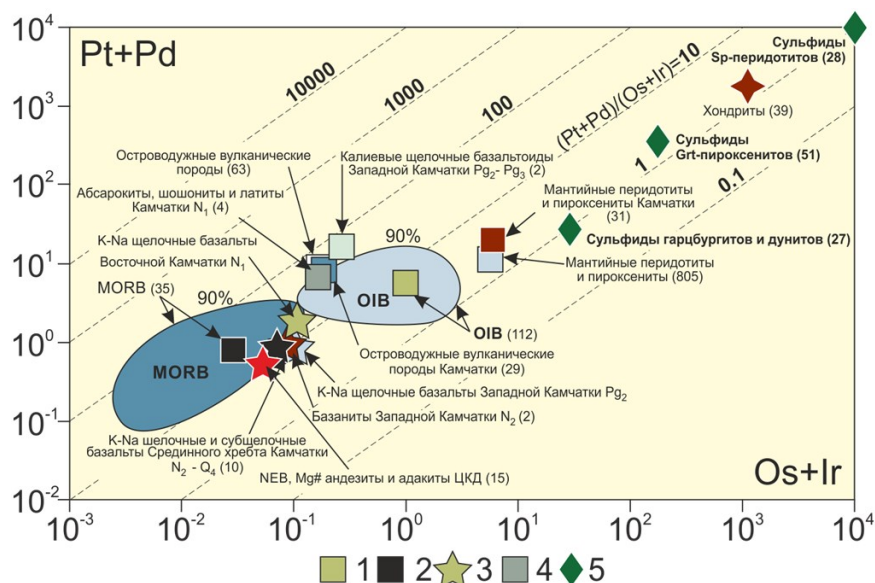


Рис. 3. Распределение элементов платиновой группы (ЭПГ) в базальтах OIB и MORB геохимических типов и в вулканических породах Камчатки. Точки составов: 1 – средний состав базальтов океанических островов (OIB); 2 – средний состав базальтов океанической коры (MORB); 3 – состав позднемиоценового К-На щелочного базальта Восточной Камчатки (образец из коллекции О.Н. Волынца); 4 – средний состав пород ранне-среднемиоценовой абсарокит-шошонит-латитовой серии Западной Камчатки и раннеплиоценовых пошошонитов вулкана Теклетунуп; 5 – составы сульфидов из пород литосферной мантии. Другие обозначения см. на рис. 1, 2.

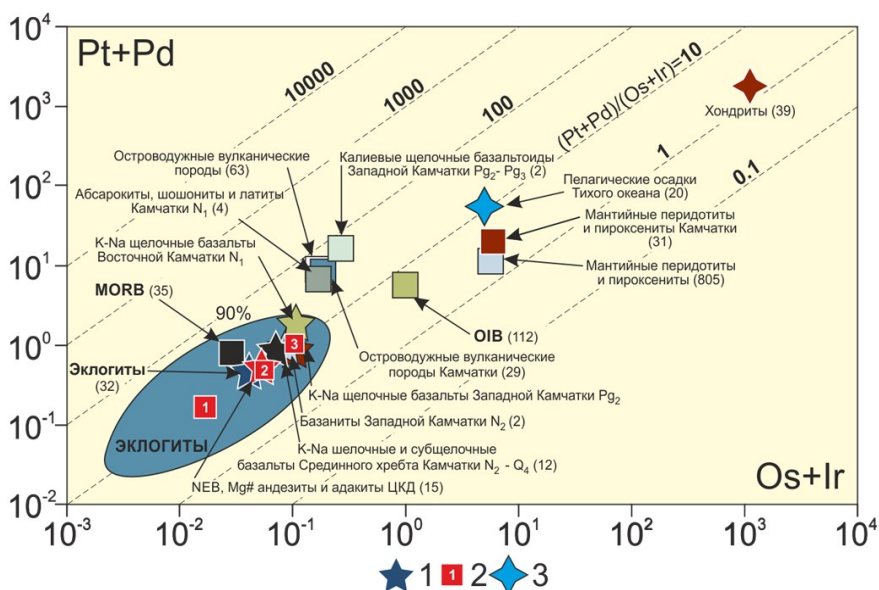


Рис. 4. Распределение элементов платиновой группы (ЭПГ) в эклогитах эксгумированной океанической литосферы и в вулканических породах Камчатки. Точки составов: 1 – средний состав эклогитов эксгумированной океанической литосферы [2]; 2 – средние составы эклогитизированных базальтов (1), эклогитизированных габбро (2) и габбро (3) эксгумированной океанической литосферы [2]; 3 – сухие пелагические осадки южной части Тихого океана [3]. В средний состав эклогитов включены составы эклогитизированных базальтов и эклогитизированных габбро [2]. Другие обозначения см. на рис. 1, 2, 3.

Сравнение составов К-На щелочных и субщелочных базальтов, а также пород НЕВ-адакитовой ассоциации ЦКД с базальтами MORB и с эклогитами эксгумированной океанической литосферы указывает на сходство в них концентраций ЭПГ (рис. 3, 4; табл.). При этом резервуары типа перидотит-пироксенитовой литосферной мантии и OIB имеют более высокие содержания ЭПГ (рис. 2, 3).

Таблица. Содержания элементов платиновой группы и Re (ppb) в вулканических породах Камчатки, базальтах островных дуг и океанических осадках

Порода	Возраст	n*	Os	Ir	Ru	Pt	Pd	Re
SED		20	4.386	0.216	4.252	33.399	17.583	0.276
IAB		63	0.076	0.103	0.182	4.299	5.438	0.290
IAB-K	N ₂ -Q ₄	28	0.115	0.073	0.273	3.495	5.061	0.263
АШЛ-ЗК	N ₁	3	0.094	0.121	0.180	3.675	4.451	0.364
КЦ-ЗК	N ₁	2	0.115	0.147	0.245	7.408	8.941	0.389
ЩБ-ЗК	Pg ₂	1	0.049	0.053	1.428	0.670	0.205	0.512
ЩБ-ВК	N ₁ -N ₂	1	0.053	0.052	0.105	1.654	0.252	0.055
ТБ-СХ	N ₂ -Q ₄	12	0.056	0.016	0.184	0.578	0.296	0.294
БЗ-ЗК	N ₂	2	0.035	0.056	0.591	0.586	0.376	0.131
AD	N ₂ -Q ₁	12	0.024	0.038	0.061	0.362	0.281	0.158

Примечание. SED – сухие пелагические осадки южной части Тихого океана [3]; IAB – базальты островных дуг; IAB-K – базальты надсубдукционных плиоцен-четвертичных вулканических поясов Камчатки; АШЛ-ЗК – породы ниже-среднемиоценовой абсарокит-шошонит-латитовой серии Западной Камчатки и раннеплиоценовых шошонитов вулкана Теклетунуп Срединного хребта Камчатки; КЦ-ЗК – среднемиоценовые шонкиниты и трахибазальты калиевой щелочной серии Западной Камчатки; ЩБ-ЗК – среднеэоценовые щелочные и субщелочные базальты дайковых комплексов Западной Камчатки; ЩБ-ВК – позднемиоценовые щелочные базальты Восточной Камчатки; ТБ-СХ – позднеплиоцен-четвертичные щелочные и субщелочные базальты Срединного хребта Камчатки; БЗ-ЗК – раннеплиоценовые базаниты Западной Камчатки; AD – позднеплиоцен-раннечетвертичные породы NEB-адакитовой и Mg# андезитовой ассоциации ЦКД. n* – количество анализов для подсчета среднего.

Известно, что если в процессе активной субдукции гидратированный флюид способен в относительной степени обогащать расплавы Pd и Pt, то при высокобарическом преобразовании погруженной в мантию субдуцированной океанической литосферы происходит обеднение рестиита относительно этих элементов [2].

Предполагается, что одним из источников K-Na щелочных и субщелочных базальтовых магм, а также магм NEB-адакитовой ассоциации Камчатки может являться высокобарически преобразованное вещество океанической литосферы, субдуцированной на предшествующих этапах конвергенции литосферных плит.

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00825 (<https://rscf.ru/project/22-27-00825/>).

Список литературы

1. Козьменко О.А., Палесский С.В., Николаева И.В. и др. Усовершенствование методики химической подготовки геологических образцов в трубках Кариуса для определения элементов платиновой группы и рения // Аналитика и контроль. 2011. Т. 15(4). С. 378-385.
2. Dale C.W., Burton K.W., Pearson D.G. et al. Highly siderophile element behaviour accompanying subduction of oceanic crust: Whole rock and mineral-scale insights from a high-pressure terrain // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. V. 73. P. 1394-1416. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.11.036>
3. Lee C.A., Wasserburg G.J., Kyte F.T. Platinum-group elements (PGE) and rhenium in marine sediments across the Cretaceous–Tertiary boundary: Constraints on Re-PGE transport in the marine environment // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2003. V. 67(4). P. 655-670. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)01135-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)01135-3)
4. Zelenski M., Kamenetsky V.S., Mavrogenes J.A. et al. Platinum-group elements and gold in sulfide melts from modern arc basalt (Tolbachik volcano, Kamchatka) // *Lithos*. 2017. V. 290-291. P. 172-188. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.08.012>

Яр Девичий (Центральная Камчатская депрессия): окно в историю эксплозивного вулканизма и изменений природной среды Камчатки за последние 200 тысяч лет
Пономарева В.В.¹, Дирксен О.В.¹, Зеленин Е.А.², Портнягин М.В.³, Базанова Л.И.¹, Бубенщикова Н.В.⁴, Горбаренко С.А.⁵, Горбач Н.В.¹, Деркачев А.Н.⁵, Овсянников Г.Н.⁶, Rogozin A.N.¹

Devichii bluff (Central Kamchatka Depression): a window into the history of explosive volcanism and environmental change over the past 200 ka

Ponomareva V.V., Dirksen O.V., Zelenin E.A., Portnyagin M.V., Bazanova L.I., Bubenshchikova N.V., Gorbarenko S.A., Gorbach N.V., Derkachev A.N., Ovsyannikov G.N., Rogozin A.N.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; e-mail: ponomareva@kscnet.ru*

² *Геологический институт РАН, г. Москва*

³ *GEOMAR Helmholtz Centre for Ocean Research, г. Киль, Германия*

⁴ *Институт океанологии РАН, г. Москва*

⁵ *Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН, г. Владивосток*

⁶ *Геологический факультет МГУ, г. Москва*

Целью наших тефрохронологических исследований в Центральной Камчатской депрессии является реконструкция хронологии сильных эксплозивных извержений и природных изменений на Камчатке за последние ~330 тысяч лет. В данной работе мы представляем результаты изучения горизонтов тефры, захороненных в отложениях возрастом ≤ 200 тыс. лет, вскрытых в яре Девичьем.

Хронология эксплозивного вулканизма Камчатки за последние сотни тысяч лет до сих пор восстановлена лишь частично. Детальным реконструкциям режима эксплозивной активности за пределами возможностей радиоуглеродного метода (>50 тыс. лет) препятствуют как сложная стратиграфия проксимальных пирокластических отложений, частично уничтоженных эрозией, так и трудности в оценке их возраста. Отсутствие надежной хронологии крупных эксплозивных извержений не позволяет рассматривать вопросы соотношения периодов повышенной вулканической активности с климатическими изменениями или с тектоническими событиями, и в конечном итоге препятствует пониманию причин вулканических активизаций. Большой прогресс в изучении хронологии средне-позднеплейстоценовых эксплозивных извержений был достигнут в результате изучения непрерывных последовательностей горизонтов тефры в морских и озерных осадочных колонках, для которых разработаны возрастные модели. Одним из примеров подобных исследований может служить изучение колонок морских отложений в СЗ части Тихого океана, в результате которого удалось реконструировать хронологию крупнейших пеплопадов в этом районе за последние 6.2 млн лет и идентифицировать вулканы-источники для некоторых пеплов [6, 9].

В последние годы мы ведем исследования горизонтов тефры в осадках Центральной Камчатской депрессии (ЦКД). Эти отложения описывались многими авторами, начиная с 1940 г., однако их возраст остается предметом дискуссий [1-5]. Оказалось, что геохимические исследования тефры из осадков ЦКД дают возможность коррелировать ее горизонты как между соседними разрезами, так и с пеплами из других районов Камчатки, а также из изученных ранее морских осадочных колонок. Сопоставление стратиграфических последовательностей пеплов из разных разрезов позволяет уточнить общую хронологию эксплозивных извержений и вписать в нее другие отложения, указывающие на крупные изменения природной обстановки. В данной работе мы рассмотрим одно из изученных нами обнажений – это яр Девичий (правый борт р. Камчатка) (рисунок).



Рисунок. Общий вид и детали обнажения яра Девичий. а – общий вид обрыва высотой около 80 м. М – моренные отложения. Желтый прямоугольник показывает положение двух человек на склоне; б – отложения средней части обнажения (выше моренных) с частыми горизонтами пеплов. Посередине справа – фигура человека для масштаба; в – толщина моренных отложений, положение двух горизонтов тефры отмечено желтыми кружками.

В отложениях ЦКД описано пять главных пачек [1, 2]. Это снизу вверх: (1) озерные «синие глины», (2) аллювиальные «косослоистые пески», (3) моренные отложения, (4) аллювиальные межледниковые отложения, 5) покровные супеси. Обнажение яра Девичьего (54.9628°с.ш., 158.9889°в.д.) вскрывает четыре из них, кроме самой нижней толщи «синих глин», которая здесь замещается горизонтом гравия [1]. Нам удалось отобрать образцы тефры из всех толщ яра Девичьего, включая переотложенную водным потоком пемзу из «косослоистых песков», образцы из двух горизонтов тефры в моренных отложениях (рисунок, в) и 43 образца тефры из толщи покровных супесей (рисунок, б). Геохимические исследования частиц стекловидной тефры с определением содержаний главных и рассеянных элементов были проведены с использованием электронного микрозонда и масс-спектрометрии индукционно-связанной плазмы с лазерной абляцией (LA-ICP-MS) в Гельмгольц Центре исследования океана ГЕОМАР и Университете г. Киль (Германия). Для установления корреляций между разрезами и оценки возраста горизонтов тефры полученные данные были сопоставлены с нашими данными о составе пирокластике вулканов Камчатки и пеплов из морских осадочных колонок [6, 9, 10].

Обильный пемзовый гравий в «косослоистых песках» по составу стекловидной тефры отвечает преимущественно пирокластике Срединного хребта и больше всего

напоминает ряд тефр из толщи «синих глин» [5], которая в этом яру не вскрыта, но залегает ниже толщи «косослоистых песков» в других обнажениях [1].

Обе тефры в моренных отложениях нашли свои аналоги в других разрезах, что позволяет оценить возраст морены (таблица). Нижняя тефра отвечает по составу широко распространенной в ЦКД тефре вулкана Хангар возрастом ~170 тыс. лет [5]. Верхняя тефра в морене отвечает по составу мощной пирокластике в основании разреза на р. Узон, а также тефре, обнаруженной в осадочной колонке LV76-18-1 на подводной г. Тендзи (Императорский подводный хребет). Согласно возрастной модели этой колонки, возраст тефры, залегающей на глубине 584 см, составляет ~210 тыс. лет [7]. Таким образом, в морене залегают пеплы возрастом примерно 210 и 170 тыс. лет, что дает представление о времени максимального выдвигания ледников в ЦКД. Наши данные подтверждают представление О.А. Брайцевой и др. [1] о среднеплейстоценовом возрасте этих моренных отложений и говорят о том, что оледенение было приурочено к морской изотопной стадии (МИС) 6 и второй половине МИС 7. Такая оценка возраста морены также соответствует ее положению выше толщи «синих глин», для кровли которой нами были ранее получены оценки около 300 тыс. лет [5]. Наличие стратификации и инверсия стратиграфического положения пеплов вполне допустимы в конечно-моренном комплексе, однако отложение морены в ЦКД в середине теплой МИС 7 (243-191 тыс. л.н.) – это неожиданный результат. В то же время, некоторые исследования указывают на то, что изменения ледовых условий в СВ Азии происходили не синхронно с таковыми в Северной Атлантике, в частности, последний максимум оледенения здесь имел место на 20 тыс. лет раньше, чем глобальный LGM [например, 8]. Возможно, аналогичная асинхронность была проявлена и во время предыдущего оледенения. Тем не менее, для уверенного подтверждения возраста ледников МИС 7-6 на Камчатке нам потребуются дополнительные исследования.

Таблица. Пеплы яра Девичьего (сверху вниз), для которых найдены аналоги в море и на суше

Номер образца	Источник	Корреляции с другими разрезами (номер осадочной колонки)	Возраст тефры (тысяч лет)
KRT-14	Восточная зона	оз. Кроноцкое, р. Андриановка	30-40
KRT-11	кальдера Узон	Долина Гейзеров, оз. Кроноцкое, р-н г. Лызык	40-50
KRT-6, -7	Восточная зона	р. Андриановка	70
KRT-5	влк. Шивелуч	р. Андриановка, оз. Кроноцкое, влк. Шивелуч	70-74
K16-7-1-3	Восточная зона	р. Андриановка, Охотское море (MD01-2415)	144
202306-6	Восточная зона	р. Андриановка, Охотское море (MD01-2415)	173
202306-11	влк. Шивелуч	Берингово море (SO201-2-81, -85)	163
202307-8	влк. Горелый	Тихий океан, г. Детройт (MD01-2416; ODP145-884B)	158-170
KRT2-4T	кальдера Узон	р. Узон; Тихий океан, г. Тендзи (Lv76-18)	210
KRT2-3T	влк. Хангар	яры по р. Камчатка, р. Андриановка, Ветловая	170

Вышеописанные корреляции позволяют также выявить крупное эксплозивное извержение в пределах кальдеры Узон и оценить его возраст примерно в 210 тыс. лет.

В покровных супесях, залегающих над моренными отложениями Девичьего яра, обнаружены тефры возрастом в интервале 170-30 тыс. лет (таблица). Инверсии в оценках возраста этих пеплов отражают неточности возрастных моделей различных осадочных колонок или различные методы оценки возраста наземных отложений. Сопоставление последовательностей горизонтов пеплов из всех яров среднего течения р. Камчатка и ее притоков позволят преодолеть разночтения и выстроить единую хронологию извержений.

Экспедиционные исследования и геохимическое изучение тефры проведены при поддержке проектов РФФ № 21-77-10102, руководитель Е.А. Зеленин (<https://rscf.ru/project/21-77-10102/>) и № 22-17-00074, руководитель В.В. Пономарева (<https://rscf.ru/project/22-17-00074/>). Материал для исследования пеплов в морских осадочных колонках был получен в рамках Госзадания по теме № 124022100084-8 Минобрнауки РФ; обработка данных выполнена при поддержке гранта РФФ № 22-17-00118, руководитель С.А. Горбаренко (<https://rscf.ru/project/22-17-00118/>).

Список литературы

1. *Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Евтеева И.С., Лупкина Е.Г.* Стратиграфия четвертичных отложений и оледенения Камчатки / Отв. ред. В.Н. Олюнин. Москва: Наука, 1968. 227 с.
2. *Брайцева О.А., Мелекесцев И.В., Сулержицкий Л.Д.* Новые данные о возрасте плейстоценовых отложений Центральной Камчатской депрессии // Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2005. Т. 13. № 1. С. 121-130.
3. *Куприна Н.П.* Стратиграфия и история осадконакопления плейстоценовых отложений Центральной Камчатки // Труды ГИН АН СССР. Вып. 216. М.: Наука, 1970. 148 с.
4. *Певзнер М.М., Яшина О.В., Смышляева О.И. и др.* Опорные разрезы рыхлых отложений позднего-среднего плейстоцена Камчатки: современное состояние, проблема возраста и перспективы изучения // Литология и полезные ископаемые. 2019. № 1. С. 60-89. <https://doi.org/10.31857/S0024-497X2019160-89>
5. *Пономарева В.В., Портнягин М.В., Зеленин Е.А. и др.* Плейстоценовые озерные отложения Камчатки как богатейший природный архив данных об эксплозивной вулканической активности в последние ~300 тысяч лет // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXV Всероссийской научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2022 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 70-73.
6. *Derkachev A.N., Nikolaeva N.A., Gorbarenko S.A. et al.* Tephra layers in the Quaternary deposits of the Sea of Okhotsk: Distribution, composition, age and volcanic sources // Quaternary International. 2016. V. 425. P. 248-272. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.07.004>
7. *Gorbarenko S.A., Shi X., Liu Y. et al.* Iceberg discharge events in the northwest Pacific and related sequence of Kamchatka glaciations over the last 190 kyr // Quaternary Science Reviews. 2022. V. 278. Art. 107349. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107349>
8. *McCarron A.P., Bigg G.R., Brooks H. et al.* Northwest Pacific ice-rafted debris at 38°N reveals episodic ice-sheet change in late Quaternary Northeast Siberia // Earth and Planetary Science Letters. 2021. V. 553. Art. 116650. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116650>
9. *Ponomareva V., Portnyagin M., Bubenshchikova N. et al.* A 6.2 Ma-long record of major explosive eruptions from the NW Pacific volcanic arcs based on the offshore tephra sequences on the northern tip of the Emperor Seamount Chain // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2023. V. 24. Art. e2023GC011126. <https://doi.org/10.1029/2023GC011126>
10. *Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. et al.* TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // Earth System Science Data. 2020. V. 12(1). P. 469-486. <https://doi.org/10.5194/essd-12-469-2020>

Оползневые процессы в вулканическом массиве Алаид

Рашидов В.А.¹, Бондаренко В.И.², Аникин Л.П.¹

Landslide processes in the Alaid volcanic massif

Rashidov V.A., Bondarenko V.I., Anikin L.P.

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: rashidva@kscnet.ru

² Костромской государственный университет, г. Кострома

В результате морских и наземных экспедиционных исследований, выполненных в 1981-2020 гг., установлено, что оползневые процессы широко развиты в пределах как подводной, так и наземной частей вулканического массива Алаид, состоящего из острова Атласова (вулкан Алаид) и подводного вулкана Григорьева.

Наземно-подводный вулканический массив Алаид [1-4] размером 23×30 км вместе с поднятием дна в проливе Алаид образует крупную своеобразную морфоструктурную зону северо-западного простирания, поперечную Большой Курильской гряде (рис. 1).

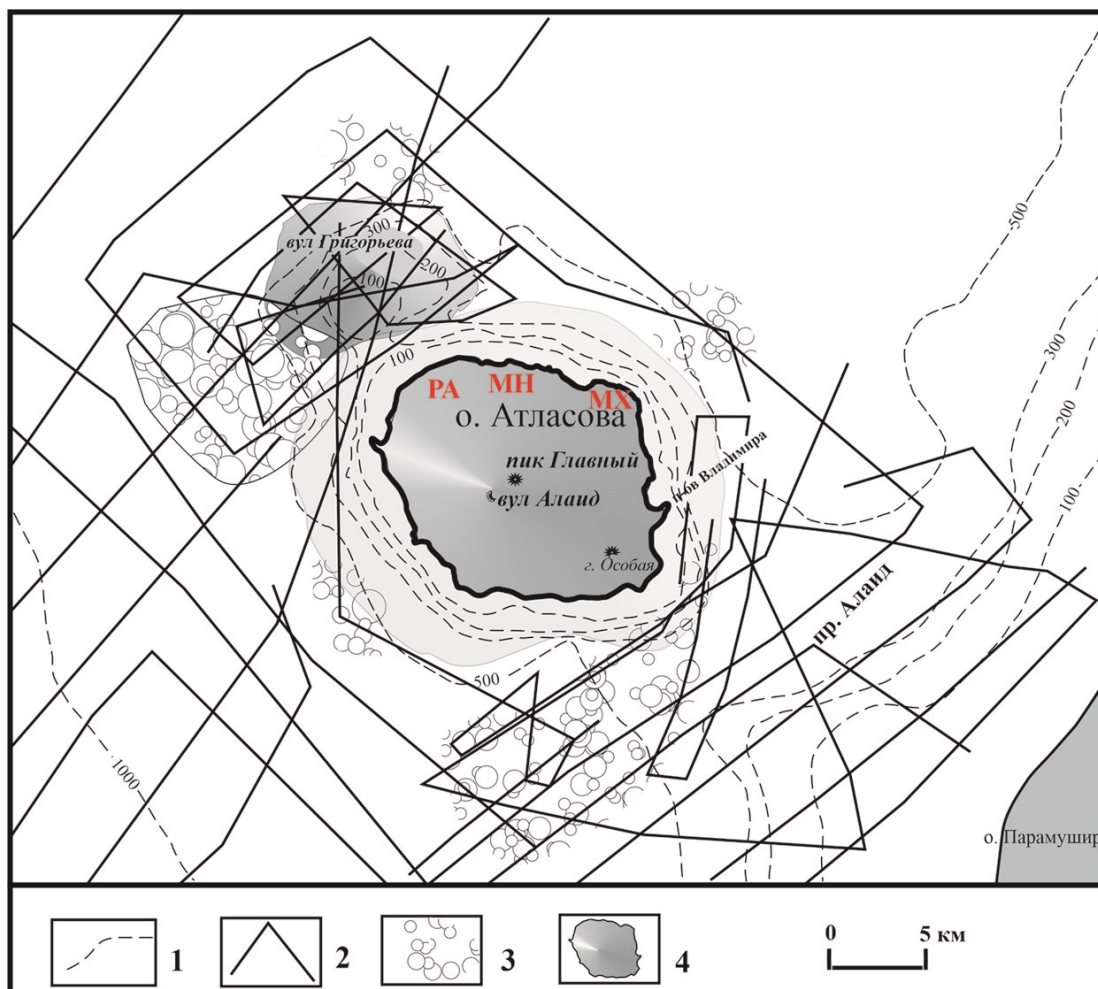


Рис. 1. Вулканический массив Алаид: 1 – изобаты; 2 – геофизические профили; 3 – участки распространения предполагаемых оползневых образований; 4 – вулканические постройки (для вулкана Алаид более светлым тоном показана его подводная часть). МН – мыс Ночной; МХ – мыс Хитрый; РА – ручей Алаидский.

Алаид – самый высокий и один из наиболее активных вулканов Курильских островов, имеет абсолютную высоту 2339 м и превышение над дном Охотского моря 2850-3000 м, а размер его основания на уровне моря – 12×17 км. Этот сложный стратовулкан, извержения которого относятся к этно-стромболианскому, вулканскому,

вулканско-стромболианскому и субплинианскому типам, неоднократно извергался в XX и XXI веках.

Подводный вулкан Григорьева, крутизна склонов которого достигает 10-15°, расположен на генеральной линии северо-западного простирания местоположения побочных конусов вулкана Алаид и поднимается с глубин 800-850 м, а его основание размером 12.5×15 км срослось с основанием вулкана Алаид (рис. 1).

Авторский коллектив многие годы успешно занимается изучением различных процессов, происходящих в наземно-подводном вулканическом массиве Алаид [1-11]. Так, например, во время полевых работ 2013-2020 гг. на различных участках в прибрежной зоне о. Атласова нами были выявлены многочисленные оползни, часть из которых представлена на рис. 2.

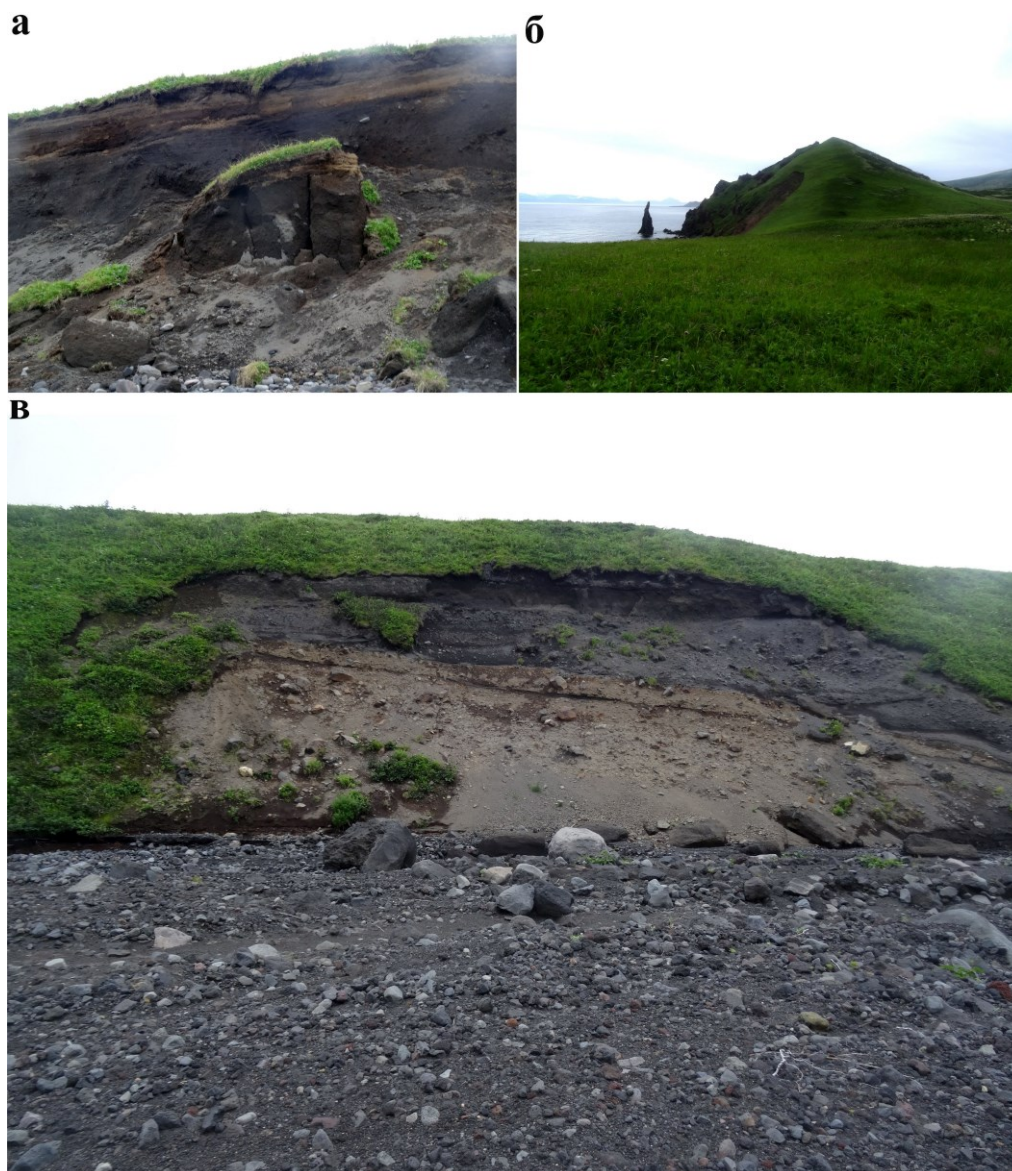


Рис. 2. Оползни на о. Атласова: а – мыс Ночной; б – мыс Хитрый; в – ручей Алаидский. Местоположение оползней представлено на рис. 1.

Несмотря на большое количество публикаций, посвященных изучению вулкана Алаид, упоминание об оползнях встречается только в одной работе [8], а в работах, посвященных морским исследованиям в районе острова Атласова, оползневые образования до настоящего времени не отмечались.

В настоящей работе впервые сделана попытка исправить эту недоработку.

Анализ данных непрерывного сейсмоакустического профилирования и эхолотного промера, выполненных в 1981-1991 гг. в экспедициях с борта научно-исследовательского судна «Вулканолог», позволил выделить в пределах вулканического массива Алаид в глубинном интервале 500-700 м многочисленные участки распространения предполагаемых подводных оползневых образований (рис. 1).

В районе острова Атласова оползневые образования установлены в подводных частях его северного, южного, юго-восточного и юго-западного склонов. В районе подводного вулкана Григорьева оползневые образования развиты у подножий его северного и юго-западного склонов.

Проведенная оценка позволяет говорить о том, что площадь распространения подводных оползневых образований в районе наземно-подводного вулканического массива Алаид составляет не менее 170 км².

В результате выполненных геолого-геофизических исследований сделан вывод о том, что в пределах наземно-подводного вулканического массива Алаид широко развиты оползневые образования, а также впервые оценена площадь их распространения в его подводной части.

Список литературы

1. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусков А.А. Подводный вулкан Григорьева (Курильская островная дуга) // Вулканология и сейсмология. 2006. № 5. С. 17-26.
2. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Рашидов В.А., Трусков А.А. Вулканический массив Алаид (Курильская островная дуга) // Материалы международного симпозиума «Проблемы эксплозивного вулканизма» к 50-летию катастрофического извержения вулкана Безымянный. 25-30 марта 2006 г. Петропавловск-Камчатский / Отв. ред. чл.-корр. РАН Е.И. Гордеев. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2006. С. 135-143.
3. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Наземно-подводные вулканические массивы Курильской островной дуги // Геология морей и океанов: Материалы XXV Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 13-17 ноября 2023 г. М.: ИО РАН, 2023. Т. III. С. 90-94.
4. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Подводная газо-гидротермальная активность в пределах Курильской островной дуги // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 1. С. 4-13.
5. Диденко А.Н., Рашидов В.А., Марков Г.П. и др. Петромагнитная и геохимическая характеристики вулканитов извержения 2015-2016 гг. вулкана Алаид, Курильская островная дуга // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 3-21.
6. Житова Е.С., Аникин Л.П., Сергеева А.В. и др. Проявление фольбортита на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова, Россия) // Записки Российского минералогического общества. 2020. Ч. CXLIX. № 3. С. 78-95.
7. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Ю.М. Пушаровский. М.: Наука, 1992. 528 с.
8. Рашидов В.А., Аникин Л.П. Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2018 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2018. № 3. Вып. 39. С. 112-113.
9. Рашидов В.А., Аникин Л.П. Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2020 году // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 3. Вып. 47. С. 112-119.
10. Рашидов В.А., Аникин Л.П. Полевые работы на вулкане Алаид (о. Атласова, Курильские острова) в 2020 году. Этап 2 // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2020. № 4. Вып. 48. С. 108-113.
11. Силаев В.И., Аникин Л.П., Рашидов В.А. и др. Атакамит как продукт фумарольного минералообразования на современных вулканах // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти Чирвинского. 2021. Вып. 24. С. 207-2016.

Составы расплавов кислых магм экструзий кальдеры Карымшина (Южная Камчатка) по результатам исследований расплавных включений в кварце
Рогозин А.Н.¹, Смирнов С.З.²

Compositions of silicic magma melts from Karymshina caldera extrusions (Southern Kamchatka) based on the results of studies of melt inclusions in quartz

Rogozin A.N., Smirnov S.Z.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: alekseiras@yandex.ru*

² *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск*

Показано, что экструзии кальдеры Карымшина были сформированы при выдавливании высокоглиноземистых риолитовых магм с умеренным и высоким содержанием K_2O . Исходные составы расплавных включений (РВ) в кварце соответствуют стеклу основной массы. Составы этих пород отвечают материнским магмам, в которых кристаллизовался кварц. Предварительные результаты анализа составов стекол РВ в кварце внутрикальдерных игнимбритов показывают, что они близки к составам РВ в кварце экструзий.

Одной из важнейших проблем вулканологии в настоящее время является реконструкция магматических процессов, приводящих к крупнообъемным игнимбритообразующим извержениям и формированию гигантских кальдер на поверхности Земли. Вулканические извержения такого масштаба – суперизвержения, способны привести к глобальным катастрофам, изменить климат и жизнь на Земле. Огромные магматические очаги супервулканов генерируют тепло для современных гидротермальных систем и являются источниками вещества для процессов рудообразования. Условия, при которых происходит становление очагов суперизвержений, особенности составов магм и их природа до сих пор вызывают горячие дискуссии. В то же время, именно эти сведения необходимы для обнаружения предвестников грядущих катастроф.

В 2007 г. на территории Южной Камчатки были обнаружены остатки крупнейшего в России кальдерного вулкана, получившего название кальдеры Карымшина [1]. В плане кальдера имеет овальную форму (25×15 км). Она вытянута в северо-западном направлении и имеет возраст 1.78 млн лет [5]. Объем изверженных продуктов составил ~825 км³ или $2 \cdot 10^{15}$ кг [1]. Максимальная мощность толщи игнимбритов выявлена в верховьях р. Карымшина и достигает 1000 м. Игнимбриты сохранились, в основном, внутри кальдеры, а за ее пределами они встречаются в небольшом количестве [1]. Все эти данные позволили рассматривать кальдеру Карымшина как супервулкан и поставить ее в один ряд с такими гигантами, как Тоба (Индонезия), Йеллоустон (США), Пакана (Чили), Тимбер Маутин (США), Таупо (Новая Зеландия), Лонг Велли (США) [6].

Процесс образования кальдеры Карымшина завершился внедрением серии риолитовых экструзий вдоль кольцевого разлома в период 0.5-0.9 млн лет [3]. С некоторыми экструзивными куполами связаны мощные лавовые потоки. Минимальные оценки объемов кислых экструзий и их потоков составили 2.68 км³. Это самые большие объемы кислого экструзивного вулканизма, определенные на территории Камчатки [3]. Экструзивные купола кальдеры Карымшина сложены высокоглиноземистыми риолитами (70.4-77.1 масс. % SiO_2) нормальной щелочности с умеренными и высокими содержаниями K_2O , $Na_2O/K_2O \sim 1.1$ и низкими CaO , FeO и MgO . Главными минералами вкрапленниками являются К-полевой шпат, плагиоклаз и кварц. В подчиненном количестве встречается биотит, апатит и магнетит. Некоторые экструзии сложены риолитами с витрофировой основной массой. Составы ее стекла также отвечают высокоглиноземистым риолитам (~78 масс. % SiO_2) нормальной щелочности, однако содержания K_2O варьируют от типичных для валовых составов пород ~3 масс. % до ~6 масс. %, что приводит к уменьшению Na_2O/K_2O до ~0.3.

Содержания CaO, FeO и MgO, как правило, ниже, чем в валовых составах пород экструзий.

Составы пород экструзий характеризуются закономерным снижением содержаний Al_2O_3 , FeO, CaO, Na_2O и незначительным повышением K_2O по мере увеличения концентраций SiO_2 .

Вкрапленники кварца (рис. 1а, б) представлены в виде крупных кристаллов (0.7-2.1 мм) и содержат обильные расплавные включения (PB) в форме обратного кристалла (рис. 1в, г). По фазовому составу при комнатной температуре PB были разделены на три группы: (1) однофазовые стекловатые, которые встречаются редко; (2) двухфазовые, содержащие стекло и газовый пузырек разного размера; (3) многофазовые, содержащие стекло, кристаллы и/или газовый пузырек. Для получения информации по составам расплавов были использованы природно-закаленные включения, содержащие при комнатной температуре стекло и пузырек.

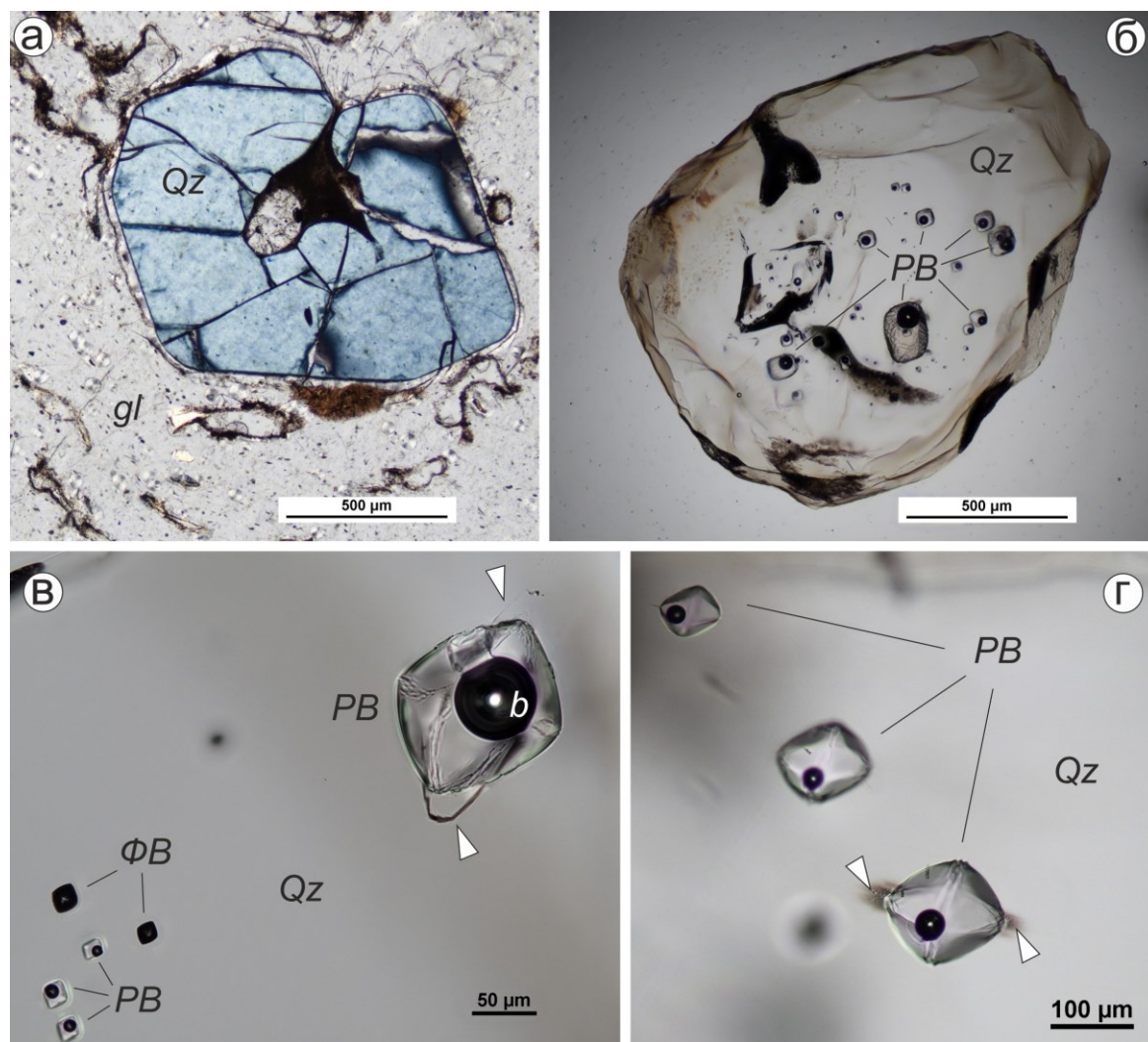


Рис. 1. Вкрапленник кварца: в шлифе (а), вмонтированный в шашку с эпоксидной смолой (б), содержащий расплавные включения в форме обратного кристалла (в-г). Qz – кварц, gl – витрофированная основная масса экструзии, PB – расплавное включение, ФВ – флюидное включение, b – газовый пузырек. Белыми стрелками на (в, г) отмечены трещины декрепитации.

Составы PB (главные компоненты) определялись рентгеноспектральным анализом методом энерго-дисперсионной спектрометрии (ЭДС). Присутствие воды в стекле PB определялось качественно методом рамановской спектроскопии и оценивалось количественно по недостатку суммы ЭДС.

Состав и условия равновесия расплавных включений

Результаты рентгеноспектрального анализа методом ЭДС стекол РВ показали, что их составы не соответствуют валовым составам пород экструзий (рис. 2). Было установлено, что они попадают в поле высокоглиноземистых риолитов (77.3-79.2 масс. % SiO_2) с высокими и ультра-высокими содержаниями K_2O (рис. 2), $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} \sim 0.7$ и низкими CaO , FeO и MgO . Состав стекол РВ характеризуется также закономерным снижением содержаний Al_2O_3 , незначительным снижением K_2O по мере увеличения концентраций SiO_2 . Содержания CaO , FeO и Na_2O в стеклах РВ практически не меняются по мере увеличения концентраций SiO_2 .

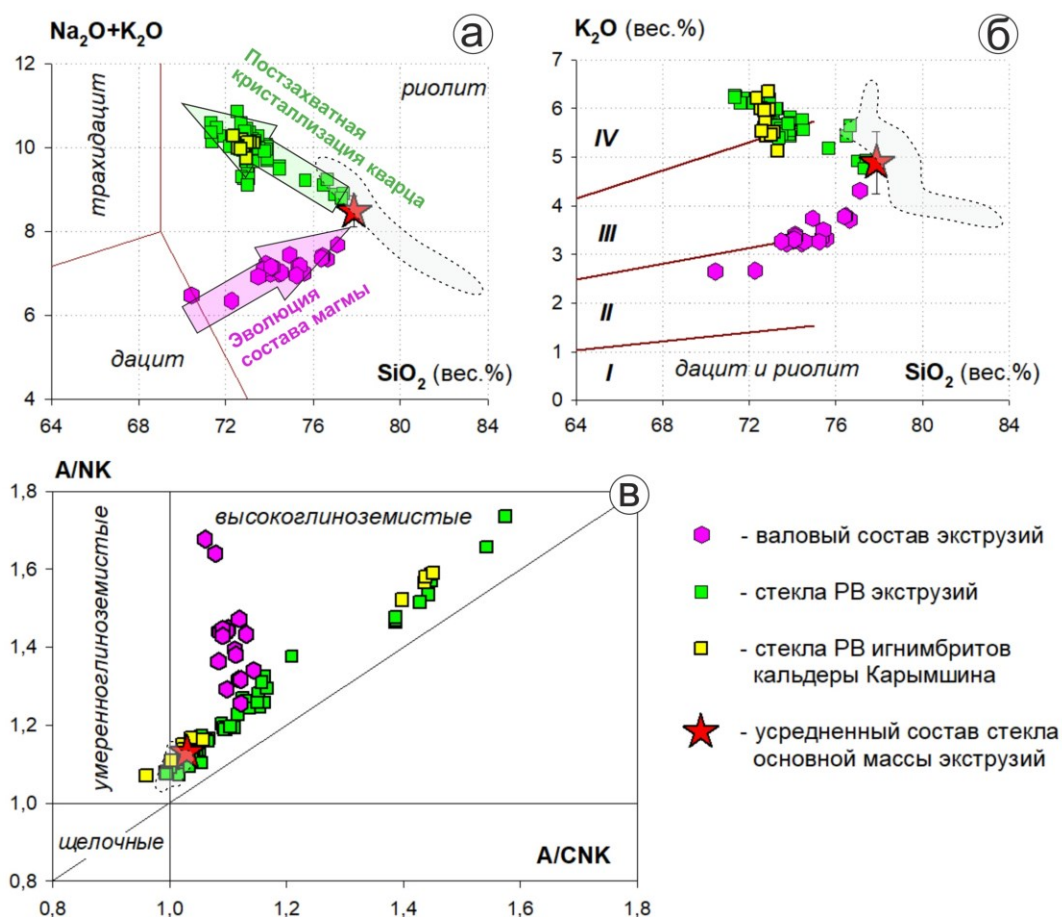


Рис. 2. Положение валовых составов пород экструзий, стекол РВ, витрофировой и раскристаллизованной основной массы экструзий на классификационных диаграммах кислых пород. Римскими цифрами на диаграмме $\text{K}_2\text{O}-\text{SiO}_2$ (б) обозначены поля кислых пород: I – низкокалиевых, II – умереннокалиевых, III – высококалиевых и IV – ультракалиевых. Точечным пунктиром показано поле раскристаллизованной основной массы экструзий.

Методом рамановской спектроскопии в стеклах некоторых РВ было качественно установлено наличие воды. По недостатку суммы рентгеноспектрального анализа содержания воды могут быть оценены в диапазоне от 0 до 6 масс. % H_2O . Линии вариаций стекол РВ и составов пород не совпадают, но пересекаются в районе средних составов стекла основной массы экструзий. Составы стекол расплавных включений предполагают, что они могли быть в равновесии с кварцем при температурах около 800-640 °С, если принимать, что захват включений произошел при давлении 1.8 кбар [4], а содержание воды варьировало от 0.2 до 1 концентрации насыщения при этом давлении.

Полученные данные показывают, что включения подверглись постзахватной кристаллизации кварца на стенки включения при температурах около 800-640 °С,

рассчитанных по методике [2]. На стенки включений в ходе этого процесса было отложено от 0 до примерно 20 масс. % захваченного расплава. Линия вариаций составов стекол РВ в кварце пересекается с трендом эволюции составов пород экструзий в области средних составов стекла витрофировой основной массы (рис. 2). Это сопоставление дает основание считать, что исходные составы РВ в кварце соответствуют стеклу основной массы и, соответственно, составы этих пород отвечают материнским магмам, в которых кристаллизовался кварц. Предварительные результаты анализа составов стекол РВ в кварце внутрикальдерных игнимбритов показывают, что они близки к составам РВ в кварце экструзий, претерпевшим отсадку примерно 15-18 масс. % захваченного расплава. Опираясь на это, можно предположить, что экструзии представляют собой наиболее поздние фракции магм того же очага, который участвовал в кальдерообразующем извержении и образовании внутрикальдерных игнимбритов.

Выводы

Кислые экструзии кальдеры Карымшина были сформированы в результате выдавливания высокоглиноземистых риолитовых магм с умеренным и высоким содержанием K_2O . Температуры, при которых происходила кристаллизация кварца в этих магмах, вероятнее всего, должны быть несколько выше $800\text{ }^{\circ}C$. Магмы экструзий состоят из расплава, состав которого отвечает высокоглиноземистому высококалиевому риолиту, из которого кристаллизуются кварц, плагиоклаз, калиевый полевой шпат и другие минералы, обнаруженные в образцах экструзий. В ходе дальнейших работ планируется уточнить содержание воды и характер вариаций давления в ходе эволюции материнских магм экструзий кальдеры Карымшина, а также уточнить, существует ли генетическая связь между магмами экструзивной и игнимбритовой стадий образования кальдеры Карымшина.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 22-17-00074 «Детальная летопись эксплозивного вулканизма в островодужных системах Северной Пацифики: хронология, геохимия и взаимосвязь с климатом» (<https://rscf.ru/project/22-17-00074/>).

Аналитические исследования выполнены в «Центре коллективного пользования научным оборудованием много-элементных и изотопных исследований СО РАН» (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), исследования валового состава кислых пород экструзий выполнены в АЦ ИГХ СО РАН (г. Иркутск).

Список литературы

1. *Леонов В.Л., Rogozin A.H.* Карымшина – гигантская кальдера – супервулкан на Камчатке: границы, строение, объем пирокластики // Вулканология и сейсмология. 2007. № 5. С. 14-28.
2. *Плечов П.Ю., Щеклеина М.Д., Дымишиц А.М.* Моделирование равновесия кварц-расплав в простых и многокомпонентных системах // Новые данные о минералах. 2023. Т. 57. Вып. 4. С. 110-118.
3. *Рогозин А.Н.* Новые данные о кислых экструзиях Банно-Карымшинского района, Камчатка // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 10. С. 156-164.
4. *Bindeman I.N., Leonov V.L., Colon D.P. et al.* Isotopic and Petrologic Investigation and a Thermomechanical Model of Genesis of Large Volume Rhyolites in Arc Environments: Karymshina Volcanic Complex, Kamchatka, Russia // *Frontiers in Earth Science*. 2019. V. 6. Art. 238. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00238>
5. *Bindeman I.N., Leonov V.L., Izbekov P.E. et al.* Large-volume silicic volcanism in Kamchatka: Ar–Ar and U–Pb ages, isotopic, and geochemical characteristics of major pre-Holocene caldera-forming eruptions // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2010. V. 189. P. 57-80.
6. *Mason B.G., Pyle D.M., Oppenheimer C.* The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth // *Bulletin of volcanology*. 2004. V. 66. P. 735-748.

Микроструктуры частиц пепла вулкана Шивелуч
Толстых М.Л.¹, Бабанский А.Д.², Трубкин Н.В.², Овсянников Г.Н.³
Microstructures of volcanic ash particles of Shiveluch volcano
Tolstykh M.L., Babansky A.D., Trubkin N.V., Ovsyannikov G.N.

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН (ГЕОХИ), г. Москва;

e-mail: mashtol@mail.ru

² Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ), г. Москва

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Впервые для вулкана Шивелуч получены данные по микроструктурам пепловых частиц размерностью около 10 мкм. Выявлено, что даже столь мелкие частицы не являются гомогенным стеклом и содержат микрокристаллы различного состава.

Принято считать, что тонкий вулканический пепел (<35 мкм) состоит из смеси частиц вулканического стекла («glass shards») и минеральных зерен [3-5]. Действительно, микронзондовый анализ и картирование в элементах образца пепла вулкана Шивелуч (извержение 17.11.2014 г., отбор в поселке Ключи) демонстрирует преобладание частиц, по составу соответствующих риолитовому стеклу, с широкими вариациями содержаний SiO₂ (78-82 масс. %) и остальных компонентов (Al₂O₃ 10.2-11.3, FeO 0.8-1.2, CaO 0.2-0.5, сумма щелочей – 5-7 масс. %). Также зафиксировано наличие зерен и обломков зерен плагиоклаза, амфибола, пироксена, кварца [2].

Для выявления соотношений стекла и минеральных зерен в тонком пепле был использован метод рентгенофазового анализа (дифрактометр Rigaku SmartLab SE при характеристиках оборудования: CuK α излучение (1.541 Å), Ni – фильтр, 40kV/30mA; гониометр – ВВ, $\Theta/2\Theta$, 2.5-65°, 4°/мин; детектор – D/tex Ultra 250, 1D). В ходе анализа порошковой (неориентированной) пробы был определен качественный (рис. 1) и количественный состав вещества. Согласно дифракционным спектрам, в образце преобладают плагиоклазы, кристобалит, присутствуют амфиболы. Количественные показатели фазового состава тонкого пепла таковы: содержание плагиоклазов составляет 84-86 %, кристобалита – 3-4 %, амфиболов – 3-5 %. Полученные спектры демонстрируют отсутствие в пепле вулканического стекла, то есть аморфной фазы, дающей устойчивое гало в определенной области дифрактограммы [1].

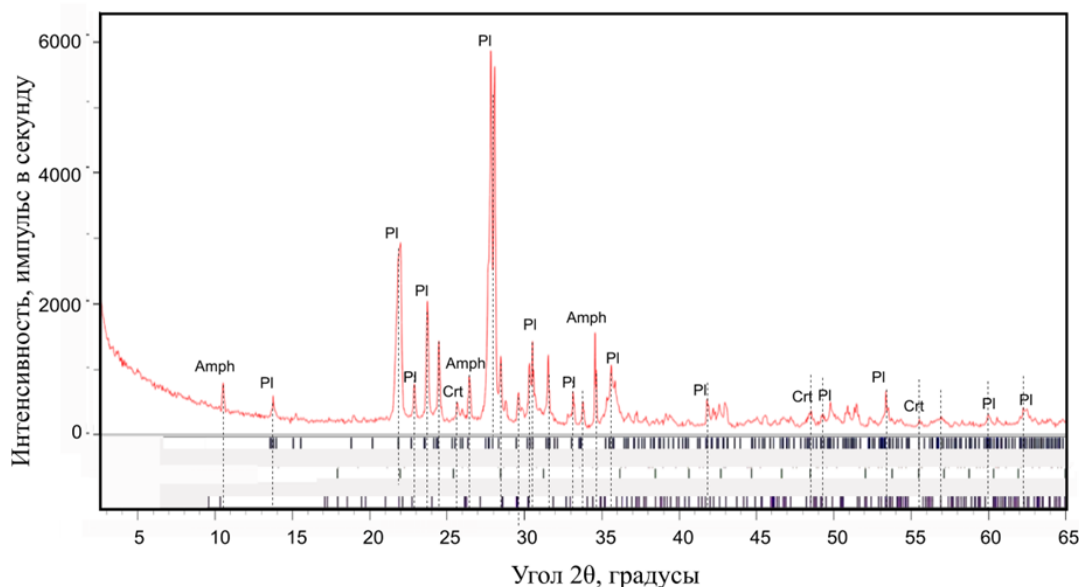


Рис. 1. Дифрактограмма пепла влк. Шивелуч, извержение 17.11.2014 г. Pl – плагиоклаз, Amph – амфибол, Crst – кристобалит.

Для объяснения противоречия между химическим составом значительной доли пепловых частиц, соответствующим вулканическому стеклу, и дифрактометрией были проанализированы микроструктуры пепловых частиц. Порошок, полученный в результате перетирания образца пепла до фракции около 10 мкм, исследовался с использованием ПЭМ – просвечивающего электронного микроскопа JEM-2100 (JEOL) с точечным разрешением 0.236 нм (200 кВ, Cs=1.7 мм), оснащенного гониометром с 2 осями наклона $\pm 30^\circ$ и рентгеновским спектрометром X-Max 80 мм² (Оксфорд) (в сочетании с программным обеспечением AZtecTEM). Оцифрованные изображения были записаны камерами Gatan Orius C200D1. Анализ ЭДС спектров микрочастиц проводился с использованием ускоряющего напряжения 200 кВ и более высокого тока пучка при небольшом размере зонда (≈ 0.15 мкм). Набор спектров длился в течение 40-60 секунд.

Наряду с фотографиями с чрезвычайно большим разрешением (рис. 2, 3) были получены дифракционные картины для различных участков пепловых частиц по технологии SAED (Selected area electron diffraction), а также проанализирован состав вещества в точке. Некоторые частицы представляют собой обломки зерен минералов (плагиоклаз, кварц, амфибол, клино- и ортопироксены), но большинство частиц сложены вулканическим стеклом.

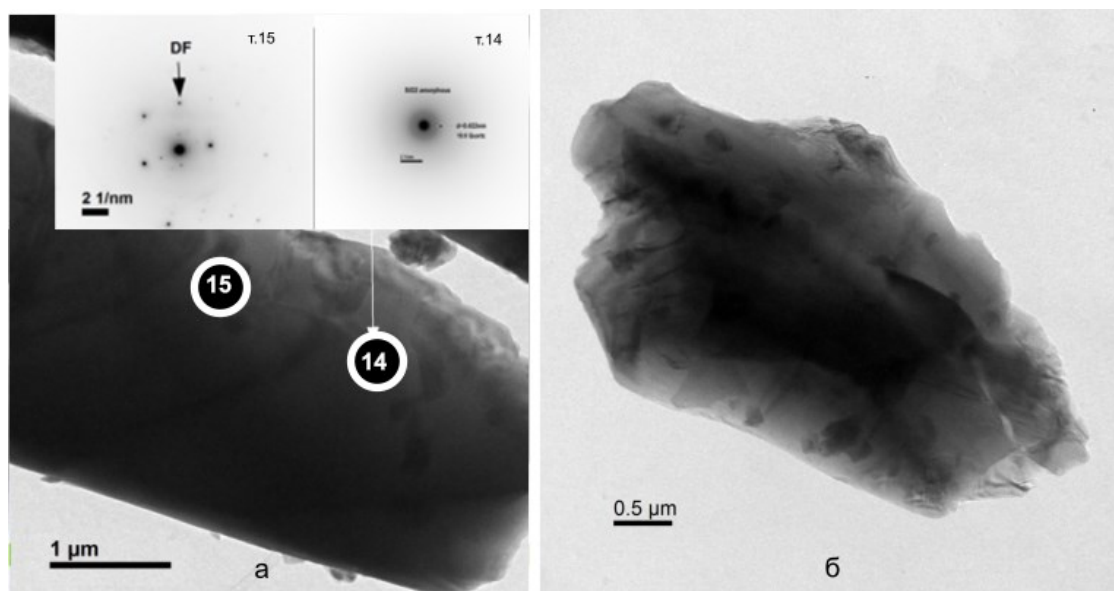


Рис. 2. Микрофотографии, а также дифракционные картины отдельных участков пепловых частиц, выполненных при помощи ПЭМ.

Номерами обозначены проанализированные участки пепловых частиц.

SAED картина дифракции участков этих зерен демонстрирует аморфное (рис. 2а, врезка справа) состояние вещества, однако на фотографиях видно, что сами зерна неоднородны, и в аморфной матрице выделяются темные участки, размеры которых варьируют от сотых долей микрона до нескольких микронов. Эти образования часто имеют кристаллическую структуру (рис. 2а, врезка слева; рис. 3а, врезка слева), которая по параметрам решетки может быть интерпретирована как структура полевого шпата.

Чаще всего в кристаллических участках зерен фиксируется и соответствующий состав фаз (рис. 3а, врезки), однако иногда кристаллическая структура прослеживается в матрице, по составу отвечающей стеклу (рис. 3б, врезки слева). Таким образом, в пепловых частицах фиксируется процесс начала раскристаллизации стекла, прерванный закалкой, в ходе которого могли формироваться метастабильные структуры. По всей вероятности, именно распространенность микрокристов обеспечивает специфику дифрактограмм вулканического пепла, на которых не

регистрируется аморфное вещество. Кроме того, широкий диапазон составов стекол в пепле одного извержения, полученных при помощи микронзондового анализа, может быть объяснен попаданием в фокус электронного пучка микрокристаллов, визуально не различимых в силу своей размерности.

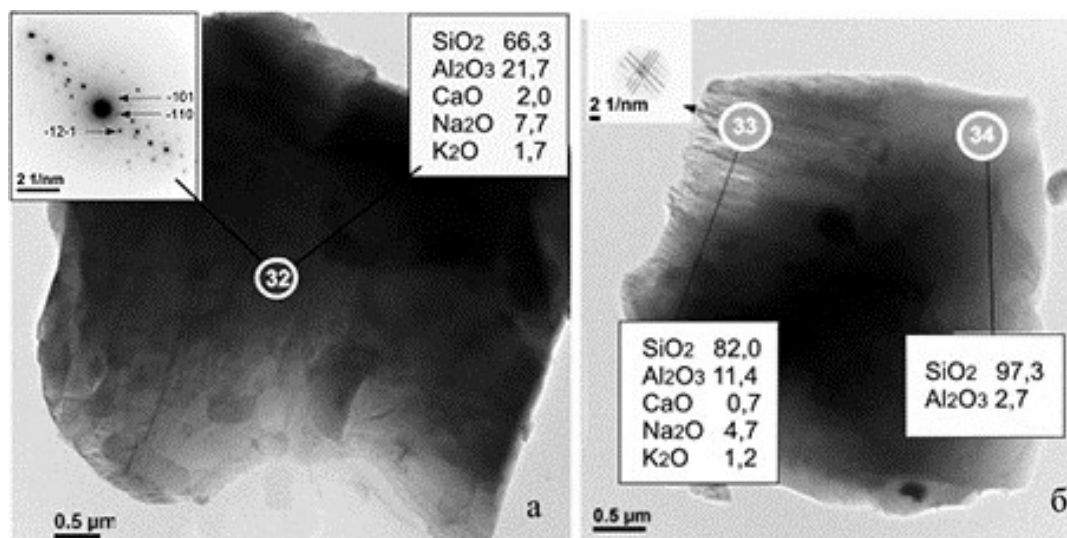


Рис. 3. Микрофотографии, дифракционные картины и составы отдельных участков пепловых частиц, выполненных при помощи ПЭМ.

Номерами обозначены проанализированные участки пепловых частиц.

Таким образом, при помощи исследований микроструктур на просвечивающем микроскопе установлено, что стекловатые частицы пепла («glass shards») сложены не столько стеклом, сколько смесью стекла и микрокристов. Вероятно, суммарный их состав соответствует магматическому расплаву, удаляемому из очага в ходе извержения, однако при точечном анализе этих частиц возможны искажения составных характеристик стекла в связи с попаданием в анализируемый участок минеральных микрозерен. Для получения корректных результатов по составам расплава нужна значительная статистика микронзондовых измерений для нивелировки возможных колебаний составов из-за примеси минералов. Рентгенофазовый анализ в связи со структурными особенностями вещества не может быть использован в количественной диагностике тонких пеплов. Авторы полагают, что закономерности изменения фазового состояния первоначально аморфного вещества, установленные для тонких пеплов вулкана Шивелуч, могут быть характерны и для других подобных вулканических центров.

Работа выполнена в соответствии с Госзаданием ГЕОХИ РАН и ИГЕМ РАН.

Список литературы

1. Абызов А.М. Рентгенодифракционный анализ поликристаллических веществ на минидифрактометре «Дифрей». СПб: СПбГТИ(ТУ), 2008. 95 с.
2. Толстых М.Л., Мусаэлян Р.Э., Бабанский А.Д. Особенности фазового состава тонкого пепла вулкана Шивелуч // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2023. Вып. 20. С. 669-677. <https://doi.org/10.31241/FNS.2023.20.085>
3. Cashman K.V., Scheu B. Magmatic fragmentation // The encyclopedia of volcanoes. Academic Press, 2015. P. 459-471.
4. Davies S.M. Cryptotephra: the revolution in correlation and precision dating // Journal of Quaternary Science. 2015. V. 30. №. 2. С. 114-130.
5. Gannermann H. Magma Fragmentation // Annual Review Earth Planetary Science. 2015. V. 43. P. 431-458. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-060614-105206>

Состав стекла в пепловых залежах Северного Приохотья

Толстых М.Л.¹, Певзнер М.М.², Смирнов В.Н.³, Глушкова О.Ю.³, Овсянников Г.Н.⁴

Composition of glass in the ash deposits of the Northern Okhotsk Sea region

Tolstykh M.L., Pevzner M.M., Smirnov V.N., Glushkova O.Yu., Ovsyannikov G.N.

¹ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

e-mail: mashtol@mail.ru

² Геологический институт РАН, г. Москва

³ СВКНИИ ДВО РАН, г. Магадан

⁴ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Измерены содержания микроэлементов в стеклах вулканических пеплов, формирующих Уптарскую и Ямскую залежи Северного Приохотья. Выявлена высокая степень сходства пеплов Ямской залежи и голоценовых тефр Камчатки. Некоторые особенности вулканического стекла Уптарской залежи характерны для камчатской пирокластике.

Месторождениям вулканических пеплов Северного Приохотья (залежам Уптарской, Красавинской, Ямской и др.) посвящена обширная литература [1, 3, 4, 6 и др.]. Однако вопрос о происхождении пеплов до сих пор остается дискуссионным. В ряде работ предполагается, что они могут быть связаны с извержениями некоторых вулканов Камчатки [1, 4]: Ичинского, Алней-Чашаконджа, Асача, Оччамо. Предлагается и вне-Камчатский источник пеплов. Так, например, в работе [6] высказано предположение о неуставленных вулканических центрах в Охотском море.

Наше исследование направлено на изучение микроэлементного состава стекол Уптарской и Ямской залежей и сравнение полученных результатов с данными по составу остаточных кислых стекол в тефрах Камчатки.

Вероятнее всего, источник (источники) происхождения пеплов залежей расположен на значительном удалении. Следовательно, в процессе транспортировки и возможного переотложения пеплы подвергались дифференциации (в том числе золотой), что привело к изменению их фазового состава. В связи с этим исследование валовых проб материала залежей может приводить к искажению первичного химизма пеплов. Более перспективным представляется изучение микроэлементных характеристик вулканических стекол, поскольку именно он может характеризовать первичный расплав вулкана-источника.

Материалы и методы

По данным [4], пеплы Уптарской залежи могли сформироваться в позднем плейстоцене, а пеплы Ямской залежи связывались с миоценовой вулканической активностью: по результатам К-Ar и U-Pb датирования возраст стекловатого материала – не менее 7-8 млн лет [4].

Нами проанализированы частицы прозрачного стекла пеплов Ямской и Уптарской залежей (рис. 1). В качестве материала для сравнения использованы анализы стекол расплавных включений в минералах и тонких пеплах голоценовых вулканов Срединного хребта (Ичинский, Хангар), и среднемиоценового (14.9-13.1 млн лет) пирокластического потока Тыркахин на Западной Камчатке [2, 5]. Содержания петрогенных элементов определялись при помощи электронно-зондового микроанализа (EPMA) на приборах Cameca SX-100 (ГЕОХИ РАН) при параметрах 15-30 nA, 15 kV, по площадке 10×10 мкм. Содержания элементов-примесей измерялись при помощи метода вторично-ионной масс-спектрометрии (SIMS) на анализаторе Cameca IMS-4f Центра коллективного пользования «Диагностика микро- и макроструктур», г. Ярославль.

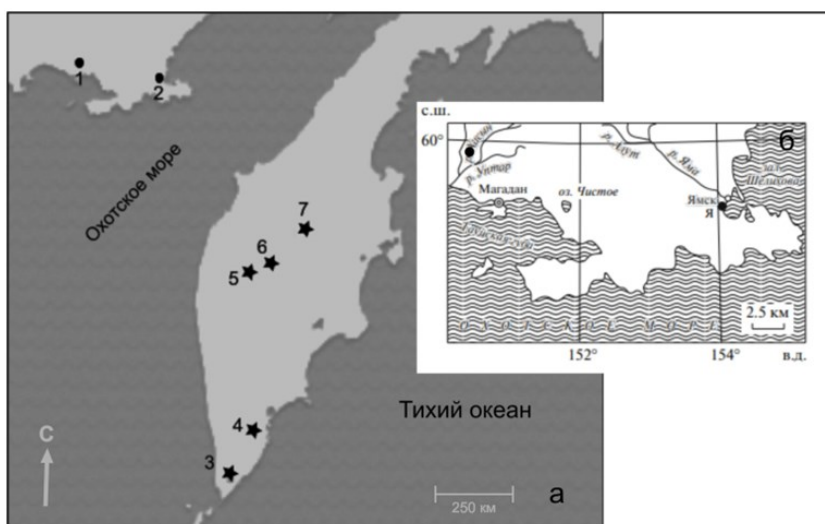


Рис. 1. Расположение залежей вулканических пеплов Северного Приохотья и предполагаемых источников вулканического пепла (Камчатка) и залежи пеплов: 1 – Уптарская, 2 – Ямская. Вулканические центры Камчатки: 3 – кальдера Курильского озера, 4 – Асача, 5 – Ичинский, 6 – Оччамо, 7 – Алней-Чашаконджа.

Для сравнения использовались собственные данные по составам стекол вулканов Хангар, Ичинский, потока Тыркачин, а также материалы из базы данных TerhгаKam [7], которая на сегодняшний день является наиболее представительным массивом данных о составах стекол в тefрах большинства известных вулканов Камчатки.

Петрогенные компоненты

По содержаниям макроэлементов стекла пирокластического материала Ямской и Уптарской залежей относятся к риодацитам, однако в Ямской залежи локализованы более кремнекислые стекла (69.5-72.2 и 72.0-75.2 масс. %, соответственно). Прочие петрогенные элементы демонстрируют сходные содержания (11.6-12.0 масс. % Al_2O_3 , 0.65-0.8 FeO, 0.4-0.9 CaO). Стекло Уптарской залежи имеет чуть более отчетливую калиевую специфику – до 4.5 масс. %, против 3.5 масс. % в Ямской залежи. Несколько различаются и суммы зондового анализа (90-91 масс. % и 95-97 масс. % для Уптарской и Ямской залежей, соответственно). Это связано с разной степенью водонасыщенности стекла; согласно показаниям SIMS, в стекле Уптарской залежи содержится до 7.7 масс. %, а в Ямской – до 5.2 масс. % воды, что, по-видимому, отражает процесс перлитизации стекла.

По содержаниям макроэлементов стекла обеих залежей и кислые пирокластические отложения Камчатки близки между собой (рис. 2), хотя вулканы, которые в литературе рассматривались как возможные источники изучаемой тefры (Асача, Курильское озеро, Алней-Чашаконджа, Ичинский), характеризуются несколько более основными стеклами (рис. 2), для которых характерны более низкие или, наоборот, более высокие концентрации K_2O . Таким образом, в данном случае не представляется возможным использовать концентрации петрогенных компонентов в пеплах для каких-либо корреляций.

Элементы-примеси

Характер распределения редких элементов в стеклах Уптарской и Ямской залежей, а также пеплов вулканов Камчатки в целом похожи. Их объединяет наличие Nb-минимума, относительная обогащенность литофильными элементами и некоторое обеднение тяжелыми редкоземельными элементами (РЗЭ) (рис. 3). Кривая, отвечающая усредненному составу стекла Ямской залежи, попадает в диапазон кислых камчатских пеплов, в том числе голоценовых, и ближе всего она оказывается к вулканам Срединного хребта (Ичинский и Хангар), в том числе и по глубине Nb-минимума. Однако изотопный возраст пеплов Ямской залежи оценивается в 7-8 млн лет, что для Срединного хребта считается этапом активного субдукционного вулканизма, и древние

вулканы этого района, например, поток Тыркачин, характеризуются гораздо меньшими содержаниями Nb, характерными для активных островодужных систем.

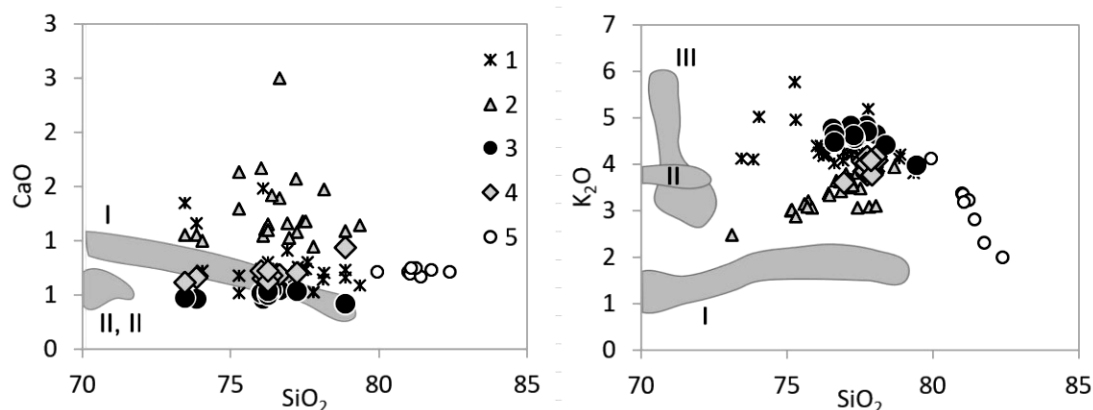


Рис. 2. Отношение $\text{SiO}_2\text{--CaO}$ и $\text{SiO}_2\text{--K}_2\text{O}$ в стеклах пирокластических отложений Камчатки, Уптарской и Ямской залежей. 1 – вулкан Ичинский, 2 – вулкан Хангар, 3 – Ямская залежь, 4 – Уптарская залежь, 5 – пирокластический поток Тыркачин. Серым обозначены поля составов стекол тефры вулканических центров: I – кальдера Курильского озера, II – Асача, III – массив Алней-Чашаконджа по [7]. Все составы пересчитаны на 100 %.

На рис. 3 видно, что стекла Уптарской залежи по ряду параметров кардинально отличаются от стекол как Ямской залежи, так и камчатской пирокластики. В первую очередь, это крайне низкие содержания Ba и Sr (160-170 и 15-16 ppm, соответственно), высокие концентрации Nb (>24 ppm), повышенные – тория и легких редкоземельных элементов.

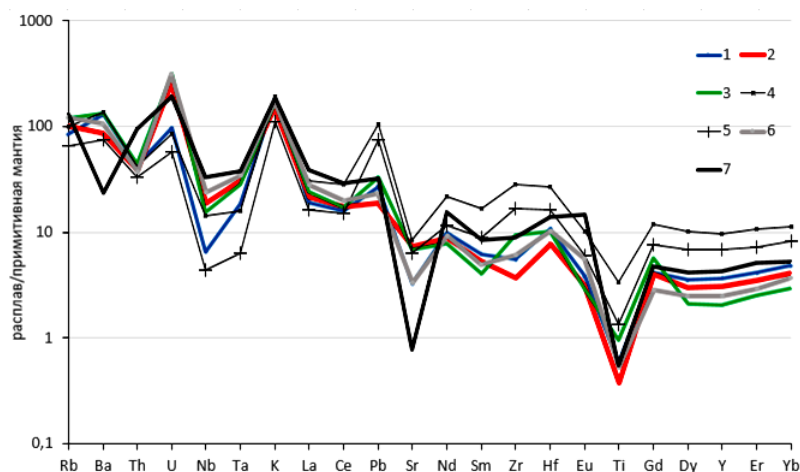


Рис. 3. Распределение РЗЭ в стеклах пирокластических отложений Камчатки, Уптарской и Ямской залежей. 1 – поток Тыркачин, 2 – вулкан Хангар, 3 – вулкан Ичинский, 4 – массив Алней-Чашаконджа, 5 – кальдера Курильского озера, 6 – Ямская залежь, 7 – Уптарская залежь. Состав примитивной мантии по [8].

На некоторых бинарных диаграммах отношений редких элементов (рис. 4) фигуративные точки для стекол Уптарской залежи располагаются довольно далеко от общего поля стекол пирокластических отложений Камчатки.

Несмотря на то, что для некоторых других компонентов расхождения не столь значительны, есть причина предполагать для Уптарской залежи возможность иного источника тефры, чем камчатские вулканы. Например, сочетание столь низких концентраций Sr и высоких – Nb встречается в геодинамических обстановках, где вулканическая деятельность не обусловлена субдукционными процессами. Для выдвижения аргументированных предположений требуются дополнительные исследования.

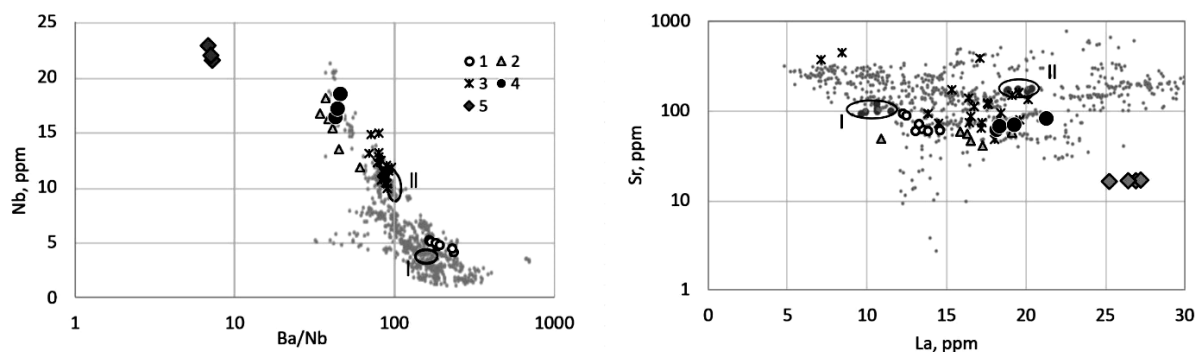


Рис. 4. Бинарные диаграммы отношений редких элементов в стеклах пирокластических отложений Камчатки, Уптарской и Ямской залежей. 1 – пепел миоценового потока Тыркачин; 2, 3 – стекла голоценовых извержений вулканов Хангар и Ичинский, соответственно; 4, 5 – стекла Ямской и Уптарской залежей, соответственно. Серые точки – составы стекол из базы TephraKam [7]. Овалами выделены поля стекол тефры кальдеры Курильского озера (I) и массива Алней-Чашаконджа (II).

Выводы

Установлено, что риодацитовые стекла Ямской и Уптарской залежей имеют различный состав и, по-видимому, разное происхождение (разные вулканы-источники).

Стекла Ямской залежи по составам чрезвычайно близки к камчатским тефрам, особенно к пирокластике вулканов Срединного хребта Камчатки.

Некоторые особенности ($Sr < 20$, $Nb > 22$) состава стекол Уптарской залежи предполагают наличие уникального вулканического источника этих пеплов.

Для решения проблемы происхождения пеплов Северного Приохотья представляется перспективным дальнейшее изучение содержаний элементов-примесей в стеклах.

Работа выполнена в соответствии с Госзаданиями ГЕОХИ РАН и ИВиС ДВО РАН FWME-2024-0012.

Список литературы

1. Мелекесцев И.В., Глушкова О.Ю., Кирьянов В.Ю. и др. Происхождение и возраст Магаданских вулканических пеплов // Доклады АН СССР. 1991. Т. 317. № 5. С. 1188-1192.
2. Орешкина Т.В., Певзнер М.М., Петрова В.В., Каримов Т.Д. Новые данные по вулканогенно-осадочному комплексу неогена Ичинской впадины: разрез Тыркачин (Западная Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2022. № 3. Вып. 55. С. 58-69. DOI: 10.31431/1816-5524-2022-3-55-58-69
3. Смирнов В.Н., Акинин В.В., Глушкова О.Ю. Первые определения изотопного возраста вулканических пеплов в кайнозойских отложениях Северного Приохотья // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 6. С. 676-680. DOI: 10.7868/S0869565214120184
4. Смирнов В.Н., Глушкова О.Ю., Савва Н.Е. Пеплы камчатских вулканов возле Магадана // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2010. № 1. С. 81-88.
5. Толстых М.Л., Певзнер М.М., Каримов Т.Д. и др. Пирокластические потоки Тыркачин (Западная Камчатка): особенности составов вулканического стекла // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2021 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2021. С. 64-67.
6. Шатков Г.А., Лебедева О.Ю., Антонов А.В. и др. Вулканические пеплы Примагаданья: петролого-геохимические особенности и возраст // Региональная геология и металлогения. 2017. № 71. С. 19-34.
7. Portnyagin M.V., Ponomareva V.V., Zelenin E.A. et al. TephraKam: geochemical database of glass compositions in tephra and welded tuffs from the Kamchatka volcanic arc (northwestern Pacific) // Earth System Science Data. 2020. V. 12. № 1. P. 469-486. DOI: 10.13140/RG.2.2.23627.13606
8. Sun S-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Geological Society. London. Special Publications. 1989. V. 42. P. 313-345. DOI: 10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19

Анализ опубликованных минералогических данных для магматической серии пород Толбачинского дола и обсуждение механизма ее формирования

Черкашин Р.И., Озеров А.Ю.

Analysis of the published mineralogical data on the Tolbachinsky dol magmatic rock series and discussion of its formation mechanism

Cherkashin R.I., Ozerov A.Yu.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: romache@kscnet.ru*

На основе анализа опубликованных данных по петрохимическим составам породообразующих минералов в магматической серии пород Толбачинского дола показана крайняя неоднородность в распределении этих данных для вулканитов различного возраста и состава, как по количеству химических анализов минералов, так и по представленности различных фаз минералов в породе. Это затрудняет возможность объективной реконструкции механизма формирования пород серии.

Введение. Толбачинский дол – это зона ареального вулканизма, которая простирается на ~ 50 км к юго-юго-западу от вулкана Плоский Толбачик. В исторический период здесь произошли три крупных трещинных извержения: прорыв 1941 г., Большое трещинное Толбачинское извержение (БТТИ) в 1975-1976 гг. и Трещинное Толбачинское извержение имени 50-летия Института вулканологии (ТТИ-50) в 2012-2013 гг.

Состав вулканитов Толбачинского дола имеет широкий разброс от высокомагнезиальных базальтов к высокоглиноземистым базальт-андезибазальтам, при этом лавы контрастных составов могут поступать на поверхность в ходе одного извержения. Для высокомагнезиальных базальтов ($MgO > 10$ вес. %, $Al_2O_3 \sim 13$ вес. %) характерно преобладание практически афировых лав, что относит их к числу наиболее примитивных островодужных пород в мире [8]. Высокоглиноземистые лавы ($MgO \sim 4$ вес. %, $Al_2O_3 \sim 17$ вес. %) часто имеют мегаплагиофировый облик и большое количество нераскристаллизованного стекла [1]. Продукты последнего извержения ТТИ-50 существенно отличаются от других изученных вулканических пород Толбачинского дола более высоким содержанием щелочей и несовместимых элементов [2].

Современные представления об эволюции широкой и контрастной по составу магматической серии пород вулкана Толбачик допускают различные механизмы ее формирования, либо сочетание этих механизмов. По мнению одних авторов, в формировании магматической серии пород Толбачинского дола участвовали исходные магмы разного состава – высокомагнезиальные и высокоглиноземистые. Смешивание этих двух источников магм в промежуточных магматических камерах дает переходные петрохимические разности базальтов [3 и ссылки в ней]. По данным других исследователей [4, 5], длительные процессы фракционной кристаллизации способны привести к формированию высокоглиноземистых расплавов из более примитивных высокомагнезиальных. Существует также более сложная модель эволюции магм вулкана Толбачик в условиях открытой магматической системы, которая подразумевает периодическую подпитку очагов примитивными высоко-Mg магмами из глубины, а также процессы кристаллизационной дифференциации, смешивания примитивных и эволюционированных магм, их последующее фракционирование и извержение [8].

С точки зрения химического состава отдельных породообразующих минералов, на настоящий момент отсутствует систематическое исследование проблемы эволюции столь контрастной по составу магматической серии пород в лавах Толбачинского дола. В то же время, изучение петрохимии породообразующих минералов в этих лавах и их парагенезисов последовательно от высокомагнезиальных базальтов к высокоглиноземистым базальт-андезибазальтам помогло бы расшифровать пути и

механизмы эволюции пород в магматической серии и ответить на вопрос о генезисе этих пород.

Анализ минералогических данных для серии пород Толбачинского дола.

Список опубликованных на сегодняшний день работ, посвященных изучению Толбачинского вулканического массива, насчитывает около 600 источников, включающих как российские, так и зарубежные публикации. Данные по химическим составам породообразующих минералов (*Ol*, *Spx*, *Pl*, *Spl*) в лавах Толбачинского дола содержатся лишь в нескольких десятках публикаций, и более половины этих данных относятся к породам, изверженным в ходе БТТИ (1975-1976 гг.) и ТТИ-50 (2012-2013 гг.). На рис. 1 и в таблице видно, что для всех вулканитов Толбачинского дола, за исключением последних двух трещинных извержений, минералогические данные фрагментарны, нередко в работах представлены в отрыве от петрохимических составов изверженных пород, а для вулканитов старше 1700 лет отсутствуют совсем.

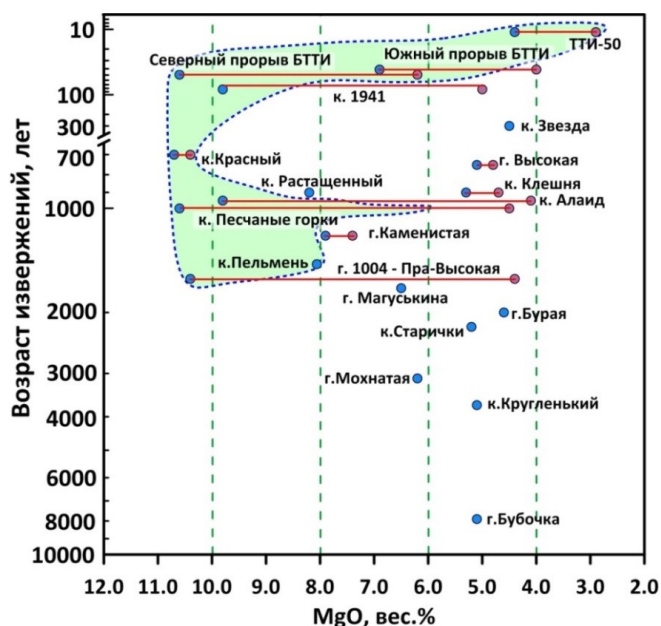


Рис. 1. Возраст некоторых вулканитов Толбачинского дола и содержание в них MgO, по данным [1, 7]. Зеленым полем показана область покрытия минералогическими данными (по публикациям) продуктов извержений Толбачинского дола разного возраста и состава.

Таблица. Анализ количества опубликованных данных по составам породообразующих минералов в вулканитах Толбачинского дола. Геохронологические определения возраста шлаковых конусов взяты из [1] с учетом обновленных определений ¹⁴C возраста из [7]

Извержение (название конуса)	Примерный возраст извержения (лет)	Диапазон содержаний MgO в породах, вес. %		Количество опубликованных химических анализов породообразующих минералов				Источник минералогических данных
		от	до	<i>Ol</i>	<i>Px</i>	<i>Pl</i>	<i>Spl</i>	
ТТИ-50	11	4.4	2.9	126	34	176	29	[2, 3]
Южный прорыв БТТИ	48	6.9	4	17	13	17	37	[1 и ссылки в ней, 3, 6]
Северный прорыв БТТИ	49	10.6	6.2	66	10	8	69	
конус 1941	83	9.8	5	12	–	–	12	[6]
конус Красный	700	10.7	10.4	52	–	–	52	[6]
конус Алайд	950	9.8	4.1	45	–	–	45	[6]
конус Песчаные горки	1000	10.6	4.5	54	18	–	29	[1, 5, 6]
конус Каменистая	1200	7.9	7.4	–	1	–	–	[1]
конус Пельмень	1450	8.1		39	–	–	39	[6]
конус 1004	1600	10.4	4.4	16	1	2	16	[1, 6]
поле Магуськина	1700	6.5		1	2	–	–	[1]

Наличие достаточно большого числа химических анализов оливинов и включенных в них шпинелей для ряда высокомагнезиальных конусов Толбачинского

дола в отдельных публикациях [6] обусловлено задачами изучения вулканизма и геодинамики Курило-Камчатской островной дуги в целом. Поэтому в этих данных не представлено разнообразие фаз минералов в породе (фенокристаллы, субфенокристаллы и микролиты, в кристаллах – ядро или край зерна), важное для понимания эволюции того или иного минерала.

В наиболее изученных лавах последних двух ивержений общее число химических анализов минералов для лав последнего ивержения ТТИ-50 заметно выше (365 анализов), чем для лав более крупного и петрохимически разнородного ивержения БТТИ (237 анализов). Это также подчеркивает значительную диспропорцию в степени изученности продуктов различных ивержений Толбачинского дола.

Вариационные диаграммы на рис. 2 построены согласно опубликованным данным. Полями составов оконтурены минералы лав наиболее изученных трещинных ивержений Толбачинского дола – БТТИ и ТТИ-50. Отдельными точками показаны составы минералов в продуктах различных голоценовых ивержений. Из графиков видно, что среди минералов в лавах голоценовых ивержений Толбачинского дола больше всего точек составов оливинов (и включенных в них шпинелей) в различных высокомагнезиальных базальтах из работы [6]. Эта работа посвящена изучению хром-шпинелей в лавах Камчатки, и данные по составам оливинов ранней генерации в ней лишь отчасти характеризуют включающие их высокомагнезиальные породы. Опубликованные петрохимические данные по плагиоклазам и пироксенам в лавах голоценовых ивержений Толбачинского дола еще более скудны. Серые поля составов, взятые из работы [3], также характеризуют составы минералов в лавах голоценовых ивержений Толбачинского дола старше 1.7 тыс. лет. Однако, и в обсуждаемой работе, и в других ранее опубликованных отсутствуют исходные табличные данные по петрохимии этих минералов и указание на то, к лавам каких ивержений они относятся.

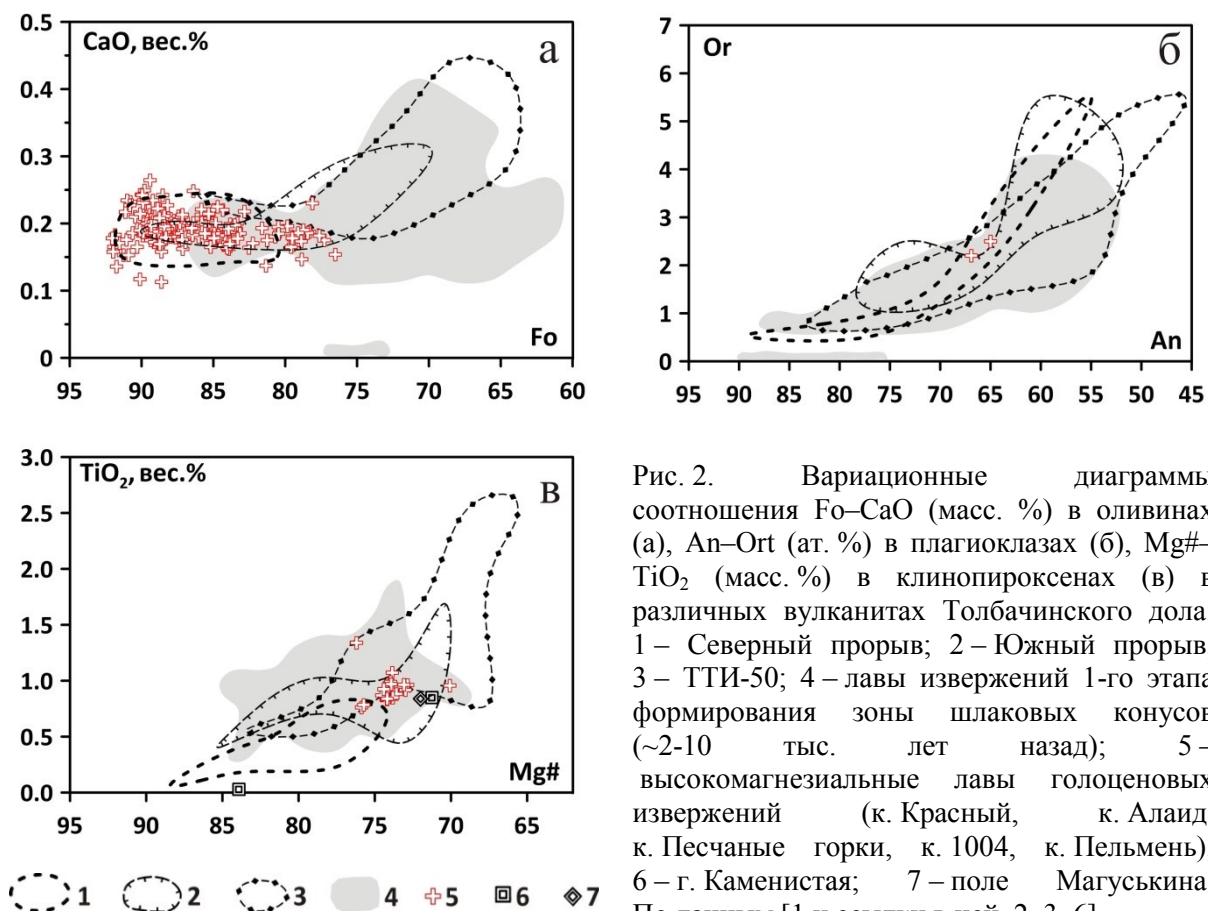


Рис. 2. Вариационные диаграммы соотношения Fo–CaO (масс. %) в оливинах (а), An–Ort (ат. %) в плагиоклазах (б), Mg#–TiO₂ (масс. %) в клинопироксенах (в) в различных вулканитах Толбачинского дола: 1 – Северный прорыв; 2 – Южный прорыв; 3 – ТТИ-50; 4 – лавы ивержений 1-го этапа формирования зоны шлаковых конусов (~2-10 тыс. лет назад); 5 – высокомагнезиальные лавы голоценовых ивержений (к. Красный, к. Алаид, к. Песчаные горки, к. 1004, к. Пельмень); 6 – г. Каменистая; 7 – поле Магуськина. По данным [1 и ссылки в ней, 2, 3, 6].

Помимо собственно минералогии, важный аспект при рассмотрении механизма формирования серии пород Толбачинского дола играет петрография пород. Так, например, высокомагнезиальные базальты Северного прорыва – это практически афировые мелкопористые породы, в которых субфенокристаллы оливина и клинопироксена размером более 0.1 мм редки [1]. Высокомагнезиальные базальты горы 1004, в свою очередь, – это порфиновые породы с крупными вкрапленниками оливина до 5-7 мм, занимающими до 10 % объема породы [8]. При этом, и те, и другие лавы петрохимически идентичны. Факт наличия порфировых и афировых структур в породах вулкана Толбачик с одинаковым валовым химическим составом ставит вопрос о различиях в механизмах формирования этих петрографических разностей.

Заключение. Анализ опубликованных на сегодняшний день минералогических данных о магматической серии пород Толбачинского дола показал, что эти данные для продуктов извержений разного возраста и состава распределены крайне неоднородно как по числу петрохимических анализов минералов, так и по представленности различных фаз минералов в породе. При рассмотрении механизма формирования магматической серии пород вулкана Толбачик от высокомагнезиальных базальтов к высокоглиноземистым базальт-андезиобазальтам большинство исследователей игнорируют минералогический аспект, либо оставляют ему второстепенное значение. Однако, механизм формирования магматических серий пород связан с фракционированием минеральных фаз, и без пристального изучения эволюции их составов во всех породах серии невозможно объективно установить механизмы их формирования.

Список литературы

1. Большое трещинное Толбачинское извержение. Камчатка. 1975-1976. / Отв. ред. С.А. Федотов. М.: Наука, 1984. 637 с.
2. *Волюнец А.О., Мельников Д.В., Грибоедова И.Г.* Вещественный состав вулканических пород Толбачинского трещинного извержения 2012-2013 гг. В кн.: Толбачинское трещинное извержение 2012-2013 гг. / Отв. ред. Е.И. Гордеев. Новосибирск. Издательство СО РАН, 2017. С. 173-214.
3. *Флеров Г.Б., Ананьев В.В., Пономарев Г.П.* Петрогенезис пород вулканов Острого и Плоского Толбачиков и соотношение вулканических проявлений базальтовой и трахибазальтовой магм на территории Толбачинского Дола (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2015. № 3. С. 15-35. <https://doi.org/10.7868/S0203030615030025>
4. *Чурикова Т.Г., Гордейчик Б.Н., Флеров Г.Б. и др.* Петрологическая, геохимическая и изотопная эволюция Толбачинского вулканического массива. В кн.: Толбачинское трещинное извержение 2012-2013 гг. / Отв. Ред. Е.И. Гордеев. Новосибирск. Издательство СО РАН. 2017. С. 131-172.
5. *Iveson A.A., Humphreys M.C., Jenner F.E. et al.* Tracing Volatiles, Halogens, and Chalcophile Metals during Melt Evolution at the Tolbachik Monogenetic Field, Kamchatka // Journal of Petrology. 2022. Т. 63. № 9. P. 1-22. <https://doi.org/10.1093/petrology/egac087>
6. *Nekrylov N., Portnyagin M.V., Kamenetsky V.S. et al.* Chromium spinel in Late Quaternary volcanic rocks from Kamchatka: Implications for spatial compositional variability of subarc mantle and its oxidation state // Lithos. 2018. V. 322. P. 212-224. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2018.10.011>
7. *Ponomareva V., Portnyagin M., Pevzner M. et al.* Tephra from andesitic Shiveluch volcano, Kamchatka, NW Pacific: chronology of explosive eruptions and geochemical fingerprinting of volcanic glass // International Journal of Earth Sciences. 2015. V. 104. P. 1459-1482. <https://doi.org/10.1007/s00531-015-1156-4>
8. *Portnyagin M., Duggen S., Hauff F. et al.* Geochemistry of the late Holocene rocks from the Tolbachik volcanic field, Kamchatka: quantitative modelling of subduction-related open magmatic systems // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 307. P. 133-155. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.08.015>

Моделирование термогидродинамических процессов в конусе Авачинского вулкана

Черных Е.В., Кирюхин А.В., Усачева О.О.

Modeling of thermohydrodynamic processes in the cone of Avachinsky volcano

Chernykh E.V., Kiryukhin A.V., Usacheva O.O.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: jenia.chev@yandex.ru

Магмо-гидротермальная активность вулканов сопровождается гидротермальными взрывами, которые могут приводить к трагическим последствиям. Для прогноза предельного возрастания давления под лавовой пробкой в кратере Авачинского вулкана до его извержения оценивается тепловой эффект инъекций магмы в конус вулкана с применением термогидродинамического TOUGH2-моделирования.

Введение. Цель данного исследования – анализ термогидродинамических моделей для прогноза давления пара, при котором может произойти разрушение лавовой пробки Авачинского вулкана по принципу гидротермального взрыва. Тема актуальна в связи с активным посещением вулкана (2-3 тыс. чел/год).

Под гидротермальным взрывом (фреатическим извержением, магмо-фреатическим извержением и т.п.) понимается процесс разрушения верхнего водоупора (в частности это может быть лавовая пробка) при нарастании давления пара на его подошве выше величины горного давления. Причиной гидротермального взрыва может быть контакт магмы с водой с последующим ее преобразованием из жидкой фазы в пар. Гидростатический градиент по пару на 2-3 порядка меньше чем у воды, что приводит к передаче давления пара по вертикали от зоны нагрева до пробки без существенного уменьшения.

Примеры исторических гидротермальных извержений описаны в многочисленных публикациях [8-10, 13, 14]. Фреатическое извержение вулкана Онтакэ в Японии 27.09.2014 г. произошло спустя несколько месяцев после магматической активности вулкана. Извержение было внезапным, началось с сухих пирокластических плотных потоков, с последующим камнепадом и выпадением тефры с дождем, истечением из кратера мутной горячей воды; число жертв составило 64 человека [9, 13, 14]. На вулкане Белый остров (Новая Зеландия) 09.12.2019 г. неожиданное фреатическое извержение привело к гибели 21 человека и еще 26 получили ранения [9]. Сель и оползень в Долине гейзеров в 2007 и 2014 гг. [10, 11] и обвал в кратере Мутновского вулкана в 2021 г. по счастливой случайности обошлись без человеческих жертв [6].

Активность и геологическое строение конуса Авачинского вулкана. Молодой конус Авачинского вулкана начал формироваться 3800 лет тому назад [3], он сложен лавовыми потоками андезитов и базальтов, а также шлаковым материалом. Внутренняя часть конуса насыщена дайками и силлами, формирование которых продолжается в настоящее время (рис. 1). Водное питание осуществляется по всей поверхности конуса преимущественно в летний период за счет таяния снежников и ледников, а также жидких атмосферных осадков.

Сильные исторические извержения Молодого конуса Авачинского вулкана повторялись в среднем каждые 42 года [7]. С 1737 г. зафиксировано 15 таких событий [3-5]. В 1945 г. после сильного эксплозивного извержения на вулкане образовался кратер диаметром около 250 м и глубиной 170 м. После следующего извержения в январе 1991 г. в кратере образовалась мощная лавовая «пробка» (рис. 1) объемом $8.3 \times 10^6 \text{ м}^3$ [4]. В октябре 2001 г., во время следующей активизации, образовалась трещина, пересекающая лавовую «пробку» в СЗ-ЮВ направлении [6].

Тепловая мощность фумарол Авачинского вулкана оценивается по формулам дымовых труб [7] в среднем 60 МВт (1981 г., 4 замера) и 30 МВт (2023 г., 3 замера). По

данным газогидрохимического опробования западной фумаролы [1] и восточной фумаролы [2], газовый состав – азотно-углекислый с метаном, температура от 91 до 166 °С (Западная) и от 570 до 626 °С (Восточная), по изотопному составу вода имеет смешанное метеорно-магматическое происхождение, CO₂ – магматического происхождения [1, 12].

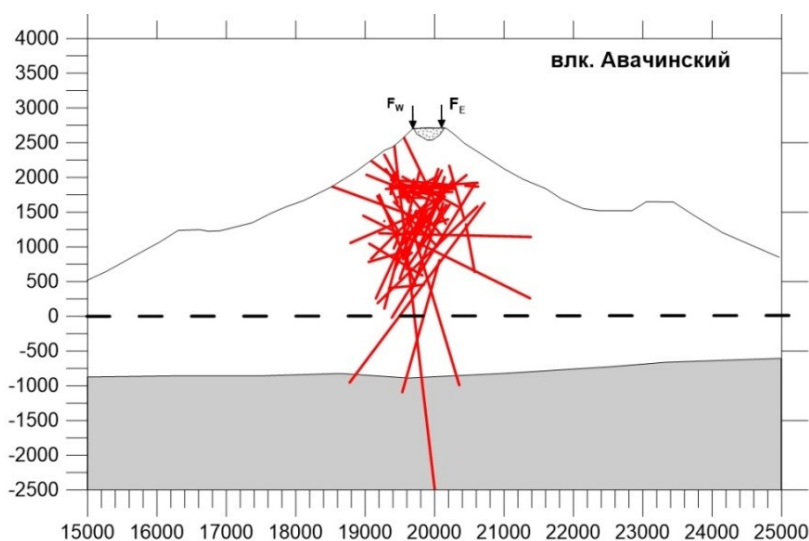


Рис. 1. Вертикальный разрез постройки Авачинского вулкана в направлении С3-ЮВ.

F_W – западная фумарола, F_E – восточная фумарола; красные линии – дайки и силлы, определенные Frac-Digger методом ($\delta_t = 1$ сут.; $\delta_r = 6$ км; $\delta_z = 200$ м; $N \geq 6$ [1]).

Магматическая активность в период с 2000 по 2023 гг. оценивается Frac-Digger методом [1], за рассматриваемый период в постройке Авачинского вулкана выявлено 72 дайки и 14 силлов, преимущественно в диапазоне глубин +1500-2000 м абс. (рис. 1).

Описание термогидродинамической модели. Для оценки термогидродинамических условий в конусе Авачинского вулкана использована программа TOUGH2 с модулем состояния EOS1, а для визуализации результатов моделирования использовалось программное обеспечение PetraSim 5.2.

Сборка модели. Геометрия модели определена для описания процессов в основании конуса в диапазоне от 1500 до 2000 м абс., размеры модели в плане 2.2×2.2 км. Вычислительная сетка 2D со следующими параметрами разбиения: $\Delta X = 200$ м ($NX = 11$) $\Delta Y = 200$ м ($NY = 11$), общее количество элементов модели – 121. Высота модели $\Delta Z = 500$ м ($NZ = 1$) (рис. 2).

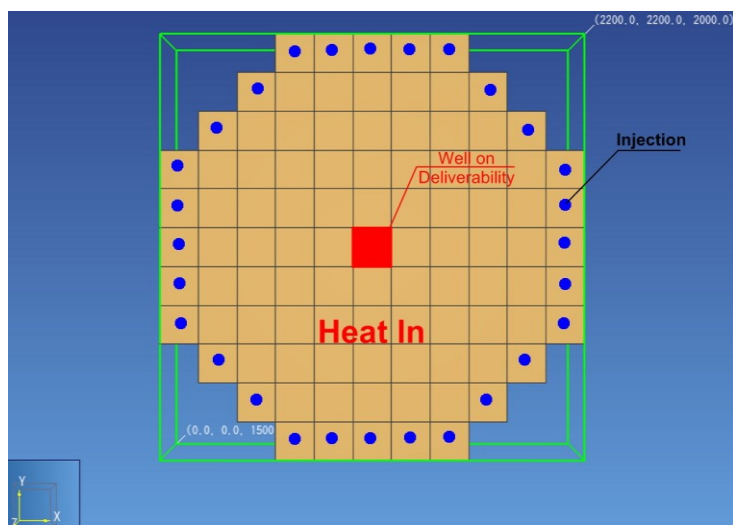


Рис. 2. Геометрия области моделирования, условия теплового и водного питания.

Начальные условия и фильтрационно-емкостные свойства определены следующим образом. Плотность горных пород 2700 кг/м³, пористость – 0.1,

проницаемость 10^{-13} м^2 . Начальные условия: температура $T = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, газонасыщение $S_g = 0.5$, давление $P = 1 \text{ бар}$.

Источники и стоки. По периферии модели (рис. 2) задан приток метеорных вод (1.8 кг/с , $10 \text{ }^\circ\text{C}$), во внутренней части модели заданы источники тепла (силлы и дайки) – 5.0 МВт в каждом из элементов модели (суммарно 340 МВт). В центре модели определена разгрузка (фумаролы) – элемент модели #61 (well on deliverability) $PI = 1 \times 10^{-10} \text{ м}^3$, $P = 1 \text{ бар}$.

Результаты моделирования. Выполнено TOUGH2-моделирование для оценки динамики изменения температуры, давления и насыщения газовой фазы на кровле модельного геотермального резервуара (подошва лавовой пробки в кратере Авачинского вулкана) в течение 100 лет.

Полученная в результате моделирования (100 лет) прогнозная температура на подошве лавовой пробки в центральной части конуса Авачинского вулкана оценивается от 286 до $292 \text{ }^\circ\text{C}$, давление – от 71 до 77 бар , насыщение газовой фазы – от 0.29 до 0.43 (рис. 3). Таким образом, результаты моделирования показывают возможность разрушения верхнего водоупора модельного геотермального резервуара мощностью 170 м при плотности слагающих его горных пород 2700 кг/м^3 (горное давление $2700 \times 170 \times 9.81 / 10000 = 45 \text{ бар}$) через 87 лет (рис. 3).

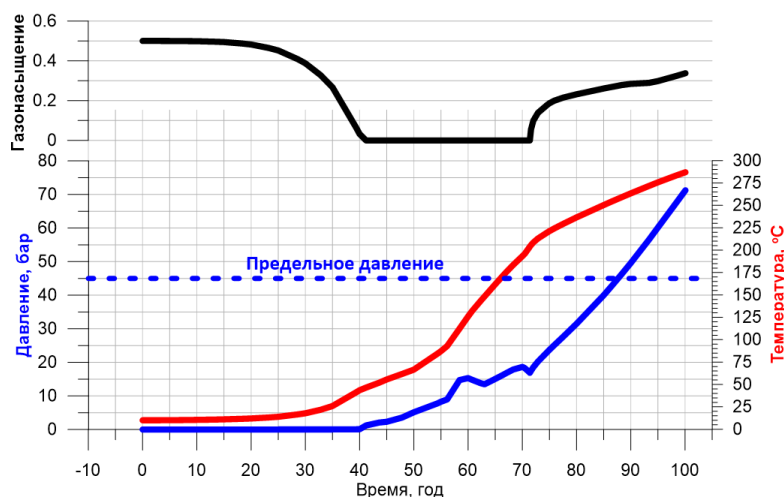


Рис. 3. Прогнозируемое изменение температуры, давления и насыщения газовой фазы модельного геотермального резервуара (центр подошвы лавовой пробки конуса Авачинского вулкана). Давление – синяя линия, температура – красная линия, газонасыщение – черная линия.

Обсуждение результатов и выводы:

1. Результаты моделирования показывают возможность гидротермального взрыва с разрушением лавовой пробки конуса Авачинского вулкана в течение 87 лет при заданных на модели условиях теплового и водного питания.

2. Источники теплового и водного питания, заданные на рассматриваемой модели, определены как постоянные величины, значения которых нуждаются в более глубоком обосновании. Кроме того, водное питание имеет сезонный характер, а тепловое зависит от режима магматической деятельности. Присутствие неконденсирующихся газов (НКГ: CO_2 , N_2 , CH_4) может значительно ускорить процесс разрушения лавовой пробки. При этом увеличение доли НКГ может сопровождаться понижением температуры на режимных фумаролах.

3. Применяемый инструмент TOUGH2-моделирования может быть значительно усовершенствован и приближен к условиям модельного объекта. В связи с этим, задачами дальнейших исследований являются: (1) 3D-геометризация конуса Авачинского вулкана в диапазоне отметок выше 1500 м абс. и распределенной разгрузки фумарол; (2) применение модулей состояния флюидов EOS2 (с учетом CO_2), EOS3 (с учетом N_2), EOS1-sc (расширение диапазона модельных температур до $2000 \text{ }^\circ\text{C}$); (3) для калибровки модели и оценки чувствительности оцениваемых параметров к исходным данным будут применены методы инверсионного iTOUGH2-

моделирования с использованием в качестве исходных данных значений тепловой разгрузки (фумаролы) и притока/аккумуляции магмы в конусе Авачинского вулкана по сейсмическим данным.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда «Исследования магмо-газо-водопроводящих систем активных вулканов» № 23-27-00127, <https://rscf.ru/project/23-27-00127/>.

Авторы выражают признательность зав. Лаборатории геодезии и дистанционных методов исследований ИВиС ДВО РАН И.К. Миронову за предоставление актуальной цифровой карты кратера, С.А. Миронову, Н.Б. Журавлеву, А.В. Сокоренко, И.А. Нуждаеву – за предоставление видеоматериалов кратера.

Список литературы

1. *Кирюхин А.В.* Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. Санкт-Петербург: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
2. *Малик Н.А., Зеленский М.Е., Округин В.М.* Температура и состав газа фумарол вулкана Авачинский (Камчатка) в 2013-2016 гг. // Вестник КРАУНЦ. Науки о земле. 2017. № 1. Вып. 33. С. 21-32.
3. *Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И.* Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. I (1737-1909 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1993. № 6. С. 13-27.
4. *Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Двигало В.Н., Базанова Л.И.* Исторические извержения Авачинского вулкана на Камчатке (попытка современной интерпретации и классификации для долгосрочного прогноза типа и параметров будущих извержений). Ч. II (1926-1991 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1994. № 2. С. 3-23.
5. *Мелекесцев И.В., Селиверстов Н.И., Сеньюков С.Л.* Информационное сообщение об активизации в октябре 2001 г. вулкана Авачинский на Камчатке и проведенных исследованиях // Вулканология и сейсмология. 2002. № 2. С. 79-80.
6. *Поляков А.Ю., Усачева О.О., Кирюхин А.В. и др.* Магматическая активность Мутновского вулкана в 2021 г. // Вулканизм и связанные с ним процессы: Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, Петропавловск-Камчатский, 30-31 марта 2022 года. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 66-69.
7. *Федотов С.А.* Оценка выноса тепла и пирокластики вулканическими извержениями и фумаролами по высоте их струй и облаков // Вулканология и сейсмология. 1982. № 2. С. 3-28.
8. *Browne P.R.L., Lawless J.V.* Characteristics of hydrothermal eruptions, with examples from New Zealand and elsewhere // Earth-Science Reviews. 2001. V. 52. P. 299-331.
9. *Eichelberger J., Kiryukhin A., Mollo S. et al.* Exploring and Modeling the Magma-Hydrothermal Regime // Geosciences. 2020. V. 10. № 6. Art. 234. DOI: 10.3390/geosciences10060234
10. *Kiryukhin A.V., Rychkova T.V., Dubrovskaya I.K.* Formation of the hydrothermal system in Geysers Valley (Kronotsky Nature Reserve, Kamchatka) and triggers of the Giant Landslide // Applied Geochemistry. 2012. V. 27. № 9. P. 1753-1766. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.02.011
11. *Kiryukhin A.V., Sergeeva A.V., Usacheva O.O.* Modeling of the thermal-hydrodynamic and chemical regime of Geysers reservoir (Valley of Geysers, Kamchatka) // Geothermics. 2023. V. 115. Art. 102808. DOI: 10.1016/j.geothermics.2023.102808
12. *Kiryukhin A., Lavrushin V., Kiryukhin P., Voronin P.* Geofluid Systems of Koryaksky-Avachinsky Volcanoes (Kamchatka, Russia) // Geofluids. 2017. V. 2017. Art. 4279652.
13. *Oikawa T., Yoshimoto M., Nakada S. et al.* Reconstruction of the 2014 eruption sequence of Ontake Volcano from recorded images and interviews // Earth, Planets and Space. 2016. V. 68. Art. 79. DOI: 10.1186/s40623-016-0458-5
14. *Uchida N.* Effects of extreme rainfall on phreatic eruptions: A case study of Mt. Ontake in Japan // EarthArXiv. 2023. DOI: 10.31223/X58D4J

Анализ активности Ключевского вулкана в 2023 году на основе статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09

Шакирова А.А., Салтыков В.А.

Analysis of Klyuchevskoy volcano activity in 2023 based on a statistical assessment of the seismicity level SOUS'09

Shakirova A.A., Saltykov V.A.

Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: shaki@emsd.ru

В октябре 2023 г. произошло извержение Ключевского вулкана (п-ов Камчатка), во время которого высота пепловой колонны достигла отметки ~15 км. Оно предварялось высокой сейсмической активностью. Проведен анализ сейсмической активности Ключевского вулкана в 2023 г. на основе статистической оценки уровня сейсмичности СОУС'09 в четырех наиболее сейсмоактивных объемах среды под Ключевским вулканом.

Введение

Вулкан Ключевской – самый высокий действующий вулкан Евразии, его абсолютная высота над уровнем моря составляет ~4800 м. С 2003 г. он практически непрерывно находится в состоянии извержения.

На данный момент существующая сеть сейсмических станций Камчатского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) позволяет проводить детальный сейсмический мониторинг Ключевского вулкана [3], локализуя землетрясения в районе вулкана с минимальным энергетическим классом $K_s=1.8$ [4].

В работе рассмотрено извержение Ключевского вулкана, произошедшее в 2023 г. Извержение предварялось и сопровождалось высокой сейсмической активностью с глубинами очагов землетрясений до 36 км (рис. 1). Согласно фактографической базе данных КФ ФИЦ ЕГС РАН «Активность вулканов Камчатки» (<http://www.emsd.ru/~ssl/monitoring/main.htm>), с 22 июня в кратере Ключевского вулкана отмечалось свечение, а с ~21-26 июля началось излияние лавового потока. Пик пароксизмальной фазы зафиксирован 16 октября и 28 октября – 1 ноября, когда пепловые тучи поднимались до высоты 10-15 км.

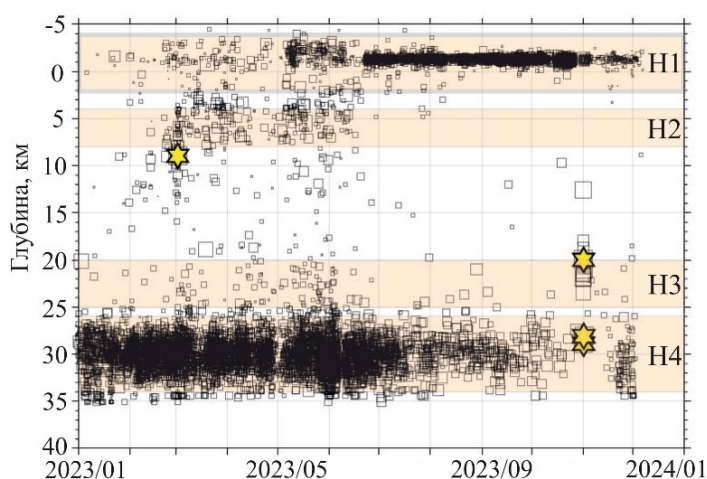


Рис. 1. Глубина гипоцентров землетрясений, зарегистрированных в районе вулкана Ключевской в 2023 г. Звездочками обозначены землетрясения с $K_s \geq 7.3$. Н1-Н4 – глубины четырех наиболее сейсмоактивных объемов среды, выбранных для анализа.

В данной работе проводится оценка уровней сейсмичности района Ключевского вулкана в 2023 г. Уровни привязаны к статистической функции распределения сейсмической энергии. Учитывая статистический характер базового параметра, методика получила название «Статистическая оценка уровня сейсмичности» (СОУС'09) [2]. Вариации уровней сейсмичности в четырех наиболее сейсмоактивных

объемах среды под вулканом Ключевской сопоставляются с эпизодами зафиксированной вулканической активности.

Исходные данные и методика

В работе использован каталог землетрясений КФ ФИЦ ЕГС РАН в районе Ключевского вулкана за 2023 г. [4]. При выборе анализируемых сейсмоактивных объемов учитывались особенности поведения сейсмичности под Ключевским вулканом и элементы его магматической питающей системы. Динамика сейсмичности анализировалась в четырех объемах среды, выделенных по максимумам плотности землетрясений (рис. 1): поверхностном ($-4 \leq H \leq 2$ км), близповерхностном ($4 \leq H \leq 8$ км), промежуточном в коромантийном слое ($20 \leq H \leq 25$ км) и глубоком ($26 \leq H \leq 34$ км). Для удобства обозначим их, соответственно, Н1, Н2, Н3, Н4. Итоговая выборка землетрясений по заданным эллипсам и глубинам Н1-Н4 приведена на рис. 2.

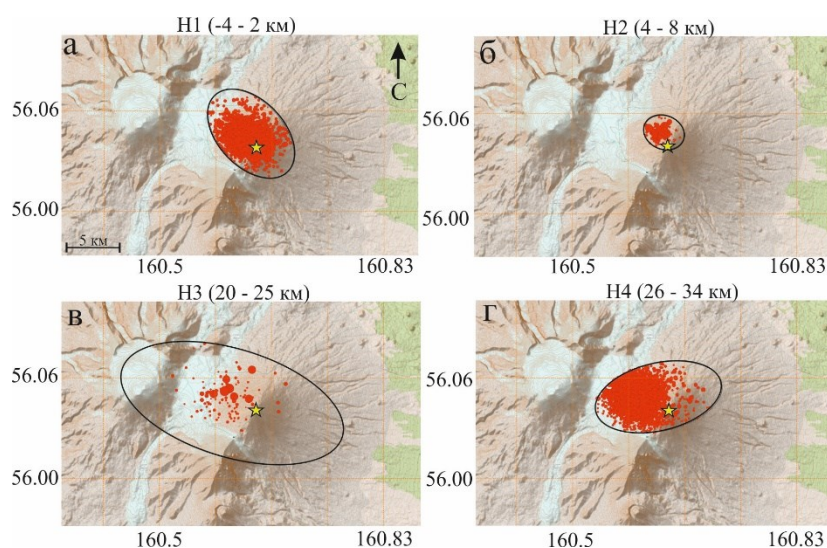


Рис. 2. Выборка землетрясений из каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН за 2023 г. по заданному эллипсу и глубине от -4 до 2 км (а), 4-8 км (б), 20-25 км (в), 26-34 км (г). Звездочкой отмечена вершина Ключевского вулкана.

Для описания уровня сейсмичности в КФ ФИЦ ЕГС РАН разработана и внедрена шкала, привязанная к статистической функции распределения сейсмической энергии [2] в качестве параметра, характеризующего уровень сейсмичности заданного пространственного объекта в определенный временной интервал:

$$F(K) = P(\lg E \leq K),$$

где E – сейсмическая энергия, выделившаяся за определенный временной интервал; $P(\lg E \leq K)$ – относительная частота временных интервалов с эквивалентным энергетическим классом $\lg E$.

Функция распределения энергии строится по значениям сейсмической энергии в скользящем временном окне определенной длины. Интервалы между квантилями распределения выделившейся сейсмической энергии формируют шкалу, включающую семь уровней сейсмичности: экстремально высокий $0.995 \leq F(\lg E)$; высокий $0.975 \leq F(\lg E) < 0.995$; фоновый повышенный $0.85 \leq F(\lg E) < 0.975$; фоновый средний $0.15 < F(\lg E) < 0.85$; фоновый пониженный $0.025 < F(\lg E) \leq 0.15$; низкий $0.005 < F(\lg E) \leq 0.025$; экстремально низкий $0.005 \leq F(\lg E)$.

Методика СОУС'09 программно реализована: разработана система вычисления уровня сейсмичности произвольного региона в виде компьютерной программы Windows [1].

Для выбранных сейсмоактивных объемов построены номограммы уровня сейсмической активности, позволяющие по значению выделившейся сейсмической энергии за конкретное время определить соответствующий уровень сейсмичности (рис. 3).

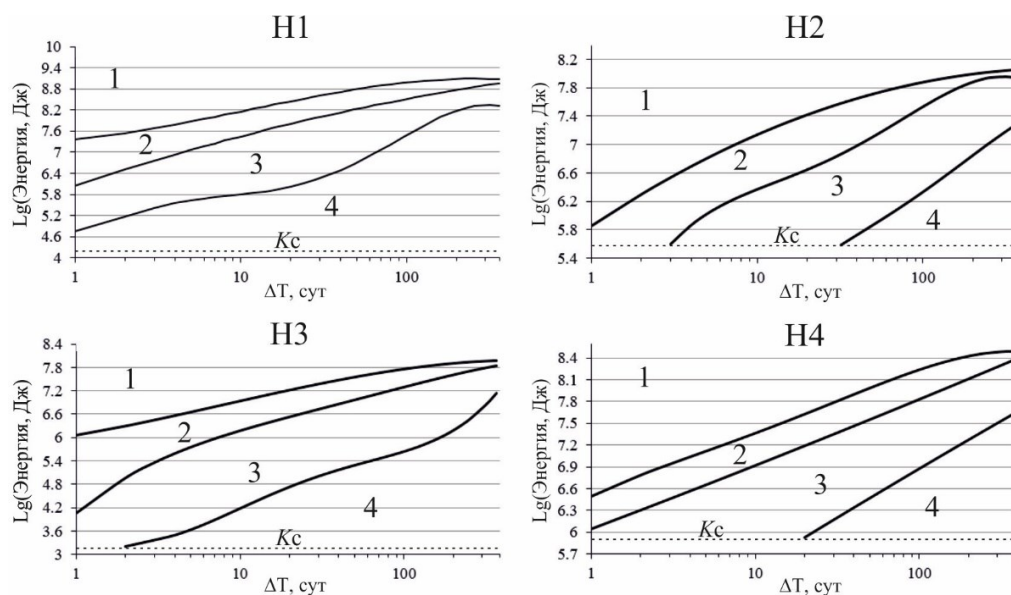


Рис. 3. Номограммы уровня сейсмической активности для вулкана Ключевской в 4 объемах среды Н1-Н4: 1 – экстремально высокий, 2 – высокий, 3 – фоновый повышенный, 4 – фоновый средний. Кс – представительный энергетический класс.

Результаты

Анализ временного хода уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 2023 г. показывает, что извержение, начавшееся во второй половине июня 2023 г. (рис. 4, желтая полоса), предвлялось статистически значимым повышением сейсмической активности.

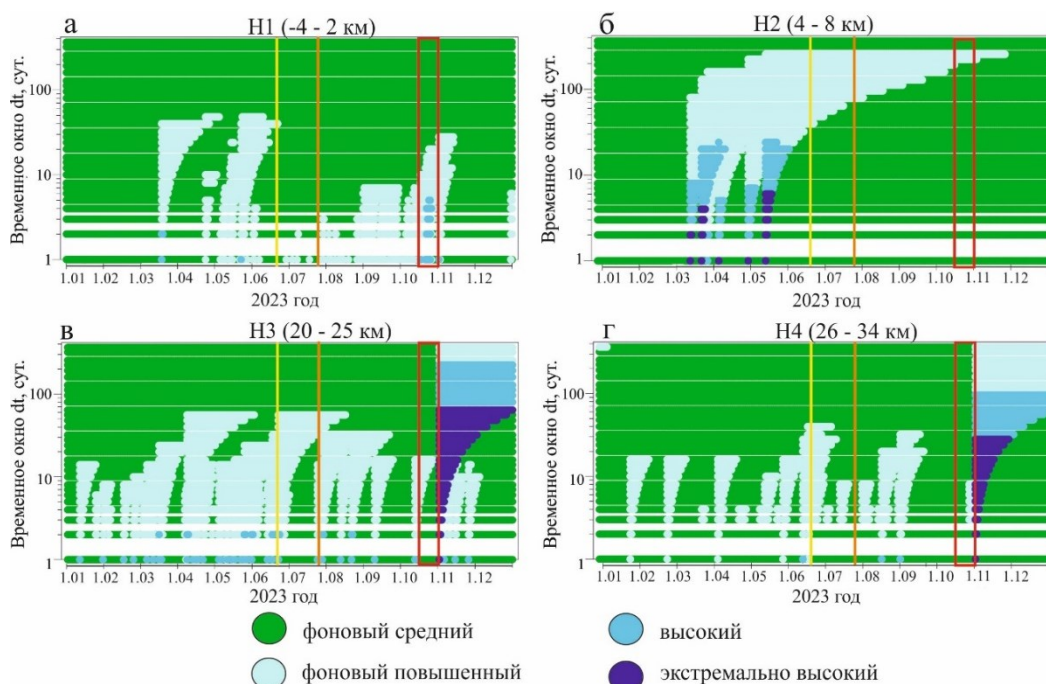


Рис. 4. СОУСграммы для вулкана Ключевской за 2023 г. для объемов Н1-Н4. Желтая полоса – появление лавы в кратере вулкана, оранжевая полоса – начало излияния лавового потока, красный прямоугольник – наиболее сильная эксплозивная фаза извержения Ключевского вулкана.

Наиболее ярко рост сейсмичности с выходом на высокий и экстремально высокий уровни проявился в объеме Н2 за 1-3 месяца до появления лавы в кратере вулкана (рис. 4б). Высокий уровень получен в окнах 2-12 сут., экстремально высокий – в окнах 2-6 сут.

Высокий уровень сейсмичности в Н1 в окнах 2-5 сут. соответствовал периоду сильной эксплозивной фазы извержения в конце октября (рис. 4а). Кульминационная фаза извержения произошла 31 октября – 1 ноября, когда пепловые облака поднимались до высоты 10-15 км (согласно базе «Активность вулканов Камчатки» Камчатской группы реагирования на вулканические извержения (KVERT, <http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/>)). После кульминационной фазы сейсмическая активность в Н1 снизилась, а в Н3 и Н4 достигла экстремально высокого уровня в окнах 2-70 сут. и 2-30 сут., соответственно (рис. 4в, г), что может быть связано с перераспределением напряжений в окрестности питающей системы вулкана. На настоящей стадии исследования можно предложить гипотезу о том, что экстремально высокий или высокий уровень сейсмичности на больших глубинах (в Н3 и Н4) после кульминационной фазы извержения может свидетельствовать об окончании извержения.

Заключение

Проведен анализ вариаций уровня сейсмичности Ключевского вулкана в 2023 г. Оценки сделаны на основе использования функций распределения сейсмической энергии, выделившейся в различных временных окнах в нескольких диапазонах глубин в районе вулкана, по данным каталога Ключевской группы вулканов КФ ФИЦ ЕГС РАН. Построены функции распределения сейсмической энергии и номограммы уровня сейсмичности. Полученные вариации уровня сейсмичности в 2023 г. могут быть соотнесены с эпизодами зафиксированной вулканической активности Ключевского вулкана: с процессом подготовки извержения и его окончанием. Ретроспективный анализ предыдущих извержений этого вулкана позволит уточнить выявленные особенности поведения сейсмичности до и после извержения и оценить перспективы использования методики СОУС'09 при мониторинге состояния Ключевского вулкана.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-17-20019, <https://rscf.ru/project/24-17-20019/>, Минобрнауки России (в рамках государственного задания № 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>).

Список литературы

1. *Воропаев П.В.* Программная реализация оценки уровня сейсмичности по методике СОУС'09 // Материалы X региональной молодежной научной конференции. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2012. С. 101-113.
2. *Салтыков В.А.* Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53-59.
3. *Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 18-40. <https://doi.org/10.7868/S0203030613010021>
4. *Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А., Чебров Д.В.* Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66-91. <https://doi.org/10.21455/gr2020.3-5>

Моделирование равновесия кварц-расплав в простых и многокомпонентных системах

Щеклеина М.Д.¹, Плечов П.Ю.², Дымшиц А.М.³

Modelling of Quartz-Melt equilibrium in simple and complex silicate systems

Shchekleina M.D., Plechov P.Yu., Dymshits A.M.

¹ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: mary.shec@yandex.ru

² Минералогический музей им. А.Е. Ферсмана РАН, г. Москва;
e-mail: pplechov@gmail.com

³ Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск;
e-mail: adymshits@crust.irk.ru

Предложена модель равновесия кварца и расплава с учетом таких параметров системы как химический состав, водонасыщенность и литостатическое давление. Модель построена на основе эмпирического уравнения, описывающего псевдоликвидусную поверхность, и откалибрована по представительной выборке экспериментов.

Введение

Первое численное описание равновесия кварц-расплав в многокомпонентной системе (1) было сделано в классической работе [10]. Калибровка полиномиального уравнения проводилась на экспериментальных данных в простых двойных и тройных системах. Эксперименты, вошедшие в выборку, проводились при атмосферном давлении, содержание воды в расплаве не учитывалось. Только в некоторых экспериментах контролировалась фугитивность кислорода. Системы с магнием и железом не содержали щелочей, а системы с щелочами не содержали магния и железа. Калибровка для кварца [9] может быть описана

$$T(^{\circ}\text{C}) = 1598 - 1204(\text{Al}) - 97(\text{Ti}) - 914(\text{Fe}^{3+}) - 857(\text{Fe}^{2+}) - 224(\text{Mg}) - 825(\text{Ca}) - 2252(\text{Na}) - 2996(\text{K}) - 575\sqrt{\text{Al} * (\text{Na} + \text{K})} \quad (1)$$

К настоящему моменту накоплен обширный набор экспериментов как в простых, так и в многокомпонентных системах в широком диапазоне давлений и температур, что позволяет значительно усовершенствовать модель, предложенную [10], и сделать ее применимой для оценки температур кристаллизации кварца в реальных геологических объектах.

Использованные данные и методы

Нами были суммированы данные по 235 экспериментам, в которых кристаллизовался кварц, приведен состав закалочного стекла и имеются оценки содержания воды. Для этого использованы выборки из баз данных LEPR [4] и MELT [3], которые дополнены данными из свежих статей [1, 2, 5-9, 12-17]. Эксперименты отражают широкие диапазоны составов расплава и условий: содержание SiO₂ в расплаве лежит в диапазоне 42.5-100 масс. %, но для калибровки использован диапазон 63.1-100 масс. %. Давление варьирует от 1 атм до 3.5 ГПа, температура – от 640 до 1713 °С (температура плавления кристобалита в атмосферных условиях), а длительность экспериментов – от 0.5 до 936 часов.

Калибровка модели равновесия кварц-расплав проводилась с допущением об аддитивности параметров, влияющих на температуру кристаллизации. Это допущение предполагает отсутствие влияния одних параметров на другие. В качестве второго допущения мы приняли, что влияние каждого независимого параметра на температуру кристаллизации имеет форму, близкую к линейной. Такие допущения позволяют использовать для описания псевдоликвидусной поверхности уравнение в форме многочлена, в котором каждый отдельный член отвечает за свой независимый

параметр. В качестве независимых использованы 7 параметров состава расплава (атомные доли Al, Ti, Fe, Mg, Ca, Na и K), дополнительный параметр структурного состояния расплава ($\sqrt{\text{Al} \cdot (\text{Na} + \text{K})}$) по [10], параметр водонасыщенности системы по [11] и параметр литостатического давления.

Калибровка модели проводилась в четыре последовательных этапа. На первом этапе подбирались коэффициенты для 4 параметров модели (Al, Na, K, $\sqrt{\text{Al} \cdot (\text{Na} + \text{K})}$). Для этого использовались эксперименты в синтетических системах, проведенные при атмосферном давлении в безводных условиях. На втором этапе в калибровке участвовали эксперименты, проведенные при различном давлении (до 3.5 ГПа) в безводных условиях. На третьем этапе мы определили влияние воды на температуру кристаллизации кремнезема с использованием экспериментов, проведенных в недонасыщенных и насыщенных водой условиях. На четвертом, финальном этапе мы использовали все экспериментальные данные и оценили влияние Ti, Fe, Mg и Ca на температуру кристаллизации кремнезема. Подбор коэффициентов проводился методом наименьших квадратов (минимизация суммы квадратов разницы экспериментальной и расчетной температуры для выборки). Результирующая модель представлена в виде Листа Microsoft Excel и позволяет рассчитывать температуру кристаллизации на основе химического состава расплавных включений в кварце.

Заключение

Используя представительную выборку из 235 экспериментов, было откалибровано уравнение (2), описывающее равновесие кварца и расплава с учетом таких параметров системы как химический состав, водонасыщенность и литостатическое давление. Полученное уравнение имеет вид:

$$T(^{\circ}\text{C}) = 1863.34 - 3589.3(\text{Al}) - 3444.7(\text{Ti}) - 1320.2(\text{Fe}_{\text{tot}}) - 1177.9(\text{Mg}) - 132.8(\text{Ca}) - 2589.1(\text{Na}) - 3249.4(\text{K}) - 15.722\sqrt{\text{Al} \cdot (\text{Na} + \text{K})} - 342.7(X_{\text{H}_2\text{O}}) + 197.5(\text{P}) \quad (2),$$

где Al, Ti, Fe_{tot} , Mg, Ca, Na, K – атомные доли катионов, $X_{\text{H}_2\text{O}}$ – водонасыщенность расплава при заданных температуре и давлении, P – давление в ГПа.

Оценки среднеквадратичного отклонения температур, полученных из данного уравнения и результатов экспериментов, составляют около 50 °С, что позволяет говорить о том, что наша модель удовлетворительно описывает равновесие кварц-расплав как в простых, так и в сложных природных системах в широком диапазоне давлений и температур. Отсутствие достаточного количества экспериментов с участием фтора и хлора не позволило провести калибровку этих компонентов. Однако следует иметь в виду, что их присутствие в значительных концентрациях может понижать температуру кристаллизации кварца и приводить к ошибкам при оценке на основе предложенной модели.

Работа поддержана грантом РФФИ № 22-17-00074, <https://rscf.ru/en/project/22-17-00074>.

Список литературы

1. Charlier B., Grove T.L., Namur O., Holtz F. Crystallization of the lunar magma ocean and the primordial mantle-crust differentiation of the Moon // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2018. V. 234. P. 50-69.
2. Gaetani G.A., Asimow P.D., Stolper E.M. Determination of the partial molar volume of SiO₂ in silicate liquids at elevated pressures and temperatures: a new experimental approach // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1998. V. 62. № 14. P. 2499-2508.
3. Girnis A.V. Olivine-orthopyroxene-melt equilibrium as a thermobarometer for mantle-derived magmas // *Petrology*. 2003. V. 11. № 2. P. 101-113.

4. *Hirschmann M.M., Ghiorso M.S., Davis F.A. et al.* Library of Experimental Phase Relations (LEPR): A database and Web portal for experimental magmatic phase equilibria data // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2008. V. 9. № 3. P. 1-15.
5. *Holtz F., Pichavant M., Barbey P., Johannes W.* Effects of H₂O on liquidus phase relations in the haplogranite system at 2 and 5 kbar // *American Mineralogist*. 1992. V. 77. № 11-12. P. 1223-1241.
6. *Longhi J., Boudreau A.E.* The orthoenstatite liquidus field in the system forsterite–diopside–silica at one atmosphere // *American Mineralogist*. 1980. V. 65. № 5-6. P. 563-573.
7. *Longhi J.* Liquidus equilibria and solid solution in the system CaAl₂Si₂O₈-Mg₂SiO₄-CaSiO₃-SiO₂ at low pressure // *American Journal of Science*. 1987. V. 287. № 4. P. 265-331.
8. *Martel C.* Eruption dynamics inferred from microlite crystallization experiments: application to Plinian and dome-forming eruptions of Mt. Pelée (Martinique, Lesser Antilles) // *Journal of Petrology*. 2012. V. 53. № 4. P. 699-725.
9. *Martel C., Pichavant M., Di Carlo I. et al.* Experimental constraints on the crystallization of silica phases in silicic magmas // *Journal of Petrology*. 2021. V. 62. № 1. P. 1-18.
10. *Nathan H.D., Vankirk C.K.* A model of magmatic crystallization // *Journal of Petrology*. 1978. V. 19. № 1. P. 66-94.
11. *Pletchov P.Yu., Gerya T.V.* Effect of H₂O on plagioclase-melt equilibrium // *Experiment in GeoSciences*. 1998. V. 7(2). P. 7-9.
12. *Rapp J.F., Draper D.S.* Fractional crystallization of the lunar magma ocean: Updating the dominant paradigm // *Meteoritics & Planetary Science*. 2018. V. 53. № 7. P. 1432-1455.
13. *Riker J.M., Blundy J.D., Rust A.C. et al.* Experimental phase equilibria of a Mount St. Helens rhyodacite: a framework for interpreting crystallization paths in degassing silicic magmas // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015. V. 170. P. 1-22.
14. *Singletary S.J., Grove T.L.* Experimental petrology of the Mars Pathfinder rock composition: Constraints on the interpretation of Martian reflectance spectra // *Journal of Geophysical Research: Planets*. 2008. V. 113. № E11. P. 1-9.
15. *Tollari N., Toplis M.J., Barnes S.J.* Predicting phosphate saturation in silicate magmas: an experimental study of the effects of melt composition and temperature // *Geochimica and Cosmochimica Acta*. 2006. V. 70. № 6. P. 1518-1536.
16. *Veksler I.V., Dorfman A.M., Borisov A.A. et al.* Liquid immiscibility and the evolution of basaltic magma // *Journal of Petrology*. 2007. V. 48. № 11. P. 2187-2210.
17. *Villiger S., Ulmer P., Müntener O., Thompson A.B.* The liquid line of descent of anhydrous, mantle-derived, tholeiitic liquids by fractional and equilibrium crystallization – an experimental study at 1.0 GPa // *Journal of Petrology*. 2004. V. 45. № 12. P. 2369-2388.

Восстановление геодинамических обстановок на южной окраине Охотского массива в пермское время на основании анализа туффитов

Александров В.Н.

Reconstruction of the geodynamic conditions on the southern margin of the Okhotsk massif in the Permian time based on the analysis of tuffites

Aleksandrov V.N.

Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург;

e-mail: dv-midav357@yandex.ru

Охотский массив является одним из немногих до сих пор слабо изученных районов нашей страны. В центральной и восточной части этого массива были выявлены ранее не известные отложения туффитов. В результате детального изучения состава данных пород были выявлены магматиты двух генераций – основного и средне-кислого состава, положительная европиевая аномалия, а также общее сходство геохимических характеристик этих пород с вулканитами, образованными из магм рифтогенных областей.

Введение

Охотский массив располагается на северном побережье Охотского моря на территории Хабаровского края. Это одно из немногих мест на планете, которое еще слабо изучено геологами. Первые систематические работы, включающие стратиграфические, тектонические и геолого-съёмочные исследования, на территории Охотского массива проводились лишь в 1960-х – 1970-х гг. [6, 7, 9, 11, 12], после этого проводились только «точечные» исследования, такие как изучение стратиграфии перми на обрамлении массива или датирование кристаллического фундамента [2-4, 6]. В последние годы во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте им. А.П. Карпинского были поставлены геолого-съёмочные работы масштаба 1:200 000 для создания геологических карт 2-го поколения. В ходе полевых работ было собрано большое количество материалов по петрографии и геохимии пермских отложений в центральной и восточной частях Охотского массива.

В результате первичного просмотра петрографических шлифов терригенных пород пермского возраста было обнаружено, что некоторые породы содержат большое количество туфогенного материала (от 40 до 80 %), ранее не описанного предшественниками [6, 9, 11]. Кроме того, в более ранних материалах содержалось очень мало информации о геодинамике и вулканизме пермских островных дуг в районе Охотского массива [2-4, 6-9, 11, 12].

Вследствие этого была поставлена задача восстановить геодинамические обстановки и источники сноса туфогенного материала в центральной и восточной части Охотского массива на основании петрографических и геохимических анализов туффитов.

Материалы и методы

Отложения пермского возраста, залегающие в центральной и восточной частях Охотского массива, разделяются на шесть свит: нижнепермские – ингычанская, нонкичанская, кухтуйская, и верхнепермские – эвричанская, дусканьинская и нюлкалинская (в данных материалах мы следуем принятому на геологических картах Охотского массива разделению перми на 2 отдела). Также свиты имеют территориальные границы: кухтуйская и нюлкалинская свиты распространены, в основном, в центральной части Охотского массива, где они представлены континентальными и прибрежно-морскими отложениями, а породы ингычанской, нонкичанской, эвричанской и дусканьинской свит расположены в восточной части массива и представлены прибрежно-морскими и морскими отложениями [6, 9, 11].

Большое количество туфогенного материала было встречено в 4 вышеперечисленных свитах: нонкичанской, кухтуйской, дусканьинской и нюлкалинской.

Всего было изучено 12 наиболее представительных проб туффитов. При петрографической характеристике пород использовалась классификация В.Н. Шванова [13]. Для получения геохимического состава исследуемых осадочных пород, в Центральной лаборатории Института Карпинского были проведены рентгенофлуоресцентный и ICP-MS анализы этих же проб. Полученные результаты по содержанию окислов, рассеянных и редкоземельных элементов позволили построить классификационные, дискриминационные и спайдер-диаграммы, которые, следуя подходам, изложенным в работах [5, 10, 14-16], позволили уточнить состав магматических пород в источниках туфогенного материала.

Петрографические исследования

В результате петрографических исследований было выявлено, что туффиты являются грубыми и незрелыми породами (петрокластические граувакки по классификации Шванова [13]). Судя по составу обломков, присутствовали 2 источника туфогенного материала: первый поставлял большое количество обломков магматических пород базальтового и андези-базальтового состава. В этих обломках полностью сохраняются текстурно-структурные особенности вулканических пород. Однако в туффитах также присутствуют значительные количества обломков кварца, калиевого полевого шпата и плагиоклаза андезин-олигоклазового состава, и из этого можно сделать вывод о наличии и второго источника, поставлявшего обломки магматических пород дацитового и риолитового состава.

Также было выявлено, что туффиты разных свит имеют разное соотношение обломков основных пород и минералов средних-кислых пород. Например: в туффитах кухтуйской свиты (ранняя пермь) наблюдается порядка 15 % кварц-полевошпатового материала от всей обломочной части, а обломков пород основного состава около 80 %; в туффитах нюлкалинской свиты (начало поздней перми) количество минералов средних-кислых пород доходит уже до 20 % против 75 % обломков базальтов и андезибазальтов; а в туффитах дусканьинской свиты (середина-конец поздней перми) количество кварц-полевошпатового материала доходит до 37 %.

Геохимические исследования

В результате геохимического исследования проб были подтверждены петрографические наблюдения.

По значениям Eu/Eu^* , La/Yb и La/Sm отношений туффиты имеют положительную европиевую аномалию (Eu/Eu^*) со средним значением 1.3-1.4 и низкую величину La/Yb и La/Sm отношений (среднее значение La/Yb – 2.5-3; средние значения La/Sm – 1.6-1.8), тогда как в остальных терригенных породах отмечается отрицательная европиевая аномалия и повышенные отношения La/Yb и La/Sm . Это может объясняться тем, что туффиты содержат в своем составе обломки базальтов и андезитов, в которых имеется большое количество лейст плагиоклаза, насыщенных европием.

При сравнении данных по Eu/Eu^* и La/Yb отношениям исследуемых туффитов со средними значениями для различных магматических и осадочных пород, приведенных в статье К.С. Конди [14], было выявлено наибольшее сходство с обломочными и магматическими породами палеозойского возраста. Кроме того, исследуемые туффиты показали наибольшее сходство с породами базальтового состава. Подобное сходство подтверждает петрографическое определение таких пород как «туффиты» и подтверждает незрелость и малую измененность данных пород.

По Eu/Eu^* отношению исследуемые туффиты ближе всего к деплетированной мантии (значение $Eu/Eu^*=1.1$) и зонам COX (значение $Eu/Eu^*=1-1.1$), а по La/Yb

отношению – к зонам СОХ (значение $La/Yb = 1.2-3.1$) (с использованием данных по О.А. Богатикову [1]). С учетом расположения объектов исследования на континентальной коре Охотского массива, можно предположить, что туффиты образовывались в зоне зарождения континентального рифтогенеза в тыловой зоне континентальной дуги.

Обсуждение результатов

На основе проведенных исследований можно сделать выводы, что туффиты образовывались в результате поступления материала из различных источников сноса. Одним из источников являлась Охотско-Тайгоноская вулканическая дуга на юге Охотского массива (рисунок), по данным А.С. Бякова [2-4] и Л.М. Парфенова [8] и по полученным геохимическим данным можно предположить, что она находилась на континентальном основании южного края массива. С этой дуги обильно поступали обломки вулканических пород преимущественно кислого и среднего составов (рисунок). В то же время, по отчетливой положительной европиевой аномалии, а также по $Th/Sc - Zr/Sc$, $La/Sc - Co/Th$, $Th - Th/U$ отношениям и концентрациям реперных элементов (Ti, P, K, Nb, Ta и др.), во многих туффитах присутствует большое количество обломков магматических пород основного состава, характерных для зон рифтогенеза. Можно предположить, что в тылу окраинной вулканической дуги начались процессы рифтообразования. В целом, состав туффитов характерен для отложений активной континентальной окраины с локально проявленным рифтогенезом (рисунок).

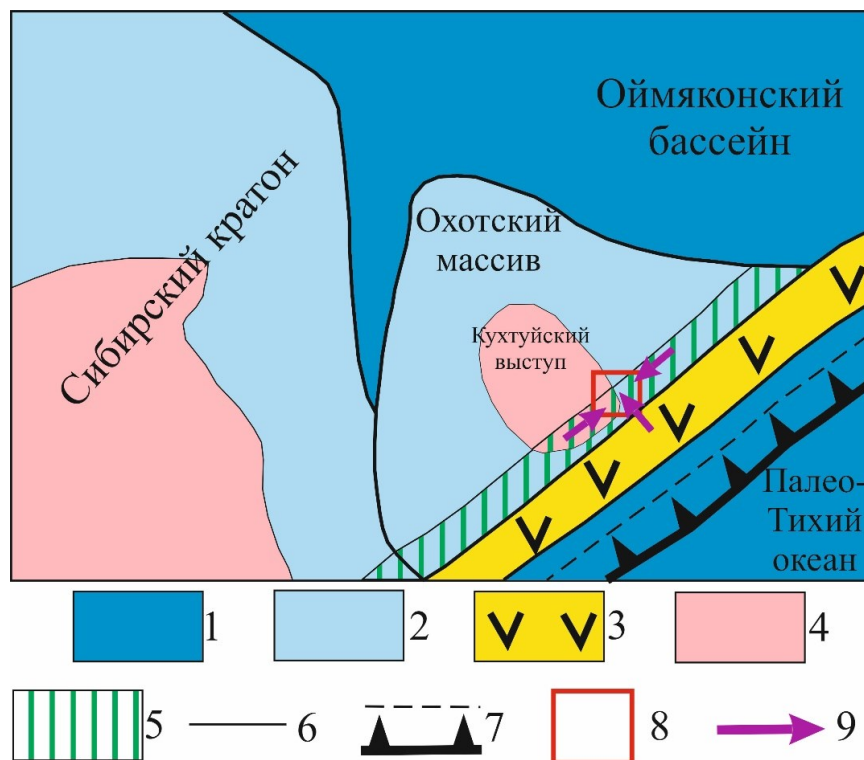


Рис. 1. Палеогеографическая реконструкция Охотского массива в пермское время (по Бякову [4] с дополнениями автора).

Условные обозначения: 1 – глубоководные морские бассейны; 2 – мелководные, эпиконтинентальные морские бассейны; 3 – Охотско-Тайгоноская (Кони-Тайгоноская) вулканическая дуга; 4 – суша; 5 – зона задугового рифтогенеза; 6 – границы Сибирского кратона и Охотского массива; 7 – зона субдукции; 8 – предполагаемая область накопления исследованных пород; 9 – направления переноса обломков магматических пород из вулканической дуги и задугового рифта.

Заключение

Подводя итог проведенному исследованию, можно произвести приблизительную интерпретацию геодинамических обстановок на Охотском массиве в пермское время. В этот период на территории массива и его северо-восточного обрамления располагался Охотский задуговой бассейн (рисунок) [3]. В южной части к массиву примыкала Охотско-Тайгоноская вулканическая дуга, начало формирования которой приходится на средний-поздний карбон, а максимум развития – на середину перми. Вероятнее всего, эта дуга была заложена на структурах самого Охотского массива и представляла собой энсиалическую вулканическую дугу или активную окраину андийского типа с соответствующими продуктами среднего и кислого вулканизма. Однако в тылу этой дуги происходил задуговый рифтогенез, за счет которого появлялись зоны базальтового вулканизма (рисунок). Активная вулканическая деятельность на энсиалической дуге и в зоне задугового рифта привела к накоплению туффитов с широким распространением обломков магматических пород различного состава.

Список литературы

1. Богати́ков О.А., Коваленко В.И., Шарков Е.В. Магматизм, тектоника, геодинамика Земли. М.: Наука, 2010. 606 с.
2. Бяков А.С. К структурно-фациальному районированию территории Северо-восточной Азии в перми // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2010. № 2. С. 2-7.
3. Бяков А.С., Ведерников И.Л., Акинин В.В. Пермские диамиктиты северо-востока Азии и их вероятное происхождение // Вестник СВНЦ ДВО РАН. 2010. № 1. С. 14-24.
4. Бяков А.С., Прокопьев А.В., Кутыгин Р.В. и др. Геодинамические обстановки формирования пермских седиментационных бассейнов Верхояно-Колымской складчатой области // Отечественная геология. 2005. № 5. С. 81-84.
5. Интерпретация геохимических данных / под ред. Е.В. Складорова. М: Интермет Инжиниринг, 2001. 288 с.
6. Казакова Г.Г., Васькин А.Ф., Кропачев А.П. и др. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-54 – Оймякон. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2013. 400 с. + 6 вкл.
7. Натанов Л.М., Сурмилова Е.П. Позиция и природа Охотского массива // Отечественная геология. 1995. № 2. С. 49-53.
8. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И. и др. Модель формирования орогенных поясов центральной и северо-восточной Азии // Тихоокеанская геология. 2003. Т 22. № 6. С. 7-41.
9. Песков Е.Г., Умитбаев Р.Б. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Приохотская. Лист Р-54-XXXVI. Объяснительная записка. Магадан, 1977. 80 с.
10. Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
11. Умитбаев Р.Б. Геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Серия Приохотская. Лист Р-55-XXXI. Объяснительная записка. Магадан, 1978. 94 с.
12. Чиков Б.М. Тектоника Охотского срединного массива. М.: Наука, 1970. 152 с.
13. Шванов В.Н. Петрография песчаных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). Л.: Недра, 1987. 269 с.
14. Condie K.C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales // Chemical Geology. 1993. V. 104. P. 1-37.
15. McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics // Geological Society of America. 1993. V. 284. P. 21-40.
16. Sun S.-S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes Geological Society // London: Special Publications. 1989. № 42. P. 313-345.

Первые результаты изучения прибрежного вулканического комплекса Южной Камчатки

Бергаль-Кувикас О.В.¹, Латышев А.В.^{1,2,3}, Аносова М.Б.³, Латанова Е.А.³

First results of studying the Pribrezhny volcanic complex, Southern Kamchatka

Bergal-Kuvikas O.V., Latyshev A.V., Anosova M.B., Latanova E.A.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: kuvikas@mail.ru*

² *Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва*

³ *Институт физики земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва*

В работе представлены первые результаты опробования магматических пород прибрежного вулканического комплекса. На основе форм проявлений и содержаний петрогенных окислов предложена систематика пород. Палеомагнитные данные позволили провести возрастную типизацию вулканитов и определить палеошироту, на которой они формировались.

Камчатка – активная континентальная окраина северо-западной части Тихоокеанского побережья Южной Камчатки, позволяло реконструировать приращение Кронцкой палеодуги [5], в то время как магматические породы, вскрытые вдоль Тихоокеанского побережья Южной Камчатки, в силу различных причин совершенно не исследованы. Для понимания причин формирования тех или иных типов вулканизма, гидротермально-магматических систем и локализации оруденения необходимо знать историю развития региона. Объектом исследования является прибрежный вулканический комплекс магматических тел миоценового возраста, вскрытый в береговых обрывах Тихоокеанского побережья и лежащий в основании современного вулканического пояса Южной Камчатки [2].

В сентябре-октябре 2022 г. были изучены вулканические покровные и интрузивные субвулканические образования, входящие в состав миоценовой андезитовой формации, развитые в прибрежной полосе Берегового хребта от Авачинской губы до бухты Вестник (рисунок). В рамках проведенных полевых исследований часть точек опробования с северной оконечности андезитовой миоценовой формации, в том числе в долине р. Паратунка, на перевале Мутновский, на полуостровах Завойко, Крашенинникова, в бухтах Богатыревка, Станицкого, Спасения, Безымянная, были опробованы с использованием автотранспорта, так как к указанным объектам есть дороги, и они расположены близко к населенным пунктам (рисунок). Экспедиция по изучению центральной и южной частей миоценовой андезитовой формации проводилась на маломерном судне. Подход к точкам высадок контролировался эхолотом. Высадки на берег проводились на двухместной резиновой лодке. В результате проведенных работ были изучены основные массивы, охватывающие расстояние более 100 км вдоль берега, начиная от бухты Завойко на севере до бухты Мутной на юге. Собрано 500 образцов для палеомагнитных исследований и 183 образца на изотопно-геохимическое изучение. Результаты экспедиции опубликованы в журнале «Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле» [1].

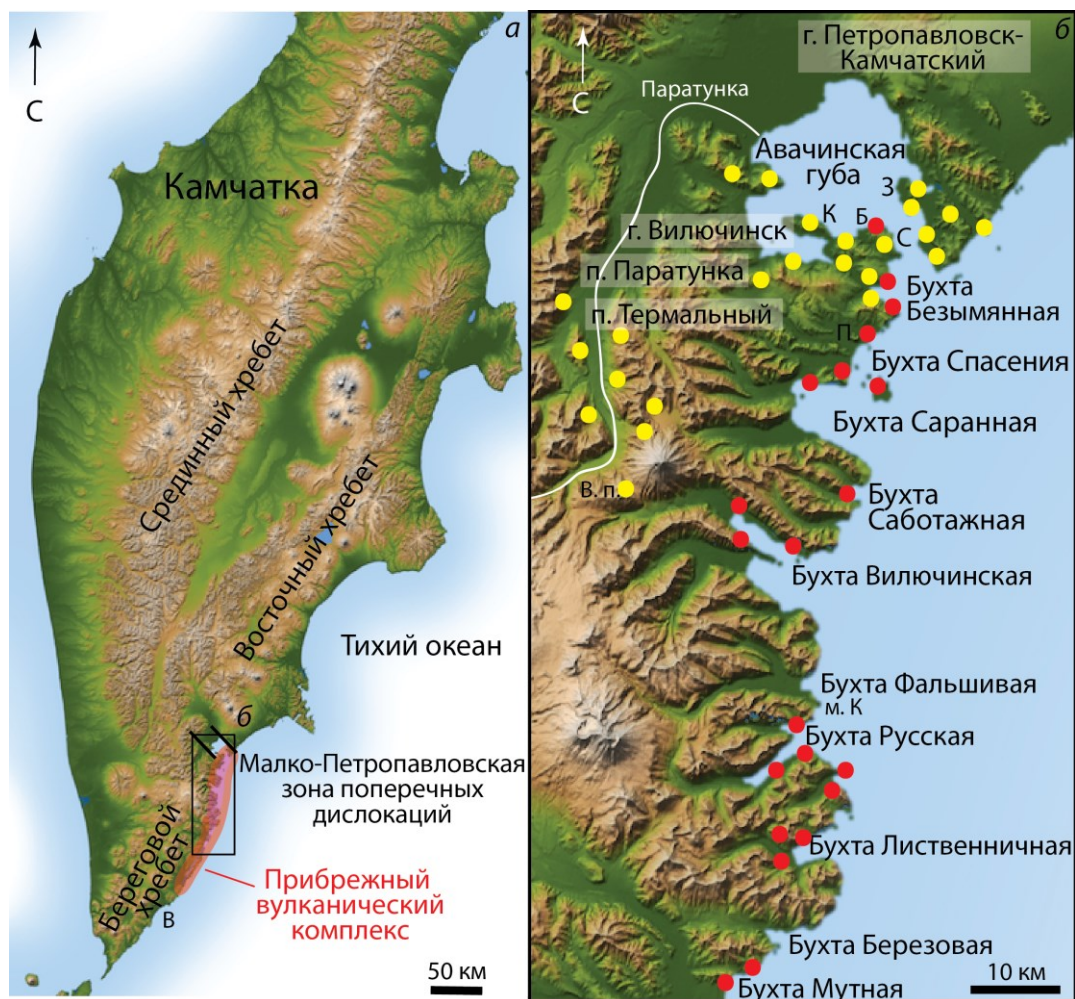


Рисунок. Схема Камчатки (а). На врезке (б) – положение изучаемого района. Желтым цветом показаны точки опробования, доставка к которым осуществлялась автотранспортом, красным – морским транспортом. Б – бухта Богатыревка, В – бухта Вестник, В. п. – Вилючинский перевал, З – полуостров Завойко, С – бухта Станицкого, м. К – мыс Кекурный, К – полуостров Крашенинникова, П – озеро Пресное [1].

Проведены палеомагнитные исследования кайнозойских магматических образований, принадлежащих прибрежному вулканическому комплексу Южной Камчатки, опробованных в ходе полевых работ 2021-2023 гг. Для каждого сайта (точки отбора) выполнено температурное размагничивание и чистка переменным магнитным полем, изолированы компоненты естественной остаточной намагниченности. Средние палеомагнитные направления удалось рассчитать для 42 сайтов, соответствующих индивидуальным магматическим телам.

Распределение средних палеомагнитных направлений по сайтам позволило выделить следующие дирекционные группы:

1. Группа направлений прямой полярности, близких к современному геомагнитному полю и тесно сгруппированных в географической системе координат. Среди тел этой группы выделяются базитовые дайки, прорывающие более древние магматические тела и, вероятно, соответствующие самому молодому этапу магматизма.

2. Группа направлений обратной полярности, в географической системе координат образующих кластер с юго-восточными склонениями и относительно низкими наклонениями, а в стратиграфической – характеризующихся южными склонениями и наклонениями, близкими к современным. В эту группу входят тела разного состава (от базальтов до риолитов) и морфологии (лавовые потоки, дайки, штокообразные тела).

3. Группа с северо-западными склонениями и наклонениями, близкими к 0. Эти направления являются нетипичными для кайнозоя Камчатки и могут указывать на аномальное состояние геомагнитного поля (экскурс) или присутствие нераспознанных тектонических дислокаций.

Результаты палеомагнитных исследований указывают на формирование большей части опробованных магматических тел до основной фазы тектонических деформаций, а также на отсутствие значимых широтных перемещений Южной Камчатки с момента образования прибрежного комплекса до настоящего времени. Таким образом, миоценовые вулканические образования Южной Камчатки не образуют самостоятельный экзотический тектонический блок.

Геохимический состав магм прибрежного вулканического комплекса варьирует от основных до кислых разностей (48-85 масс. % SiO_2). Интрузивы характеризуются большими вариациями по содержанию петрогенных окислов, в то время как эффузивные разности, в большей степени лавовые потоки, имеют составы от 51 до 76 масс. % SiO_2 . Составы туфов варьируют от 57 до 81 масс. % SiO_2 . Таким образом, опробованные магматические горные породы слагают непрерывную дифференцированную серию от базальтов до риолитов, при этом наличие анализов с повышенным содержанием кремнезема (>80 %) определенно указывает на вторичные постмагматические преобразования. Большая часть анализов соответствует умеренно-калиевой серии. Обращает на себя внимание наличие высокомагнезиальных габбро-диоритов (>6 масс. % MgO , 47-54 масс. % SiO_2). Интересны соотношения редких несовместимых элементов, таких как Rb, Sr, Zr, вариации которых не образуют линейные тренды, классическими процессами фракционной дифференциации не объяснимы и могут указывать на наличие различных источников магм.

Таким образом, получены предварительные результаты изучения прибрежного вулканического комплекса. В ближайшее время планируется получение редких элементов и изотопных отношений Sr-Nd-Pb магматических пород, что, в конечном счете, поможет изучить происхождение прибрежного вулканического комплекса и его место в эволюции террейнов Курило-Камчатской островной дуги.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, грант № 22-77-10019 (<https://rscf.ru/project/22-77-10019/>).

Список литературы

1. Бергаль-Кувикас О.В., Латышев А.В., Аносова М.Б. и др. Экспедиция по изучению миоценовых магматических пород Южной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2022. № 4. Вып. 56. С. 123-129. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2022-4-56-123-129>
2. Бергаль-Кувикас О.В., Rogozin A.H. Актуальность исследования Прибрежного вулканического комплекса в контексте истории изучения Южной Камчатки // Геодинамика и тектонофизика. 2023. Т. 14. № 5. Art. 0724. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-5-0724>
3. Avdeiko G.P., Palueva A.A., Khleborodova O.A. Geodynamic conditions of volcanism and magma formation in the Kurile-Kamchatka island-arc system // Petrology. 2006. № 14. P. 230-246. <https://doi.org/10.1134/S0869591106030027>
4. Konstantinovskaia E.A. Arc-continent collision and subduction reversal in the Cenozoic evolution of the Northwest Pacific: an example from Kamchatka (NE Russia) // Tectonophysics. 2001. V. 333. № 1-2. P. 75-94. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00268-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00268-7)
5. Levashova N.M., Shapiro M.N., Beniamovsky V N. et al. Paleomagnetism and geochronology of the Late Cretaceous-Paleogene island arc complex of the Kronotsky Peninsula, Kamchatka, Russia: Kinematic implications // Tectonics. 2000. V. 19. № 5. P. 834-851. <https://doi.org/10.1029/1998TC001087>

Комплексные исследования подводного вулканического массива 7.11 (Курильская островная дуга)

Блох Ю.И.¹, Бондаренко В.И.², Долгаль А.С.³, Петрова В.В.⁴, Пилипенко О.В.⁵, Рашидов В.А.⁶, Трусов А.А.⁷

Comprehensive studies of the 7.11 underwater volcanic massif (Kuril island arc)

Blokh Yu.I., Bondarenko V.I., Dolgal A.S., Petrova V.V., Pilipenko O.V., Rashidov V.A., Trusov A.A.

¹ г. Москва

² Костромской государственный университет, г. Кострома

³ Горный институт УрО РАН, г. Пермь

⁴ Геологический институт РАН, г. Москва

⁵ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

⁶ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: rashidva@kscnet.ru

⁷ АО «ГНПП Аэрогеофизика», г. Москва

Приведены новые данные о строении подводного вулканического массива 7.11, расположенного в Курильской островной дуге в заливе Простор (остров Итуруп) и состоящего из трех вулканических построек и кальдеры. Объем массива ~180 км³. Вулканические постройки сложены андезитами, андезибазальтами и базальтами.

В пределах Курильской островной дуги находится целый ряд наземных, наземно-подводных и подводных вулканических массивов. Один из них – подводный вулканический массив 7.11, расположенный в заливе Простор (о. Итуруп) и входящий в Северо-Итурупскую группу подводных вулканов (рис. 1) – долгое время изучается авторским коллективом [2-6, 8].

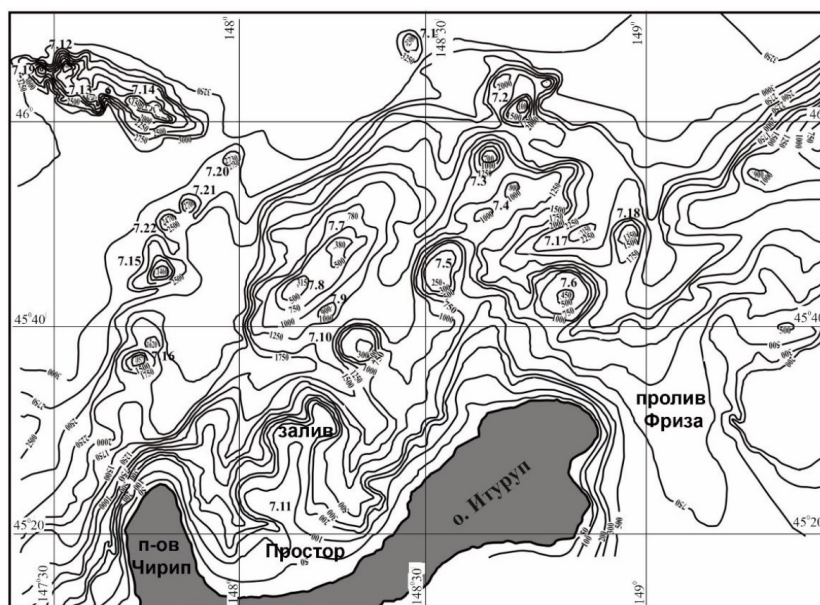


Рис. 1. Северо-Итурупская группа подводных вулканов Курильской островной дуги. Номера подводных вулканов обозначены согласно работе [8].

Первое предположение о наличии в центральной части залива Простор плосковершинного подводного вулканического массива доголоценового возраста относилось к 1958 г. [1]. Наземные исследования показали, что прилегающий к заливу перешеек Ветровой перекрыт пемзово-пирокластическими отложениями, возраст образования которых составляет приблизительно 20 000 лет, а мощность достигает 200 м [7, 9]. Существуют различные предположения о месте образования этих отложений [3, 5, 7, 9].

По нашим данным, пемзово-пирокластические покровы связаны с выявленной подводной кальдерой в самом заливе Простор, объемом 70-80 км³, образование которой произошло до последнего позднеплейстоценового оледенения [3, 5].

Результаты наших исследований, проведенных в нескольких рейсах научно-исследовательского судна «Вулканолог», позволили сделать вывод о том, что эта подводная кальдера вместе с тремя вулканическими постройками, вершины которых расположены на глубинах 100-90 м, образует подводный вулканический массив 7.11 размером (5-6)×19 км и объемом ~180 км³, оконтуренный и частично разрушенный более молодыми глубокими каньонами.

В результате комплексной обработки полученных в рейсах научно-исследовательского судна «Вулканолог» геолого-геофизических материалов с помощью современного оборудования и компьютерных технологий установлено, что постройку подводного вулканического массива 7.11 образуют андезиты, андезибазальты и базальты [2, 8]. Здесь же выявлены окаменелые водоросли и строматолиты, железистые ооиды [2, 4], а также различные нитчатые микроорганизмы (рис. 2).

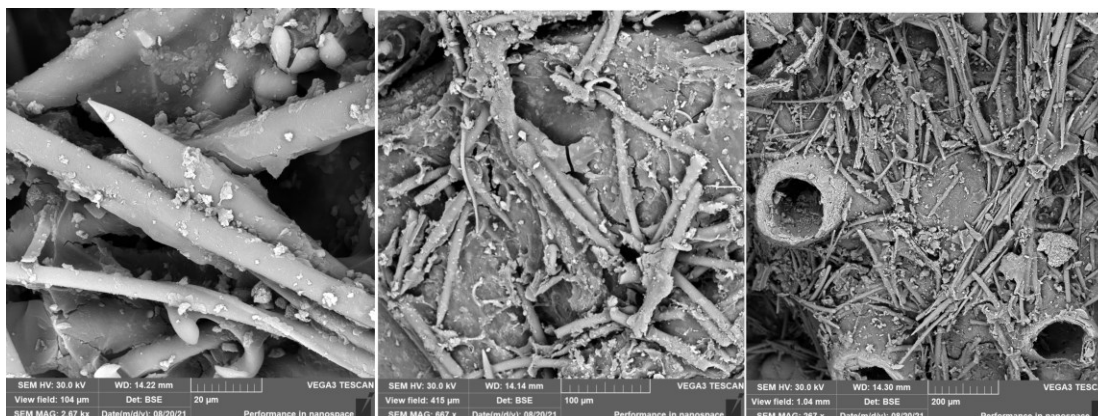


Рис. 2. Нитчатые микроорганизмы из микробных матов.

Петромагнитные исследования и терромагнитный анализ зависимости магнитного момента насыщения от температуры $M_s(T)$ (рис. 3) показали, что основными носителями намагниченности в драгированных горных породах являются зерна титаномагнетита псевдооднодоменной и многодоменной структур, естественная остаточная намагниченность драгированных пород, слагающих подводный вулканический массив 7.11, изменяется в диапазоне от 0.44 до 13.35 А/м, а фактор Кенигсбергера – от 0.26 до 29.61.

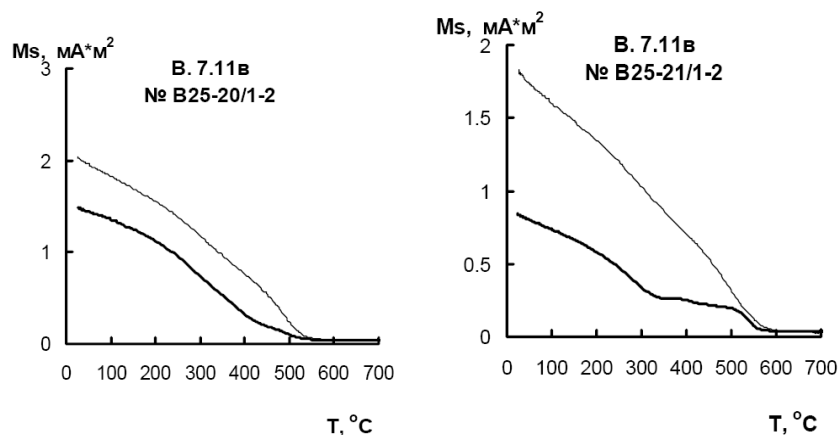


Рис. 3. Терромагнитный анализ зависимости магнитного момента насыщения от температуры $M_s(T)$.

По данным выполненной гидромагнитной съемки установлено, что к подводному вулканическому массиву 7.11 приурочены знакопеременные аномалии магнитного поля ΔT_a с размахом более 1200 нТл [8]. При интерпретации данных гидромагнитной съемки локализация особых точек позволила выделить в пределах различных построек вулканического массива 7.11 подводящие каналы и периферические магматические очаги (рис. 4).

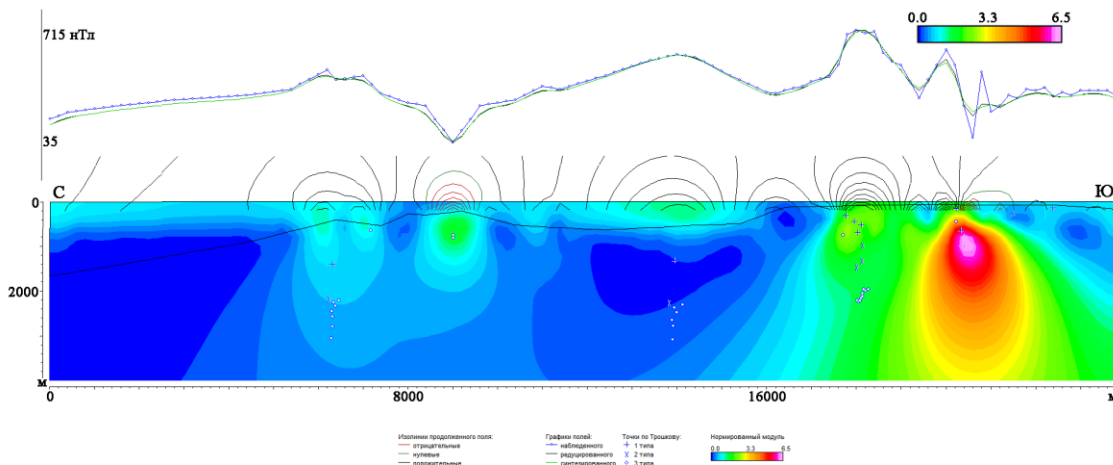


Рис. 4. Изображение, синтезированное системой СИНГУЛЯР для локализации особых точек функции, описывающей аномальное магнитное поле ΔT_a подводного вулканического массива 7.11, с наложенным рельефом дна по данным эхолотных промеров.

Отмеченные в водной толще на записях эхолотных промеров многочисленные акустические помехи (рис. 5) и присутствующие в драгированных породах аутигенные низкотемпературные минералы позволили сделать вывод о наличии в изученном районе подводной низкотемпературной гидротермальной деятельности [2, 4, 5].

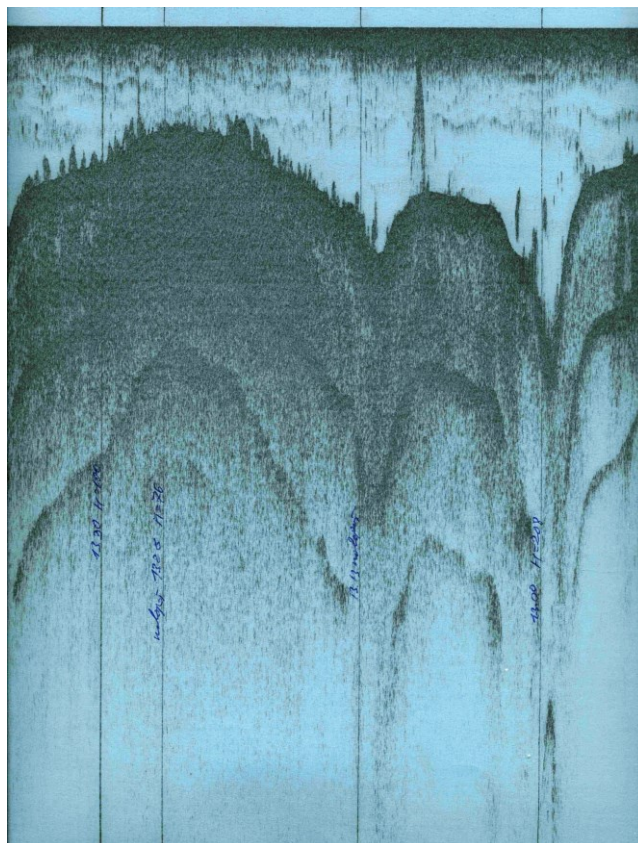


Рис. 5. Акустические помехи в водной толще.

В результате выполненных комплексных геолого-геофизических исследований получены новые данные о строении подводного вулканического массива 7.1. Определены размеры и объем вулканического массива, состав и петромагнитные характеристики горных пород, слагающих его постройки. В пределах массива выявлены подводные каналы и периферические магматические очаги. Сделан вывод о том, что пемзово-пирокластические отложения перешейка Ветровой на острове Итуруп могут быть связаны с кальдерой, расположенной в изученном вулканическом массиве.

Список литературы

1. Безруков П.Л., Зенкевич Н.Л., Канаев В.Ф., Удинцев Г.Б. Подводные горы и вулканы Курильской островной дуги // Молодой вулканизм СССР. Труды лаборатории вулканологии. 1958. Вып. 13. С. 71-87.
2. Блох Ю.И., Бондаренко В.И., Долгаль А.С. и др. Новые данные о строении подводного вулкана 7.5 и подводного вулканического массива 7.11 (Курильская островная дуга) // Труды XI Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU)-2022». Т. IV (IV). Тверь: ООО «ПолиПРЕСС», 2022. С. 30-34.
3. Бондаренко В.И. Строение подводных кальдер по данным сейсмоакустического профилирования (на примере Курильской островной дуги). Автореф. дис. на соиск. дис. канд. геол.-мин. наук. М: ГИН АН СССР, 1990. 24 с.
4. Бондаренко В.И., Петрова В.В., Рашидов В.А. Новые сведения о проявлении подводной газо-гидротермальной активности в пределах Курильской островной дуги // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXV ежегодной научной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30-31 марта 2022 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2022. С. 115-118
5. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Подводная кальдера залива Простор, о. Итуруп, Курильские острова // Геология морей и океанов: Материалы XXIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Москва, 18-22 ноября 2019 г. М.: ИО РАН, 2019. Т. 5. С. 54-57.
6. Бондаренко В.И., Рашидов В.А. Подводная газо-гидротермальная активность в пределах Курильской островной дуги // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 1. С. 4-13.
7. Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 287 с.
8. Подводный вулканизм и зональность Курильской островной дуги / Отв. ред. Ю.М. Пущаровский. М.: Наука, 1992. 528 с.
9. Смирнов С.З., Рыбин А.В., Соколова Е.Н. и др. Кислые магмы кальдерных извержений острова Итуруп: первые результаты исследования расплавных включений во вкрапленниках пемз кальдеры Львиная Пасть и перешейка Ветровой // Тихоокеанская геология. 2017. Т. 36. № 1. С. 50-68.

Привлечение сейсмических данных к анализу результатов комплексного скважинного геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений

Бусс Ю.Ю., Гаврилов В.А., Соломатин А.В., Морозова Ю.В., Полтавцева Е.В.

Seismic data application for the analysis of the results of complex borehole geophysical monitoring of the processes preceding strong Kamchatka earthquakes

Buss Yu.Yu., Gavrilov V.A., Solomatina A.V., Morozova Yu.V., Poltavtseva E.V.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: julia@kscnet.ru*

Приведены результаты совместного ретроспективного анализа данных комплексных скважинных измерений и данных сейсмических наблюдений. Показано, что такой подход может существенно повысить эффективность действующей на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне системы мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений.

С начала 2000-х годов Сетью комплексных скважинных геофизических наблюдений на Петропавловск-Камчатском геодинамическом полигоне (ПГП) осуществляется непрерывный мониторинг напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды [2]. В целом, полученные к настоящему времени результаты позволяют сделать выводы о достаточно высокой эффективности используемых методов мониторинга НДС и об их перспективности для средне- и краткосрочного прогнозирования сильных камчатских землетрясений [1]. Вместе с тем, в ходе анализа результатов, получаемых по данным комплексных скважинных измерений, как правило, возникает ряд вопросов, поиск ответов на которые дополнительно требует привлечение результатов мониторинга НДС геосреды по другим видам измерений, в частности, результатов сейсмических наблюдений.

В 2018 г. были проведены исследования, в ходе которых результаты скважинных геоакустических (ГАЭ) и электромагнитных (ЭМИ) измерений, полученные на заключительных стадиях («активной фазе») подготовки сильных близких камчатских землетрясений, сравнивались с данными о механизмах очагов землетрясений, произошедших на том же временном интервале, в 2008-2017 гг. [3], в районе Авачинского залива. Для этой цели использовалась выборка из 176 землетрясений, эпицентры которых были наиболее близко расположены к району г. Петропавловск-Камчатский. Основную часть этих землетрясений составили события с магнитудами $M_W > 5.0$. В ходе исследований было установлено, что, несмотря на высокую в целом устойчивость повторений типа механизма очагов землетрясений Камчатской зоны субдукции, для ряда землетрясений, произошедших в 2008-2017 гг., имели место значительные отклонения азимута и угла наклона главной оси сжатия сброшенных напряжений от своих среднемноголетних значений, совпадающие по времени с аномальными изменениями в рядах данных скважинных измерений накануне момента землетрясения. При этом величины указанных отклонений определялись величиной параметра $S = (L/R_h) \cdot 100$, %, где $L = 10^{0.44M - 1.29}$ – длина очага землетрясения в км, рассчитанная согласно [6], M – магнитуда события, вычисленная по сейсмическому моменту; R_h – гипоцентральное расстояние в км. В частности, для Жупановского землетрясения приводимые в [3] результаты показали, что в период с июля 2014 г. по июль 2017 г. имели место значительные отклонения азимута и угла наклона главной оси сжатия сброшенных напряжений от своих среднемноголетних значений, согласующиеся по времени с аномально высокими (до 750 %) изменениями в рядах данных скважинных измерений накануне момента землетрясения.

Повторно к теме сравнения результатов комплексных скважинных измерений и данных об изменениях сейсмичности на заключительных стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений авторы вернулись в 2023-2024 гг., выбрав в качестве

объектов исследований Жупановское ($M_w=7.2$; $Re=104$ км; $H=177$ км; $S=37$ %; 30.01.2016 г.) и Вилючинское ($M_w=6.5$; $Re=53$ км; $H=105$ км; $S=34$ %; 03.04.2023 г.) землетрясения. Указанные сейсмические события являются самыми сильными за последние 20 лет по величине параметра S среди камчатских землетрясений с промежуточной глубиной очага.

Для анализа изменений сейсмичности перед Жупановским землетрясением были отобраны слабые ($K_s=3.5-10$) тектонические землетрясения, произошедшие в интервале 01.04.2014 г. – 30.01.2016 г. (до момента основного события) в зоне радиусом $L=76$ км от эпицентра землетрясения, где $L=10^{0.44M-1.29}$ – длина очага землетрясения в км. В качестве источника данных о сейсмичности использовался каталог землетрясений Камчатского филиала ГС РАН [5].

Характер полученных при этом данных позволил разделить все землетрясения по глубине гипоцентров на две зоны: до и глубже 50 км. Дальнейшая обработка данных сейсмических наблюдений была ориентирована на выявление изменений в характере слабой сейсмичности, коррелирующих на интервале активной фазы подготовки землетрясения со значимыми изменениями временных рядов данных комплексных геофизических измерений.

На рисунке результаты сейсмических наблюдений на заключительной стадии подготовки Жупановского землетрясения представлены кумулятивной кривой энергетических классов землетрясений с глубиной до 50 км (рисунок, г) и данными по изменениям параметров механизмов очагов землетрясений, произошедших в зоне Авачинского залива (рисунок, д-е).

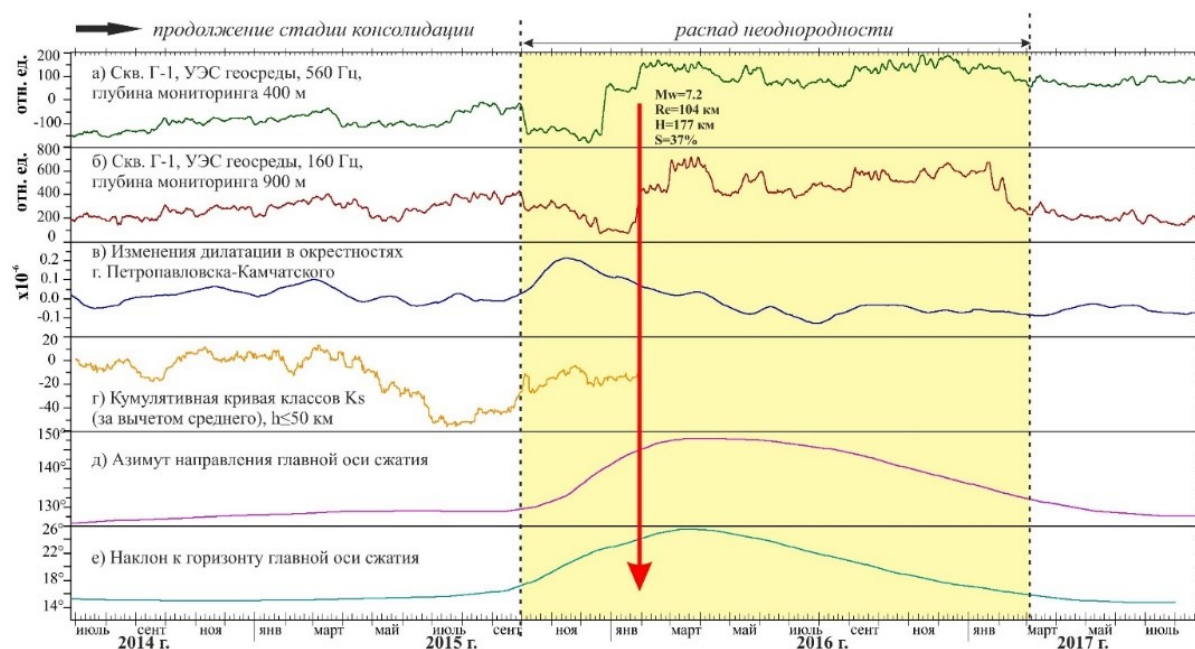


Рисунок. Изменения удельного сопротивления (УЭС) геосреды в зоне скважины Г-1 в сравнении с изменениями параметров механизмов очагов землетрясений, данными по сейсмичности и дилатации в зоне ПГП во временной окрестности Жупановского землетрясения: а, б – изменения УЭС геосреды в зоне скважины Г-1 на глубинах до 400 м и 900 м соответственно; в – изменения ряда плоской дилатации в окрестностях ПГП; г – кумулятивная кривая энергетических классов K_s за вычетом среднего значения для землетрясений с глубиной до 50 км; д – азимут направления главной оси сжатия, е – наклон к горизонту главной оси сжатия, определенные по данным о механизмах очагов землетрясений в Авачинском заливе.

Сопоставление указанных временных рядов с данными по изменениям удельного электрического сопротивления (УЭС) геосреды в зоне ПГП на разных глубинах (рисунок, а-б) и с данными по изменениям дилатации в районе

г. Петропавловска-Камчатского (рисунок, в) [7] позволяет сделать несколько важных выводов.

1. В данном случае можно уверенно говорить о согласовании на заключительной стадии подготовки Жупановского землетрясения результатов сейсмических наблюдений с результатами скважинного электромагнитного мониторинга и данными ГНСС наблюдений.

2. Изменения всех временных рядов на интервале октябрь 2015 г. – март 2017 г. соответствуют консолидационной модели подготовки сильного землетрясения И.П. Добровольского [4], предполагающей на заключительной стадии распад жесткой неоднородности.

3. Несомненно важным является яркий результат (см. рисунок, д-е), указывающий на то, что примерно за 4 месяца до момента землетрясения в зоне Авачинского залива были зарегистрированы землетрясения с нетипичными механизмами очагов. Можно предположить, что в этом случае речь может идти о землетрясениях, связанных с распадом неоднородности. На это фактически указывает синхронность роста числа землетрясений с нетипичными механизмами очагов (см. рисунок, д-е) и рост амплитуды кумулятивной кривой (см. рисунок, г).

4. В целом представленные результаты показывают, что привлечение данных сейсмических наблюдений к анализу результатов комплексных скважинных измерений может ощутимо повысить эффективность функционирующей на ППП системы мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 23-27-00352 (<https://rscf.ru/project/23-27-00352/>).

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-irf.ru/usu/507436/>).

Список литературы

1. *Гаврилов В.А.* Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы. Дис. на соиск. уч. ст. докт. физ.-мат. наук. Москва, 2017. 385 с.
2. *Гаврилов В.А., Децеровский А.В., Власов Ю.А. и др.* Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 3. С. 52-78.
3. *Гаврилов В.А., Ландер А.В., Морозова Ю.В.* Сопоставление данных скважинных геоакустических и электромагнитных землетрясений с данными по механизмам очагов землетрясений // Доклады Академии наук. 2019. Т. 484. № 6. С. 745-749.
4. *Добровольский И.П.* Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
5. Единая информационная система данных КФ ФИЦ ЕГС РАН. Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов. <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>
6. *Ризниченко Ю.В.* Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. М.: Наука. Исследования по физике очага землетрясения, 1976. С. 9-27.
7. *Gavrilov V.A., Poltavtseva E.V., Titkov N.N. et al.* Monitoring of Changes in the Stress-Strain State of Geoenvironment at the Petropavlovsk Geodynamic Testing Site Based on the Multi-Instrumental Borehole and GPS Data during the Active Phase of Preparing the Zhupanovsky Earthquake (January 30, 2016, Mw 7.2) // Geodynamics & Tectonophysics. 2023. V. 14. № 6. Art. 0732. DOI: 10.5800/GT-2023-14-6-0732

О выборе базовой физической модели подготовки сильных камчатских землетрясений

Гаврилов В.А.¹, Бусс Ю.Ю.¹, Соломатин А.В.¹, Морозова Ю.В.¹, Полтавцева Е.В.¹, Титков Н.Н.², Рябинин Г.В.²

On the choice of a basic physical model for the processes preceding strong Kamchatka earthquakes

Gavrilov V.A., Buss Yu.Yu., Solomatin A.V., Morozova Yu.V., Poltavtseva E.V., Titkov N.N., Ryabinin G.V.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; e-mail: vgavr1403@mai.ru*

² *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Обсуждаются вопросы, связанные с выбором базовой физической модели подготовки сильных камчатских землетрясений. Показывается, что подготовка Жупановского землетрясения ($M_w=7.2$; $Re=104$ км; $H=177$ км; $S=37\%$; 30.01.2016 г.) соответствует консолидационной модели И.П. Добровольского.

Базовая физическая модель подготовки сильных землетрясений – одна из ключевых позиций подхода к среднесрочному и краткосрочному прогнозированию сильных камчатских землетрясений [1, 2]. Предполагается, что обоснованный выбор такой модели позволит рассчитывать для заключительной стадии подготовки сильных землетрясений ожидаемые изменения данных системы мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, действующей на территории Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона (ППП).

В качестве такой модели ранее предварительно была выбрана дилатантно-диффузионная (ДД) модель [5], считающаяся в настоящее время наиболее известной и общепризнанной. Физическим базисом ДД-модели являются дилатантно-диффузионные процессы, происходящие в геосреде на заключительных стадиях подготовки сильного землетрясения. Согласно ДД-модели процесс подготовки землетрясения состоит из трех основных стадий. Стадия I – нарастание упругой деформации до некоторого критического уровня (порядка 50 % от предельного значения). Стадия II – развитие дилатансионных процессов с соответствующим увеличением объема порово-трещинного пространства геосреды. Стадия III – приток жидкого флюида в область пониженного флюидного давления с сопутствующим понижением прочности, приводящим в итоге к магистральному разрыву – сильному землетрясению. Несмотря на ряд вопросов к ДД-модели, невозможно не признавать физическую обоснованность связи дилатансионных и фильтрационных процессов с процессами подготовки сильных тектонических землетрясений. Вместе с тем, при выборе модели необходимо учитывать особенности конкретной зоны подготовки землетрясения, которые во многом определяют механизм поступления и влияния жидкого флюида на процессы в зоне будущего очага землетрясения.

Результаты, полученные авторами на предыдущем этапе исследований, показывают, что в ряде случаев на заключительных стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений удавалось выделять интервалы, которые по характеру изменений данных комплексных скважинных измерений можно было интерпретировать как стадии дилатансии или подтока жидкого флюида. Однако при этом выделить отдельно стадию подтока жидкого флюида как заключительную стадию, непосредственно предшествующую моменту основного толчка, не представлялось возможным. Это можно объяснить тем, что в процессы подготовки сильных землетрясений вовлекаются огромные объемы неоднородной геосреды, блоки которой отличаются значениями накопленной упругой деформации. По этой причине, в-первых, развитие дилатансионных и фильтрационных процессов в огромном объеме зоны подготовки землетрясения может происходить одновременно в разных локальных

областях. Во-вторых, учитывая, что такие области геосреды могут отличаться исходными значениями накопленной упругой деформации, переходы от стадии накопления упругой деформации к стадии дилатансии, а затем к стадии подтока жидкого флюида не могут происходить в одно и то же время для разных областей геосреды. В целом, анализ данных многолетнего комплексного геофизического мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений показал, что ДД-модель не может быть выбрана в качестве базовой физической модели подготовки сильных камчатских землетрясений.

Результаты детального анализа данных комплексных геофизических измерений в рамках модели консолидации И.П. Добровольского

В 2023 г. в рамках продолжения работ по выбору базовой физической модели был проведен анализ многолетних временных рядов комплексных скважинных измерений совместно с данными ГНСС измерений, данными сейсмических наблюдений, а также с результатами гидрогеохимического мониторинга на скважинах ПГП.

Одним из наиболее важных результатов, полученных в ходе этих исследований, является установление того факта, что характер изменений временных рядов данных комплексных геофизических измерений на заключительных стадиях подготовки сильных камчатских землетрясений соответствует модели консолидации И.П. Добровольского. В качестве примера на рис. 1 приведены результаты, полученные в ходе измерений на ПГП на интервале активной фазы подготовки Жупановского землетрясения ($M_w=7.2$; $R_e=104$ км; $H=177$ км; $S=37$ %; 30.01.2016 г.) – самого сильного по величине параметра S сейсмического события за последние 20 лет. Поясним, что под «активной фазой подготовки землетрясения» понимается временной интервал, на котором имеют место значимые изменения НДС геосреды, связанные с подготовкой землетрясения. Величина $S=L/R_h \cdot 100$, %, где $L=10^{0.44M-1.29}$ – длина очага землетрясения в км при аппроксимировании формы очага эллипсом [4]; M – магнитуда события, вычисленная по сейсмическому моменту; R_h – гипоцентральное расстояние в км.

Из данных, представленных на рис. 1, можно видеть, что результаты комплексных скважинных измерений, проводимые на одном и том же пункте, а также результаты мониторинга сетью пространственно разнесенных пунктов, показывают согласованность (по своему физическому смыслу) вариаций для различных видов мониторинга НДС геосреды в районе ПГП. Такой характер результатов измерений указывает на процесс консолидации геосреды в зоне измерений, что соответствует модели подготовки по механизму консолидации, сформулированной И.П. Добровольским [3]. Нулевая стадия указанной модели – асейсмичное состояние, фоновые вариации. Стадия I – стадия консолидации, формирование жесткой неоднородности. Продолжительность стадии I значительно превышает продолжительность последующих стадий. Стадия II – начало распада неоднородности, формирование положения магистрального разрыва. Распад неоднородности сопровождается интенсивным трещинообразованием, небольшими форшоками, проявлением краткосрочных предвестников. Стадия III – образование очага землетрясения. Стадия IV – стадия афтершоков, окончательное разрушение области консолидации (неоднородности) афтершоками и пластическими подвижками.

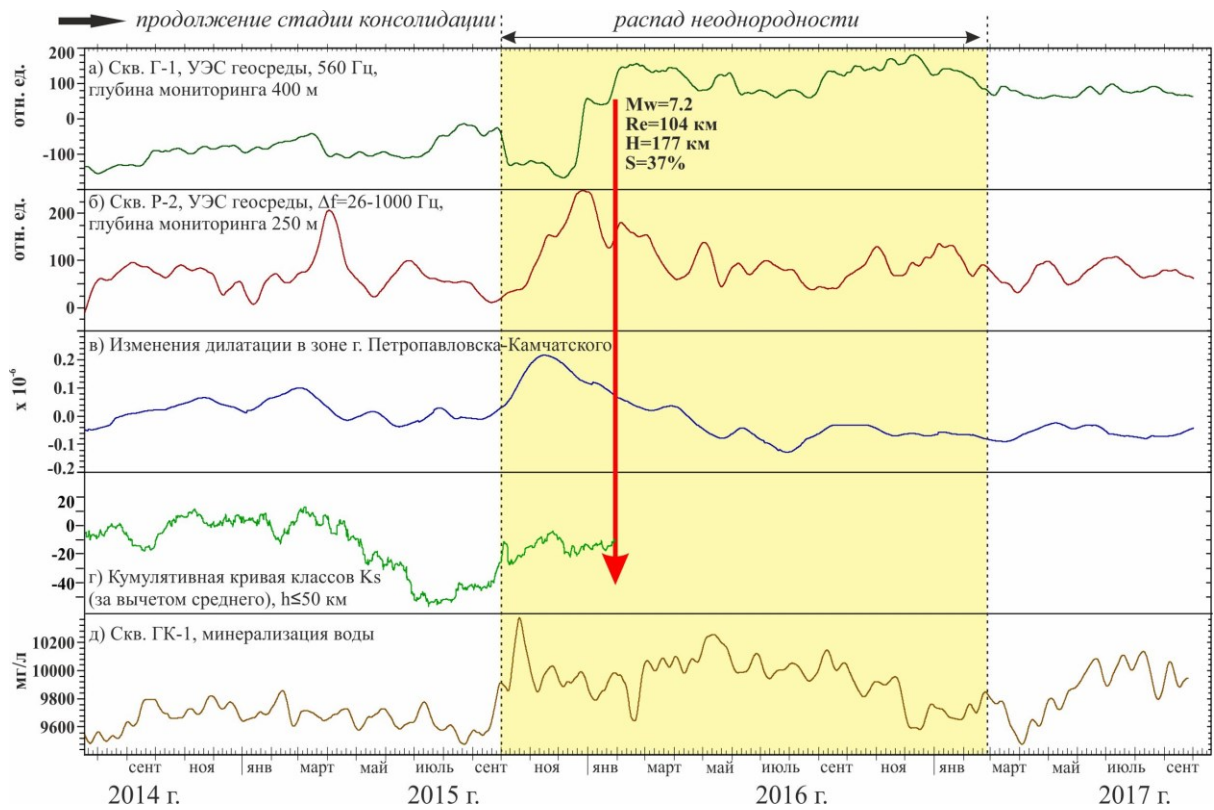


Рис. 1. Изменения временных рядов данных комплексных геофизических измерений в районе ПГП на интервале активной фазы подготовки Жупановского землетрясения: а) – изменения УЭС в зоне скв. Г-1 на глубине 400 м; б) – изменения УЭС в зоне скв. Р2 на глубине 250 м; в) – изменения дилатации в зоне г. Петропавловска-Камчатского; г) – кумулятивная кривая энергетических классов K_s за вычетом среднего значения для землетрясений с глубиной до 50 км; д) – изменения минерализации воды, скв. ГК-1.

На рис. 2 представлены результаты многолетнего непрерывного мониторинга изменений УЭС в районе ПГП по данным электромагнитных измерений с подземной электрической антенной, созданной на базе скважины Г-1 [1]. На рис. 2б представлен долговременный тренд исходных данных, выделенный путем их обработки с окном сглаживания 2 года. Предположительно, изменения тренда отражают медленные изменения НДС геосреды в зоне восточного побережья Камчатки, вызванные геодинамическими процессами. Представленные на рис. 1 результаты показывают, что началом стадии консолидации для Жупановского землетрясения можно считать июнь-июль 2013 г. Именно с этого момента начинаются высокоамплитудные вариации УЭС геосреды на фоне монотонного роста базового уровня УЭС (выделено красным на рис. 2б). В рамках модели консолидации такой характер изменений УЭС соответствует процессу формирования жесткой неоднородности за счет присоединения новых блоков. В условиях роста сжимающих напряжений увеличение базового уровня УЭС в этом случае закономерно за счет деформирования трещиноватой влагонасыщенной геосреды. Следует отметить, что 24 мая 2013 г., т.е. накануне начала активной фазы подготовки Жупановского землетрясения (стадии консолидации) произошло сильнейшее ($M_w=8.3$) глубокое ($H=630$ км) Охотоморское землетрясение – самое сильное сейсмическое событие в мире среди землетрясений сопоставимой глубины. Эпицентр землетрясения находился в районе Охотского моря примерно в 365 км от эпицентра Жупановского землетрясения. Можно предположить, что изменения НДС геосреды в период подготовки и реализации Охотоморского землетрясения могли оказать влияние на подготовку Жупановского землетрясения.

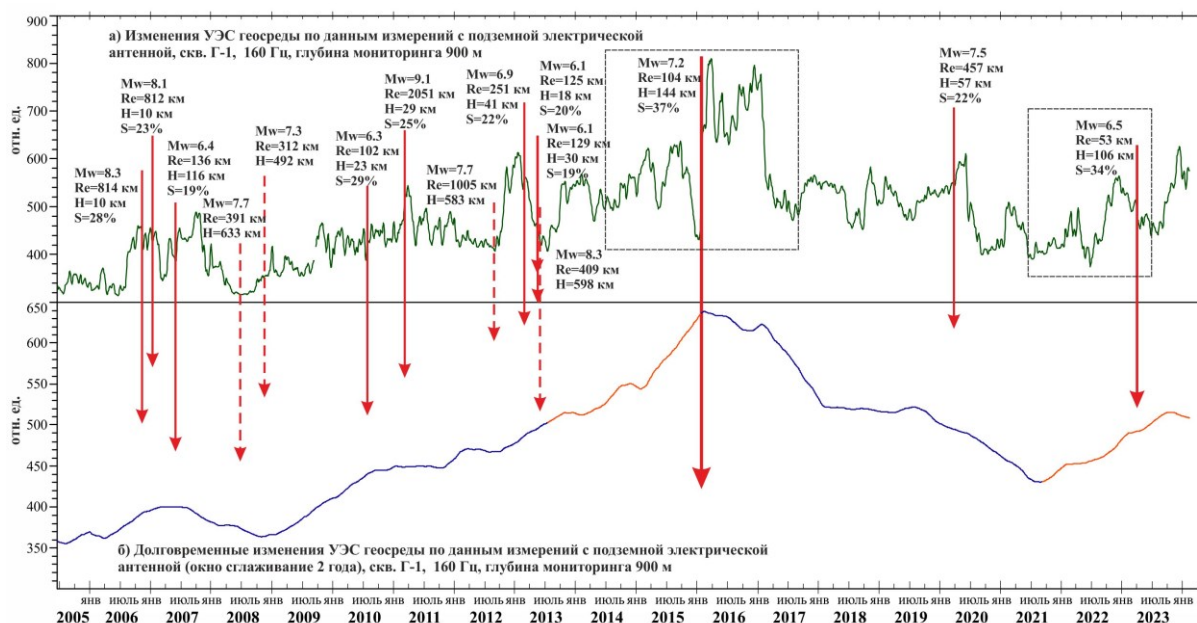


Рис. 2. Изменения УЭС геосреды в районе ППП по данным измерений с подземной электрической антенной: а) – исходные результаты для глубины мониторинга 900 м; б) – долговременный тренд, выделенный из исходных данных путем обработки с окном сглаживания 2 года.

Представленные результаты показывают, что подготовка наиболее сильного за последние 20 лет по величине параметра S Жупановского землетрясения соответствует модели консолидации, разработанной И.П. Добровольским. Ограниченный объем публикации не позволил предоставить соответствующие результаты по другим сильным камчатским землетрясениям. Однако можно отметить, что, в частности, подготовка близкого по величине параметра S Вилучинского землетрясения ($M_w=6.5$; $Re=53$ км; $H=105$ км; $S=34\%$; 03.04.2023 г.) также соответствует модели консолидации.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФ № 23-27-00352 (<https://rscf.ru/project/23-27-00352/>).

Список литературы

1. Гаврилов В.А., Децеровский А.В., Власов Ю.А. и др. Сеть комплексных скважинных измерений Петропавловск-Камчатского геодинамического полигона // Сейсмические приборы. 2021. Т. 57. № 3. С. 52-78.
2. Гаврилов В.А., Децеровский А.В., Соломатин А.В., и др. Концепция подхода к краткосрочному прогнозированию времени сильнейших землетрясений в районе Авачинского залива (Камчатка) // В сборнике: Проблемы комплексного геофизического мониторинга сейсмоактивных регионов. Труды Восьмой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. Петропавловск-Камчатский, 2021. С. 245-251.
3. Добровольский И.П. Математическая теория подготовки и прогноза тектонического землетрясения. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. 240 с.
4. Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент. В кн.: Исследования по физике очага землетрясения / Отв. ред. Ю.В. Ризниченко. М.: Наука, 1976. С. 9-27.
5. Sholz C.H., Sykes L.R., Aggarwal Y.P. Earthquake Prediction: A Physical Basis // Science. 1973. V. 181. № 4102. P. 803-810.

Применение технологии распределенного акустического зондирования в задачах вулканологии

Гравиров В.В.^{1,2}, Кислов К.В.²

Application of distributed acoustic sensing technology in volcanology issues

Gravirov V.V., Kislov K.V.

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва;*

e-mail: gravirov@mail.ru

² *Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва*

Распределенное акустическое зондирование (DAS) базируется на использовании Рэлеевского рассеяния в волоконно-оптических кабелях для получения данных о деформациях, распределенных по длине кабеля. В DAS кабель одновременно является чувствительным элементом и линией передачи данных. Сегодня DAS активно применяется в вулканологии, геофизике и т.д. Однако, несмотря на существенные достоинства, у DAS также имеются недостатки, которые необходимо учитывать.

Введение

Использование волоконно-оптических распределенных датчиков является новым многообещающим подходом в геофизике, сейсмологии, а также в вулканологии. По сравнению с сейсмической сетью, основанной на традиционных сейсмических приборах, использование распределенных акустических датчиков (Distributed Acoustic Sensing – DAS) имеет ряд преимуществ [2]. Во-первых, это возможность получения более высокого пространственного разрешения. В сейсмических сетях датчики расположены с разнесением в десятки и сотни километров. В то же время, в сейсмологических приложениях DAS виртуальные датчики (каналы) могут иметь пространственное разделение в доли метра. При этом длина линии наблюдения (длина оптического волокна, которое и является собственно чувствительным элементом) составляет десятки километров. В зависимости от задачи, дискретность датчиков и длина датчика (которую можно ассоциировать с базой деформографа) могут быть изменены с использованием одного и того же оборудования [1]. Кабельные линии, на которых основываются DAS, обычно не строго линейны, а имеют изгибы и даже петли. Специально проложенные для целей DAS кабели, тем более, чаще всего предполагают угловую, спиральную, змеевидную или другую выбранную геометрию. Это позволяет превратить систему DAS в сейсмическую антенну. Стратегия сбора данных позволяет гибко изменять конфигурацию параметров в интеррогаторе. Это, в свою очередь, приводит к другой функции пространственного отклика антенны и определяет диапазон волновых чисел обнаруживаемого сейсмического сигнала. Во-вторых, возможность использовать существующие телекоммуникационные волоконно-оптические сети позволяет осуществлять быстрое развертывание с минимальным использованием нового оборудования. В кабелях связи всегда конструктивно заложены так называемые «темные волокна», предназначенные для расширения объема коммуникаций и замены вышедших из строя. Использование этих темных волокон никоим образом не влияет на функционирование кабеля по его прямому назначению. Принципиально возможно использовать DAS на рабочих «не темных» волокнах. Отметим, что для DAS можно использовать старые заброшенные и даже оборванные кабели; главное, чтобы отрезок нужной длины с самого начала был цел. Это позволяет проводить исследования в мегаполисах [10], на морском дне [7] и в сейсмически неактивных регионах, которые обычно имеют очень разреженную сейсмическую сеть [14]. В-третьих, нет проблем с синхронизацией между каналами и нет необходимости в отдельных источниках питания и обслуживании виртуальных датчиков. Низкая стоимость и широкая доступность материалов также являются преимуществами.

Конечно, использование DAS в геофизических приложениях, а тем более введение в практику рутинных измерений потребует определенных усилий. Как у всякой технологии, у DAS тоже есть слабые стороны. Измерительная система может быть реализована на кабеле (участке кабеля) только ограниченной длины, т.е. не может, например, использовать всю длину трансокеанских линий связи. DAS регистрирует только осевую деформацию оптоволоконной линии, то есть состоит из набора однокомпонентных виртуальных датчиков (каналов). Поскольку кабели обычно не проходят по прямой линии, направление оси чувствительности от одного виртуального датчика к другому меняется. Каналы имеют более высокий уровень шума, чем обычные широкополосные сейсмометры, может иметь место замирание сигнала. К тому же коммуникационные кабели обычно проложены по шумным местам. Связь между волокном и землей разная по длине кабеля, таким образом, передаточная функция у разных участков кабеля разная. Расположение и ориентация каналов трудноопределимы, особенно на ранее проложенных кабелях.

Однако вышеперечисленные и другие препятствия, встающие перед геофизиками, использующими DAS, постепенно преодолеваются: разрабатывается новое оборудование (интеррогаторы и новые виды специальных оптических волокон и кабелей), методики работ и обработки данных [1].

Применение DAS в вулканологии

Использование технологии распределенного акустического зондирования может быть особенно полезным для вулканологов благодаря ее высокому временному и пространственному разрешению, что помогает решить проблемы развертывания и обслуживания сейсмических групп на вулканах. DAS позволяет наблюдать деформацию в пространственном интервале метрового масштаба и в широком диапазоне частот. При этом многие задачи вулканологии могут быть решены в терминах деформации, без преобразования данных DAS в перемещение, скорость или ускорение. Магматические структуры способны генерировать вторичные сейсмические волны на собственных частотах. Резонансные моды определяют размер и свойства внутренней структуры и уникальны для каждого магматического объекта. Данные о деформациях могут быть использованы для выявления резонансных мод и оценки параметров магматических структур [6].

Для вулканических систем характерно возникновение множества явлений, таких как потоки лавы, пепловые извержения, землетрясения. Чтобы научиться качественно прогнозировать эруптивные процессы, необходимо отслеживать динамику магматических процессов. В настоящее время с помощью традиционных сейсмометров осуществлять плотные продолжительные (а лучше, постоянные) сейсмологические наблюдения не представляется возможным [15]. Использование от нескольких десятков до сотни сейсмометров требует больших усилий для развертывания и частого обслуживания системы. Например, в [3] шаг съемки составил всего 500 м, а время регистрации в каждой точке было около трех часов. DAS дает возможность проводить постоянные сейсмические исследования с высоким разрешением для комплексного видения глубинных процессов и четкого определения строения и динамики магматической питающей системы вулканов. Одновременные измерения по нескольким волокнам могут дополнительно помочь ограничить местоположения гипоцентров событий. Например, в [12] при исследованиях вулкана Этна задействованы проложенный в скважине на южном склоне вулкана специальный кабель, оптические телекоммуникационные кабели, проложенные в населенных пунктах, и подводный кабель, соединяющий остров Вулкано с Сицилией.

Исследования на вулкане Адзума (Япония) проводились с помощью специально проложенного, заглубленного на 50 см, кабеля, который, как указано в [13], не повреждается вулканическим пеплом и бомбами во время извержений.

Пространственно-временные изменения местоположения источников используются для прогнозирования мест новых извержений и мониторинга вулканической активности. Применялись два метода: определение разницы первых вступлений (развернутый вдоль извилистой дороги волоконно-оптический кабель действовал как L-образный массив) и метод локации источника по максимальным амплитудам сейсмических волн. При этом учитывались разницы между направлениями участков волоконно-оптического кабеля и направлением колебаний в сейсмической волне. Непрерывно регистрировались динамические сигналы деформации в направлении вдоль кабеля с частотой дискретизации 200 Гц, с интервалом между каналами 10.2 м и измерительной длиной GL 40.8 м.

В [5] описано получение характеристики вулканического толчка во время извержения Тайогаита (Tajogaite) с 19 сентября по 13 декабря 2021 г. (Ла-Пальма, Канарские острова, Испания). Система DAS была установлена в октябре 2021 г. примерно в 10 км от эруптивного жерла и подключена к подводному оптоволоконному кабелю, направленному к острову Тенерифе. DAS работает в режиме реального времени до сих пор.

Обработка огромного объема данных, генерируемого DAS, предполагает использование машинного обучения [4]. Глубокие нейронные сети, описанные в [8], были разработаны для детектирования вулканических сейсмических событий на острове Вулкано по данным, полученным с 20-километрового телекоммуникационного подводного кабеля, соединяющего остров Вулкано с Сицилией.

Заключение

Этот обзор показывает необходимость и перспективность применения DAS в решении задач вулканологии. Как и в других приложениях, наилучшие измерения можно получить, используя специально разрабатываемые для DAS кабели. Новое поколение волокон разрабатывается для повышения чувствительности и снижения уровня шума по сравнению со стандартными. Некоторый эффект можно получить, если использовать несколько волокон одного кабеля [9]. Немаловажна также специальная прокладка, обеспечивающая необходимую геометрию кабеля и качественную связь кабеля с грунтом. Конечно, это лишает DAS существенных преимуществ (быстроты и простоты развертывания системы и малой стоимости). Тем не менее, в вулканологических исследованиях довольно часто применяют специальную прокладку кабеля [11], а иногда и специальные кабели. Однако для продвижения DAS в исследовательские проекты и практику рутинных работ потребуется преодолеть, прежде всего, некоторое недоверие, с которым встречается каждая новая технология.

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук и Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук.

Список литературы

1. *Кислов К.В., Гравиров В.В.* Распределенное акустическое зондирование: новый инструмент или новая парадигма // Сейсмические приборы. 2022. Т. 58. № 2. С. 5-38. <https://doi.org/10.21455/si2022.2-1>
2. *Кислов К.В., Гравиров В.В.* Чем DAS полезен для нас / II Всероссийская научная конференция с международным участием «Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений». 2021. Тезисы докладов и программа конференции. М.: ИТПЗ РАН, 2021. С. 56-58.
3. *Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Горбатиков А.В., Степанова М.Ю.* Особенности глубинного строения зоны трещинных толбачинских извержений (Камчатка, Ключевская группа вулканов) по комплексу геолого-геофизических данных // Физика Земли. 2018. № 3. С. 60-83. <https://doi.org/10.7868/S0002333718030055>

4. *Allegra M., Currenti G., Cannavò F. et al.* Deep learning approach for detecting low frequency events on DAS data at Vulcano Island, Italy // EGU General Assembly. Vienna, Austria. 2023. Art. EGU23-16459. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-16459>
5. *Barrancos J., D'Auria L., Garcia F.A. et al.* Characterization of the volcanic tremor during the 2021 Tajogaite eruption (La Palma, Canary Islands) through Distributed Acoustic Sensing // XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Berlin. 2023. Art. IUGG23-2766. <https://doi.org/10.57757/IUGG23-2766>
6. *Biagioli F., Metaxian J.-P., Stutzmann E. et al.* Using Distributed Acoustic Sensing to Monitor and Investigate Eruptive Events at Stromboli Volcano, Italy // EGU General Assembly. Vienna, Austria. 2023. Art. EGU23-3955. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-3955>
7. *Cheng F., Chi B., Lindsey N.J. et al.* Utilizing distributed acoustic sensing and ocean bottom fiber optic cables for submarine structural characterization // Scientific Reports. 2021. V. 11. Art. 5613. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84845-y>
8. *Currenti G., Allegra M., Cannavò F. et al.* Distributed dynamic strain sensing of very long period and long period events on telecom fiber-optic cables at Vulcano, Italy // Scientific Reports. 2023. V. 13. Art. 4641. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31779-2>
9. *Diaz-Meza S., Jousset P., Currenti G. et al.* On the Comparison of Records from Standard and Engineered Fiber Optic Cables at Etna Volcano (Italy) // Sensors. 2023. V. 23. № 7. Art. 3735. <https://doi.org/10.3390/s23073735>
10. *Fang G., Li Y.E., Zhao Y., Martin E.R.* Urban near-surface seismic monitoring using distributed acoustic sensing // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. Art. e2019GL086115. <https://doi.org/10.1029/2019GL086115>
11. *Grimm J., Poli P., Jousset P.* Detecting seismo-volcanic events based on inter-channel coherency of a DAS cable // EGU General Assembly. Vienna, Austria. 2023. Art. EGU23-9089. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9089>
12. *Jousset P., Currenti G., Murphy S. et al.* Distributed fiber optic sensing observations at Etna volcano, Italy: An integrated vision // XXVIII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG). Berlin. 2023. <https://doi.org/10.57757/IUGG23-4747>
13. *Nishimura T., Emoto K., Nakahara H. et al.* Source location of volcanic earthquakes and subsurface characterization using fiber-optic cable and distributed acoustic sensing system // Scientific Reports. 2021. V. 11. Art. 6319. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85621-8>
14. *Smolinski K., Paitz P., Bowden D. et al.* Urban distributed acoustic sensing using in-situ fibre beneath Bern, Switzerland // EGU General Assembly. 2020. Art. EGU2020-8225. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8225>
15. *Wassermann J., Braun T., Ripepe M. et al.* The use of 6DOF measurement in volcano seismology – A first application to Stromboli volcano // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2022. V. 424. Art. 107499. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107499>

Результаты подземного мониторинга вариаций аэрозолей, температуры и деформации коры Земли в окрестностях вулкана Эльбрус

Гравиров В.В.¹, Першин С.М.², Собисевич А.Л.¹, Гришин М.Я.², Лиходеев Д.В.¹, Мясников А.В.³

Results of underground monitoring of variations in aerosols, temperature and deformation of the Earth's crust near the Elbrus volcano

Gravirov V.V., Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Ya., Likhodeev D.V., Myasnikov A.V.

¹ *Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва;*

e-mail: gravirov@mail.ru

² *Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, г. Москва*

³ *Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга МГУ, г. Москва*

Нами была обнаружена корреляция сигналов лазерного деформографа, лазерного лидара, измеряющего плотность вариаций аэрозолей, и значений температуры внутри скального основания в тупиковом тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории (БНО), в момент первого и второго сильных землетрясений в Турции (06.02.2023), имевших почти одинаковые магнитуды 7.8 и 7.7. Оценка радиуса зоны напряжения от эпицентров дает величину порядка 2000 км, что превышает расстояние до тоннелей БНО (около 900 км) и, таким образом, допускает проявление вариации напряженно-деформированного состояния в сигналах деформографа, термометра и лидара.

Введение

Известно, что субдукции литосферных плит вызывают на Земле наиболее разрушительные землетрясения. Особо активны в этом отношении регионы, в которых сходятся три-четыре плиты, например, как в Турции: Анатолийская, Аравийская, Африканская, а также Евразийская плита с Северо-Анатолийским разломом [8]. При этом установлено [8], что активность Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона определяется мантийным потоком (т.н. плюмом), который поднимается с поверхности ядра Земли и распространяется под литосферой, создавая сложные поверхностные сдвиги и выход горячих газов по трещинам коры. Общее тело мантийного потока достигает Евразийской плиты на севере вплоть до Казбека, Эльбруса и региона Кавказских Минеральных Вод [8]. Приближение этого плюма к поверхности коры Земли питает магматические камеры вулканов. Так, есть веские основания полагать, что подогрев и выброс ледника Колка на Казбеке в 2004 г., а также известные вариации мощности выхода газов, паров, аэрозолей и подогрев основания тоннелей Баксанской нейтринной обсерватории (БНО) в Приэльбрусье являются проявлением активности этого мантийного плюма. Таким образом, подземный мониторинг вариаций аэрозолей, температуры и деформации коры Земли, осуществляемый в тоннелях БНО, которые экранируют и существенно снижают влияние внешних факторов, обеспечивает возможность раннего обнаружения напряженного состояния литосферных плит в зоне разломов на основе корреляционного анализа инструментальных данных. Особое внимание нами было уделено двум уникальным землетрясениям с магнитудой 7.8 и 7.7, произошедшим в Турции 06.02.2023 г. [8].

Эксперимент

Мониторинг вариаций аэрозолей, температуры и деформации коры Земли проводился с помощью уникальных инструментов, разработанных авторами настоящей публикации. Так, вариации аэрозолей измеряли с помощью лидара (Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН) [5, 7, 10, 12], построенного на базе диодного лазера с безопасным для глаз уровнем излучения.

Эволюцию температуры горных пород в туннеле измеряли прецизионным электронным термометром (ИФЗ РАН) с разрешающей способностью порядка 0.001 °С

[1, 2]. Данный термометр был разработан для непрерывного мониторинга приливных волн [3] и потока магматического или мантийного тепла, переносимого мантийным потоком [8].

Лазерный деформограф (ГАИШ МГУ) с измерительным плечом интерферометра Майкельсона длиной 75 м [4] размещен на скальном основании в Главной штольне на расстоянии около 600 м от входного портала.

Данные непрерывного мониторинга записывали на локальные системы сбора информации. На рисунке представлена эволюция сигналов в день разрушительного землетрясения в Турции 06.02.2023 г.

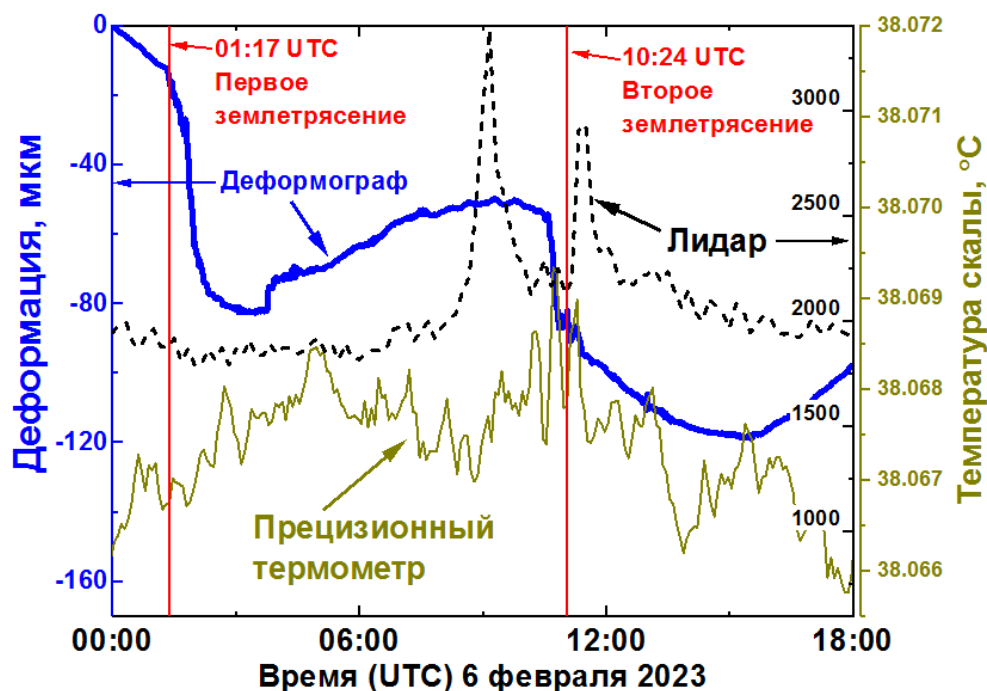


Рисунок. Вариации сигналов деформографа (синяя толстая линия), лидара (пунктир) и температуры скалы (тонкая линия) во время землетрясений в Турции 06.02.2023 г. Вертикальные линии отмечают моменты 1-го и 2-го землетрясения 01:17 и 10:24 UTC.

Из рисунка видно, что первое и второе землетрясения отразились на сигнале деформографа на фазе сжатия коры в 01:17 и 10:24 UTC в виде резкого сжатия в отличие от плавного сокращения, например, ночью 00:00–03:00. При этом, волна сжатия от второго землетрясения (10:24 UTC) заметно короче, чем от первого, несмотря на то, что мощность первого землетрясения была выше. Возможно, данное отличие обусловлено ориентацией линий разломов первого (под углом к меридиану) и второго землетрясения (под 90° к меридиану) и волн деформации. Так, волны деформации от первого землетрясения направлены в сторону Румынии, тогда как от второго – в сторону Эльбруса и БНО. Обнаруженная асимметрия проявляется также в том, что в момент первого землетрясения не были отмечены повышение температуры внутри скальных пород БНО и выход аэрозолей.

Выводы

Таким образом, впервые, насколько нам известно, проведен анализ эволюции сигналов лазерного деформографа, аэрозольного лидара и прецизионного термометра, размещенных в тоннелях Баксанской нейтринной обсерватории в день землетрясений в Турции 06.02.2023 г. Анализ выявил асимметрию сигналов деформографа в моменты первого и второго землетрясения, несмотря на почти одинаковую магнитуду: 7.8 и 7.7, соответственно. При этом не были отмечены изменения сигналов лидара и термометра во время первого землетрясения. Напротив, во время второго землетрясения было

обнаружено совпадение быстрого сжатия коры Земли (деформограф) с повышением температуры внутри скальной стены тоннеля. Кроме того, лидаром были зарегистрированы два выхода аэрозолей до и после момента второго землетрясения. Природа такого отличия пока до конца не ясна и может быть обусловлена выходом ионов как центров образования аэрозолей [6], которые иногда опережают землетрясения [9, 11].

Работа выполнена в рамках государственных заданий Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН и Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ.

Список литературы

1. *Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В.* Прецизионные дифференциальные термометры для исследования тепловых процессов на базе Северокавказской геофизической обсерватории // Наука и технологические разработки. 2018. Т. 97. № 1. С. 15-25.
2. *Лиходеев Д.В., Гравиров В.В., Кислов К.В., Долов С.М.* Прецизионные узкодиапазонные дифференциальные температурные датчики // Научное приборостроение. 2019. Т. 29. № 1. С. 11-16. <https://doi.org/10.18358/NP-29-1-P1116>
3. *Лиходеев Д.В., Собисевич А.Л., Гравиров В.В.* Приливные эффекты в тонкой структуре тепловых полей по результатам наблюдений в глубокой штольне северокавказской геофизической обсерватории // Доклады Российской Академии Наук. Науки о Земле. 2022. Т. 503. № 2. С. 148-153.
4. *Мясников А.В.* О проблеме учета влияния метеорологических факторов на большие прецизионные системы на примере Баксанского большебазового лазерного интерферометра // Сейсмические приборы. 2019. Т. 55. № 2. С. 27-38. <https://doi.org/10.21455/si2019.2-2>
5. *Першин С.М., Гришин М.Я., Завозин В.А. и др.* Лидарное зондирование эволюции многослойных туманов в наклонном тоннеле Баксанской нейтринной обсерватории // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2019. Т. 46. № 10. С. 46-54.
6. *Першин С.М., Завозин В.А., Леднев В.Н. и др.* Лидарный мониторинг динамики аэрозолей, индуцированных аэроионами // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2023. № 12. С. 69-78.
7. *Першин С.М., Собисевич А.Л., Завозин В.А. и др.* Лидарное детектирование аэрозолей в тоннеле над очагом вулкана Эльбрус // Краткие сообщения по физике ФИАН. 2022. № 2. С. 10-19.
8. *Свалова В.Б.* Землетрясения в Турции и Сирии 2023 года и геодинамика Кавказско-Анатолийского региона // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. № 3. С. 28-41. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-3-28-41>
9. *Liu Q., Shen X., Zhang J. et al.* Aerosol anomalies associated with occurrence of recent strong earthquakes ($> M 8.0$) // *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*. 2020. V. 31. № 6. P. 677-689. <https://doi.org/10.3319/TAO.2020.05.22.01>
10. *Pershin S.M., Sobisevich A.L., Grishin M.Ya. et al.* Volcanic activity monitoring by unique LIDAR based on a diode laser // *Laser Physics Letters*. 2020. V. 17. № 11. Art. 115607.
11. *Warden S., Bleier T., Kappler K.* Long term air ion monitoring in search of pre-earthquake signals // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2019. V. 186. P. 47-60. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.01.009>
12. *Zavozin V.A., Grishin M.Ya., Lednev V.N. et al.* Eye-safe photon counting LIDAR for magmatic aerosol detection // *Laser Physics*. 2022. V. 32. Art. 125601. <https://doi.org/10.1088/1555-6611/aca15d>

Активная тектоника восточных полуостровов Камчатки

Кожурин А.И.^{1,2}, Пинегина Т.К.¹

Active tectonics of Kamchatka eastern peninsulas

Kozhurin A.I., Pinagina T.K.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

e-mail: anivko@yandex.ru, pinegtk@yandex.ru

² *Геологический институт РАН, г. Москва*

Приводятся данные об активных деформациях восточных полуостровов Камчатки. Предложены варианты интерпретации возрастания степени их деформирования от Шипунского полуострова к Камчатскому.

Наличие восточных полуостровов и, как результат, изрезанная конфигурация океанической береговой линии, отличают Камчатку от соседних Алеутской и Японской островных дуг. В классической зональности восточные полуострова Камчатки представляют элементы фронтальной невулканической островной дуги, по происхождению – фрагменты Кроноцкой палеодуги. Предполагается их последовательное приращение к Камчатке с юга на север примерно 7 (Шипунский полуостров), 5 (Кроноцкий полуостров) и 2 (Камчатский полуостров) млн лет назад. Время приращения рассчитано делением длины погруженной части Тихоокеанской плиты на скорость ее погружения под Камчатку [9]. Два южных полуострова – Шипунский и Кроноцкий – нависают над современной зоной субдукции, северный – Камчатский – находится между Камчаткой и сближающейся с ней Алеутской дугой, в зоне коллизии.

Степень активного деформирования полуостровов разная.

Шипунский полуостров

Активных разломных деформаций нет. По данным непрерывного сейсмического профилирования, возможно, существует разлом северо-западного простирания вдоль юго-западного прямолинейного берега полуострова [4], однако на суше разлом, как активный, не виден. Судя по высотным отметкам тылового шва плейстоценовой террасы, поверхность полуострова наклонена в сторону Кроноцкого залива.

Кроноцкий полуостров

Поверхность полуострова наклонена на юго-запад, в сторону Кроноцкого залива. Есть субширотный активный разлом, единственный активный среди «новейших» разломов, выделенных В.А. Леглером и Л.М. Парфеновым под названием «Северный фас Кроноцкого полуострова» [3], и единственный надсубдукционный, поперечный островной дуге. Обнаружен также короткий (на суше) разлом северо-восточного простирания, очевидно, взбросовый, в юго-восточной части полуострова (рисунок).

Камчатский полуостров

Камчатский полуостров деформирован в наибольшей степени. Плейстоценовые морские террасы наклонены на северо-запад, от Алеутской дуги к Камчатке. Разломные деформации представлены сочетанием сдвиговых и сдвиго-взбросовых разломов, вместе свидетельствующих о поперечном сокращении земной коры между Алеутской дугой и Камчаткой, их коллизии [2] (рисунок).

Степень активных деформаций полуостровов растет с уменьшением возраста их приращения к основному массиву Камчатки – тем выше, чем моложе. Корреляция очевидна и подразумевает продолжающееся сближение Кроноцкого полуострова с Камчаткой. Структурных подтверждений этому нет. Предпочтительным представляется связать активные деформации Кроноцкого полуострова и объяснить, таким образом, корреляцию в целом с горизонтальным флексурным изгибом, связывающим области коллизионного сокращения земной коры Камчатки напротив Алеутской дуги и растягивающейся в сторону океанической плиты Центральной Камчаткой [1].

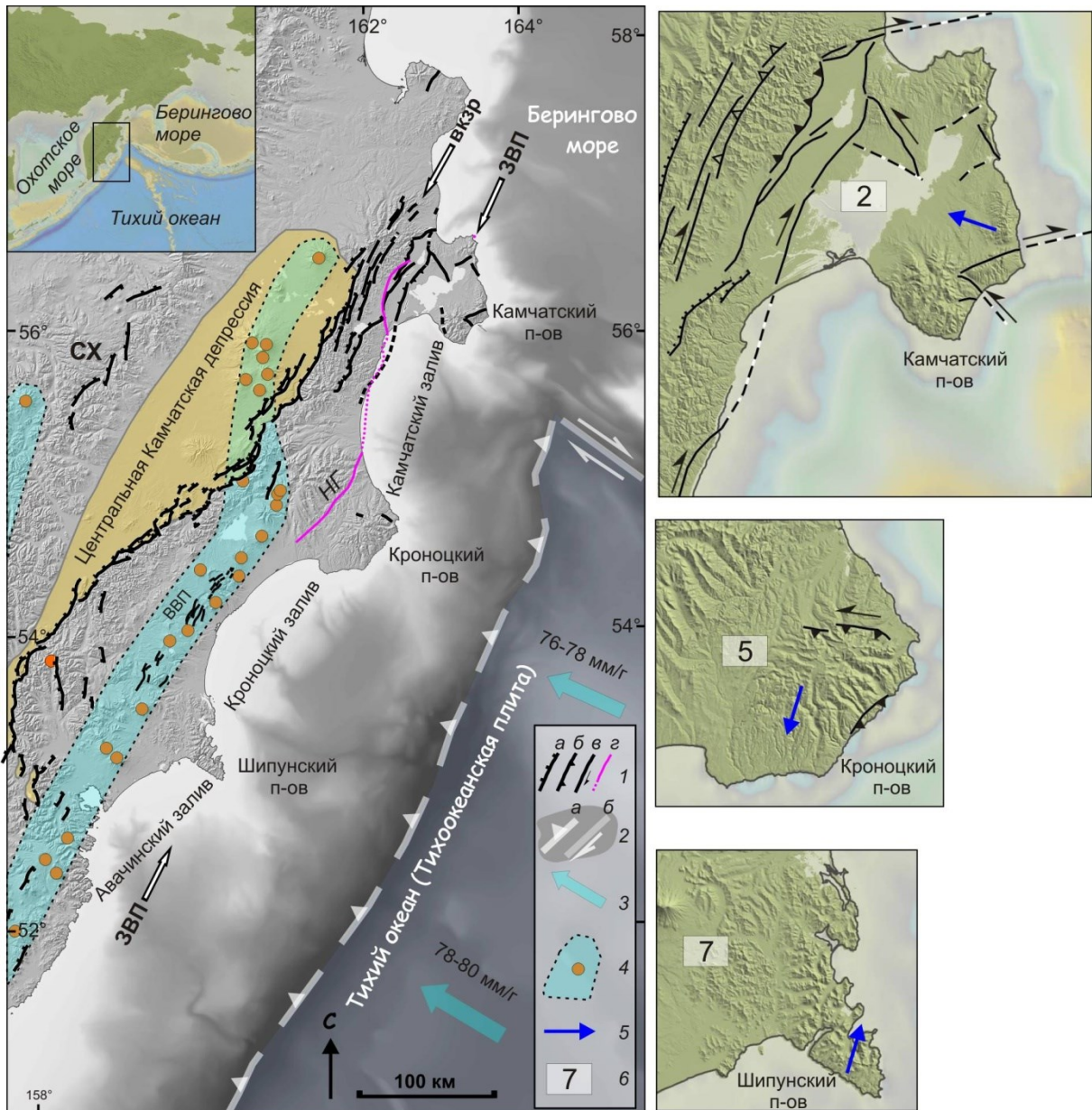


Рисунок. Активные разломы п-ова Камчатка (по [1], с изменениями и добавлениями).
 1 – активные разломы: а – сбросы, б – взбросы, в – со сдвиговой компонентой движений, г – неактивный надвиг Гречишкина, контакт полуостровов с основным массивом Камчатки, пунктир – предполагаемые продолжения под водой. 2 – граница Тихоокеанской плиты: а – выход на поверхность зоны поддвига Тихоокеанской плиты под Камчатку, б – трансформная правосдвиговая граница Тихоокеанской плиты с Алеутской островной дугой. 3 – направление движения Тихоокеанской плиты относительно Евразийской и значения скорости их сближения [7, 8], с использованием Plate Motion Calculator (<https://www.unavco.org/software/geodetic-utilities>). 4 – средне-позднеплейстоценовые вулканические пояса и центры вулканизма, Восточный и Срединного хребта (часть). 5 – примерное направление наклона поверхности блоков полуостровов. 6 – примерное время приращения полуостровов к основному массиву Камчатки (млн л.н., по [9]). ВКЗР – Восточно-Камчатская активная разломная зона, ВВП – Восточный вулканический пояс, ЗВП – зона восточных полуостровов, НГ – надвиг Гречишкина, положение по [5]). Топографическая основа: по данным SRTM 4 (<ftp://edcs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/version1/>) и [4] (слева), SRTM30 Plus V6.0 [6] для полуостровов (справа).

Список литературы

1. Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В. Продольные сдвиги в островной дуге при нормальном поддвиге океанической плиты: пример Камчатки // Тихоокеанская геология. 2023. Т. 42. № 5. С. 92-104.
2. Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В. и др. Скорость коллизионных деформаций полуострова Камчатский (Камчатка) // Геотектоника. 2014. № 2. С. 42-60.
3. Леглер В.А., Парфенов Л.М. Системы разломов островных дуг // Тектоническое районирование и структурно-вещественная эволюция Северо-Востока Азии. М.: Наука, 1979. С. 134-156.
4. Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: Изд-во КамГУ им. Витуса Беринга, 2009. 191 с.
5. Шапиро М.Н. Надвиг Гречишкина на побережье Камчатского залива // Геотектоника. 1980. № 3. С. 102-110.
6. Becker J.J., Sandwell D.T., Smith W.H.F. et al. Global Bathymetry and Elevation Data at 30 Arc Seconds Resolution: SRTM30_PLUS // Marine Geodesy. 2009. V. 32. № 4. P. 355-371.
7. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F. Geologically current plate motions // Geophysical Journal International. 2010. V. 181. P. 1-80. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2009.04491.x>
8. DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions // Geophysical Research Letters. 1994. V. 21. P. 2191-2194. <https://doi.org/10.1029/94GL02118>
9. Lander A.V., Shapiro M.N. The Origin of the modern Kamchatka subduction zone. In: Geophysical Monograph Series «Volcanism and Subduction: The Kamchatka Region» / Eds.: J. Eichelberger, E. Gordeev, M. Kasahara et al. American Geophysical Union, 2007. V. 172. P. 57-64.

Механизмы очагов вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч

Лемзиков М.В.

Focal mechanisms of volcano-tectonic earthquakes of Shiveluch volcano

Lemzikov M.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: lemzikov@kscnet.ru

В работе выполнено определение механизмов очагов по поляриностям *P*-волн сильных вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч. Использовались волновые формы сейсмограмм, зарегистрированные Ключевской и Козыревской сетями радиотелеметрических сейсмических станций, установленные вблизи, вокруг на конусах вулканов.

Введение

Самая крупная на Камчатке Северная группа вулканов, площадь которой составляет 8500 км², расположена на полуострове Камчатка в Центрально-Камчатской депрессии [5]. Большую часть занимает Ключевская группа вулканов. Она состоит из вулканов Ключевской, Безымянный, Ушковский, Крестовский и вулканов Толбачинского массива (вулканов Острый, Плоский Толбачик, и Толбачинского дола). К северу от Ключевской группы вулканов находится гигантский вулканический массив Шивелуч с активным вулканом Молодой Шивелуч. К югу от Ключевской группы вулканов расположен вулкан Кизимен. Вся эта группа вулканов расположена на стыке Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг.

Шивелуч – это одно из крупнейших вулканических сооружений Камчатки. Поперечник его основания, включая пояс аккумулятивных равнин подножий вулкана, равен 45-50 км, площадь не менее 1300 км². Вулкан Шивелуч сложен преимущественно породами андезитового и андезито-базальтового состава. Абсолютная высота 3283 м (Главная вершина), высшая точка действующего аппарата (Молодой Шивелуч) около 2800 м. Современная постройка вулкана Шивелуч включает три главных элемента: Старый Шивелуч, древнюю кальдеру и активный Молодой Шивелуч. Старый Шивелуч по морфологии и особенностям геологического строения следует считать сложно построенным полигенным стратовулканом. Основание стратовулкана во всех секторах (кроме южного, уничтоженного при образовании кальдеры) сложено мощной (местами более 1500 м) грубообломочной толщей существенно андезитового состава. Локально, преимущественно в восточном и северо-восточном секторах, на высотах 1500-1800 м наблюдается пачка чередующихся лав и пироклаستيки состава оливин-пироксеновых андезито-базальтов. Для последних 10 тыс. лет и исторического времени (XIX-XX вв.) для вулкана Шивелуч были характерны преимущественно два типа извержений: катастрофические эксплозивные типа направленных взрывов, ось которых наклонена под острым углом (40-60°) к горизонту, и субвертикальные с близким к вертикальному выбросом пироклаستيки; слабые и умеренные по силе извержения, сопровождавшие рост эксплозивных куполов [5]. В период подготовки к извержениям и во время извержения вулкана Шивелуч были зарегистрированы вулcano-тектонические землетрясения.

Удачное расположение двух радиотелеметрических сейсмических кустов Ключевского и Козыревского вблизи вулканов, на их конусах и вокруг Северной группы вулканов позволяет определить механизмы очагов вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч.

В данной работе поставлена цель определить параметры механизмов очагов сильных вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч.

Исходные данные

В работе использовались волновые формы сильных вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч. Они выбирались из архива Камчатского филиала

Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (КФ ФИЦ ЕГС РАН) [4]. Глубины выбранных землетрясений – от 0 до 20 км, энергетический класс $K_{51,2}^{\Phi 68}$ – не ниже седьмого [4].

Регистрация вулcano-тектонических землетрясений выполнена Ключевской и Козыревской сетями радиотелеметрических сейсмических станций (КФ ФИЦ ЕГС РАН), установленных вблизи и на конусах Северной группы вулканов, а также в окрестностях населенных пунктов Ключи и Козыревск: Байдарная (BDR), Семкарок (SMK), Сорокина (SRK), Цирк (CIR), Логинов (LGN), Крестовский (KRS), Ключи (KLY), Безымянный (BZM), Безымянный – Грива (BZG), Безымянный – Запад (BZW), Срединный (SRD), Зеленая (ZLN), Киришева (KIR), Козыревск (KOZ), Каменистая (KMN), Крутоберегово (КБТ) (рис. 1).

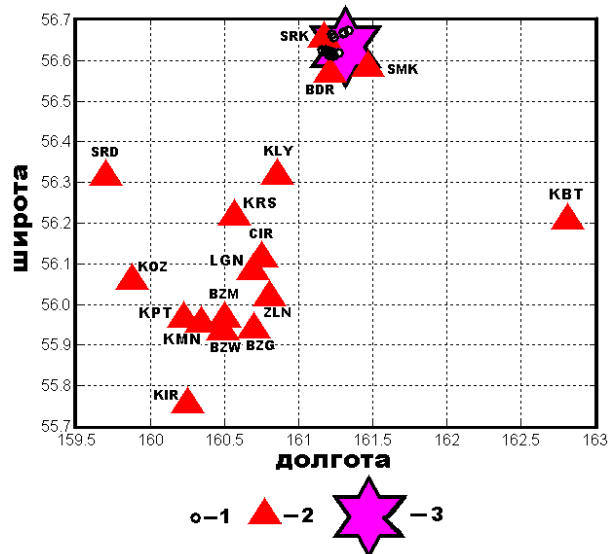


Рис. 1. Карта района исследования.
1 – эпицентры вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч, рассмотренных в работе;
2 – радиотелеметрические сейсмические станции;
3 – вершина вулкана Шивелуч.

Рассмотренные в работе вулcano-тектонические землетрясения вулкана Шивелуч были относительно сильными событиями, поэтому сейсмические сигналы были хорошо зарегистрированы на 15 радиотелеметрических сейсмических станциях. Они относятся к вулcano-тектоническим землетрясениям по определению Г.С. Горшкова [2] (рис. 2).

Остановимся на этом вопросе более подробно. Общеизвестно деление землетрясений на «вулканические» и «тектонические»; обычно подробно описываются характер и происхождение землетрясений «тектонических», а о «вулканических» даются довольно неопределенные сведения, позволяющие думать, что «вулканические» землетрясения имеют какие-то существенные особенности происхождения, отражающиеся и в записи, и на сейсмограмме. В работе [2] предлагается называть землетрясения тектонического происхождения в районах действующего вулканизма «вулcano-тектоническими», подчеркивая их тектонический характер и приуроченность к району вулканизма.

На всех радиотелеметрических сейсмических станциях установлен трехкомпонентный короткопериодный канал для регистрации скорости смещений грунта: один вертикальный (SHZ) и два горизонтальных (SHE, SHN), и дополнительно еще одна вертикальная компонента для регистрации скорости смещений грунта с повышенным уровнем чувствительности (EHZ).

Следует отметить, что не все волновые формы вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч подходят для определения механизмов очагов. На некоторых цифровых сейсмограммах сигналы волновых форм вулcano-тектонических землетрясений едва видны на фоне шума. Поэтому использовались только такие сейсмограммы вулcano-тектонических землетрясений, у которых волновые формы имеют четкие вступления P -волн на фоне помех.

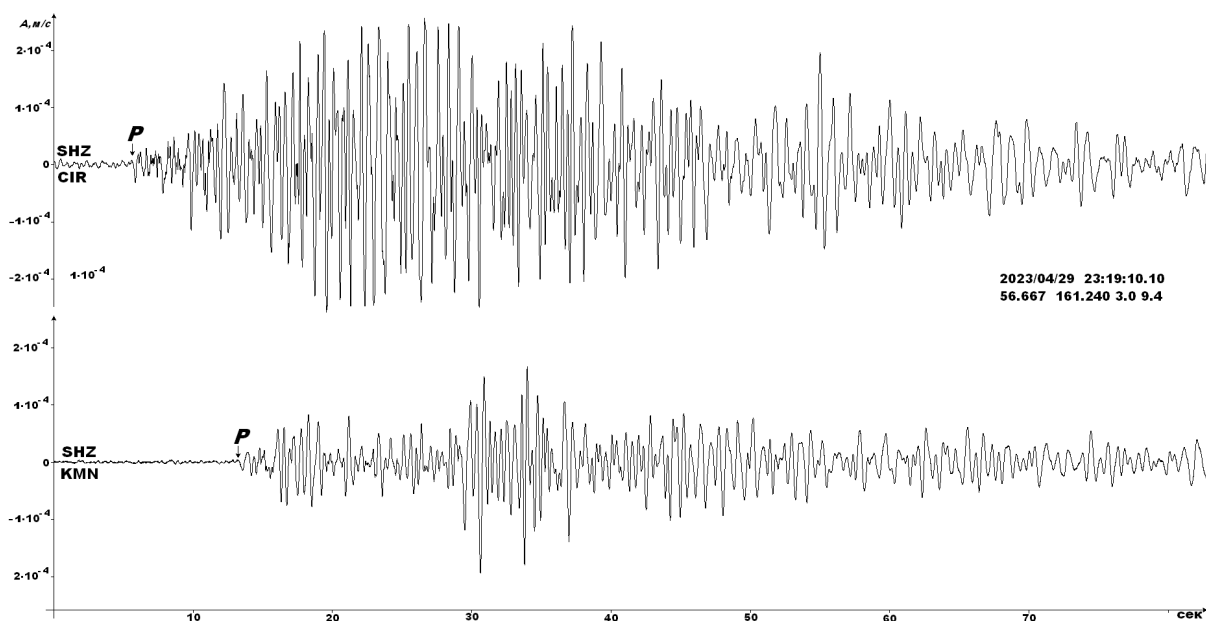


Рис. 2. Примеры волновых форм вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч, зарегистрированные вертикальными сейсмическими каналами станций Цирк (CIR) и Каменистая (KMN).

Метод

Существуют разные методы для определения механизмов очагов землетрясений. Широко известны комплексы программ под названием FPFIT, FPLOT и др., разработанные во второй половине XX века по идеям работы [1]. Алгоритмы, инструкции, описание и тексты этих программ доступны для специалистов на различных сайтах (например: <http://www.usgs.gov/>).
















В работе использовался комплекс программ [7] для определения параметров и построения механизмов очагов вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч.

Для определения механизмов очагов землетрясений необходимы: 1) полярности первых вступлений *P*-волн; 2) географические координаты станций и очага; 3) эпицентральные расстояния и азимуты из очагов на станции; 4) углы выхода сейсмических волн на станциях [3]. Все эти измерения влияют на точность определения механизмов очагов. Чем больше количество станций, тем точнее определение механизмов очагов. Вычисления углов выхода сейсмических волн на станциях выполнялись с использованием скоростной модели среды, которая применяется на Камчатке для определения географических координат очагов землетрясений и включает слои выше уровня моря. Учет вертикальных и горизонтальных особенностей скоростной модели при конкретном положении очага землетрясения и станции выполнялся за счет разбиения среды на мелкие горизонтальные блоки с конкретными значениями скоростей сейсмических волн.

Механизмы очагов вулcano-тектонических землетрясений

В результате использования комплекса программ FPFIT, FPLOT [7] были получены параметры 15 механизмов очагов сильных вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч. По механизмам очага они представлены сбросами и взбросами. Параметры механизмов очагов, полученные в данной работе, показаны в таблице.

Таблица. Механизмы очагов вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч

№	Дата	Time (UTC)	Координаты очага			К	Механизм очага			
			φ, с.ш.	λ, в.д.	Н, км		STR	DIP	RAKE	
1	2008/04/24	07:57:40.3	56.62	161.27	3.1	7.0	214	55	-123	
2	2009/04/03	19:10:45.0	56.67	161.33	6.6	8.1	313	62	-153	
3	2009/05/16	09:32:03.5	56.66	161.31	5.7	7.8	59	65	-142	
4	2011/05/31	03:14:26.0	56.61	161.24	0.9	7.0	247	58	-176	
5	2014/10/15	02:16:20.4	56.67	160.30	1.2	8.6	30	63	-145	
6	2023/04/29	23:19:10.1	56.66	161.24	3.0	9.4	337	62	-149	
7	2023/04/30	01:14:15.0	56.66	161.22	2.8	9.0	204	68	171	
8	2023/04/30	06:16:56.8	56.62	161.21	2.3	8.1	360	66	160	
9	2023/05/01	00:32:52.0	56.62	161.20	2.9	8.2	132	68	157	
10	2023/05/01	02:32:51.0	56.63	161.18	20.2	7.8	16	58	-143	
11	2023/05/02	00:48:12.2	56.62	161.22	20.8	8.4	233	66	-178	
12	2023/05/03	03:45:10.2	56.61	161.23	21.9	8.6	239	63	-163	
13	2023/05/08	18:38:54.4	56.62	161.22	22.8	8.5	298	55	-147	
14	2023/08/16	06:03:05.6	56.63	161.16	20.2	8.6	0	59	-159	
15	2023/08/25	11:41:42.6	56.62	161.18	21.8	8.2	21	64	-161	

Выводы

На примере волновых форм сейсмических сигналов вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч опробован метод определения механизмов очагов с использованием поляризации первых вступлений *P*-волн. Определены параметры механизмов очагов вулcano-тектонических землетрясений вулкана Шивелуч.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» [6].

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-27-00127, <https://rscf.ru/project/23-27-00127>.

Список литературы

1. Введенская А.В. Определение полей смещений при землетрясениях с помощью теории дислокаций // Известия АН СССР. Серия геофизическая. 1956. № 3. С. 34-47.
2. Гориков Г.С. Вулканическое дрожание, связанное с прорывом кратера Былинкиной // Бюллетень вулканологической станции. М.: Академия наук СССР. 1954. № 23. С. 33-37.
3. Лемзиков В.К., Лемзиков М.В. Изучение механизмов очагов слабых вулканических землетрясений в период подготовки и извержения вулкана Корякский (2008-2009 гг.) // Вулканология и Сейсмология. 2015. № 6. С. 34-43.
4. Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 116 с.
5. Хренов А.П., Двигало В.Н., Кирсанов И.Т. и др. Вулкан Шивелуч // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 1. С. 106-153.
6. Чеброва А.Ю., Чемарев А.С., Матвеев Е.А. и др. Единая информационная система сейсмологических данных в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН: принципы организации, основные элементы, ключевые функции // Геофизические исследования. 2020. Т. 21. № 3. С. 66-91.
7. Reasenber P., Oppenheimer D. FPFIT, FPLOT and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions // U.S. Geological Survey Open-File Report. 1985. № 85-739. 109 p.

Толмачевский активный магматический центр на юго-востоке Камчатки и его структурная позиция

Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д.

Tolmachevo active magmatic center in the south of Kamchatka and its structural position

Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D.

Научно-исследовательский геотехнологический центр ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: nurmukhamedov1949@mail.ru

Изложена последовательность обнаружения и изучения Толмачевского активного магматического центра и его структурной позиции. Представлена временная последовательность, в которой происходило формирование литосферы на юго-востоке Камчатки.

Введение

Большой интерес у вулканологов, сейсмологов и широкого круга специалистов, занимающихся изучением современных геодинамических процессов и прикладными задачами прогноза землетрясений, извержений вулканов, поиска и разведки полезных ископаемых, вызывает глубинное строение юго-востока Камчатки. В районе открыто несколько золоторудных месторождений и рудопроявлений эпитермального типа (рис. 1). Начиная с конца семидесятых – начала восьмидесятых годов прошлого столетия и по десятые годы настоящего века, ПГО (ОАО) Камчатгеология реализовало на юго-востоке полуострова большой объем региональных геолого-геофизических исследований, обоснованных необходимостью изучения литосферы в регионе, характеризующемся активным вулканизмом и высокой сейсмичностью. Исследования заключались в постановке геофизических работ методами обменных волн землетрясений (МОВЗ) и магнитотеллурического зондирования (МТЗ) вдоль протяженных профилей (рис. 1). К этому следует добавить, что вся исследуемая территория покрыта гравиметрической, аэромагнитной, геологической съемками масштаба 1:200 000. Полученная на протяжении многих десятилетий база данных использовалась при построении геолого-геофизических моделей вдоль региональных профилей.

Полевые наблюдения и результаты исследований

Первыми на юго-востоке Камчатки были проведены работы методом МТЗ вдоль профиля п. Усть-Большерецк – п-ов Шипунский (рис. 1). Построенный геоэлектрический разрез показал¹, что в его западной половине, там, где профиль проходит вдоль реки Банной, выявлена контрастная аномалия электропроводности «Западная» [6], широким основанием уходящая в верхнюю мантию (рис. 2). Ближе к дневной поверхности, в районе Больше-Банного месторождения пароводяной смеси (ПВС), аномалия локализуется. Индукционные векторы показывают [6], что центр аномалии расположен к югу от геофизического профиля. Во второй половине восьмидесятых – начале девяностых годов прошлого века на исследуемой территории было отработано два взаимно ортогонально расположенных профиля: г. Опала – р. Вахиль и п. Апача – бух. Мутная (рис. 1), с постановкой работ МОВЗ и МТЗ. Вдоль каждого профиля были построены глубинные разрезы МОВЗ [2], рассчитаны двумерные геоэлектрические [1, 5] и плотностные [5, 9] модели, охватывающие земную кору и верхнюю часть мантии. На основе комплекса данных вдоль профилей разработаны геолого-геофизические модели [5, 9] и установлены примерные контуры

¹ Пак Г., Нурмухамедов А.Г. Отчет о специальных комплексных геолого-геофизических исследованиях, проведенных на Южной Камчатке по программе прогноза землетрясений в 1980-1982 гг. (Авачинская партия по прогнозу землетрясений. Елизово: ЕГФЭ, 1982. 283 с.)

аномально низкоомного объекта (рис. 1). В 1987-1988 гг. между р. Карымчины и оз. Толмачева зафиксирован рой слабых ($M \leq 5$) землетрясений (рис. 1), получивший название Толмачевской эпицентральной зоны (ТЭЗ)² [3].

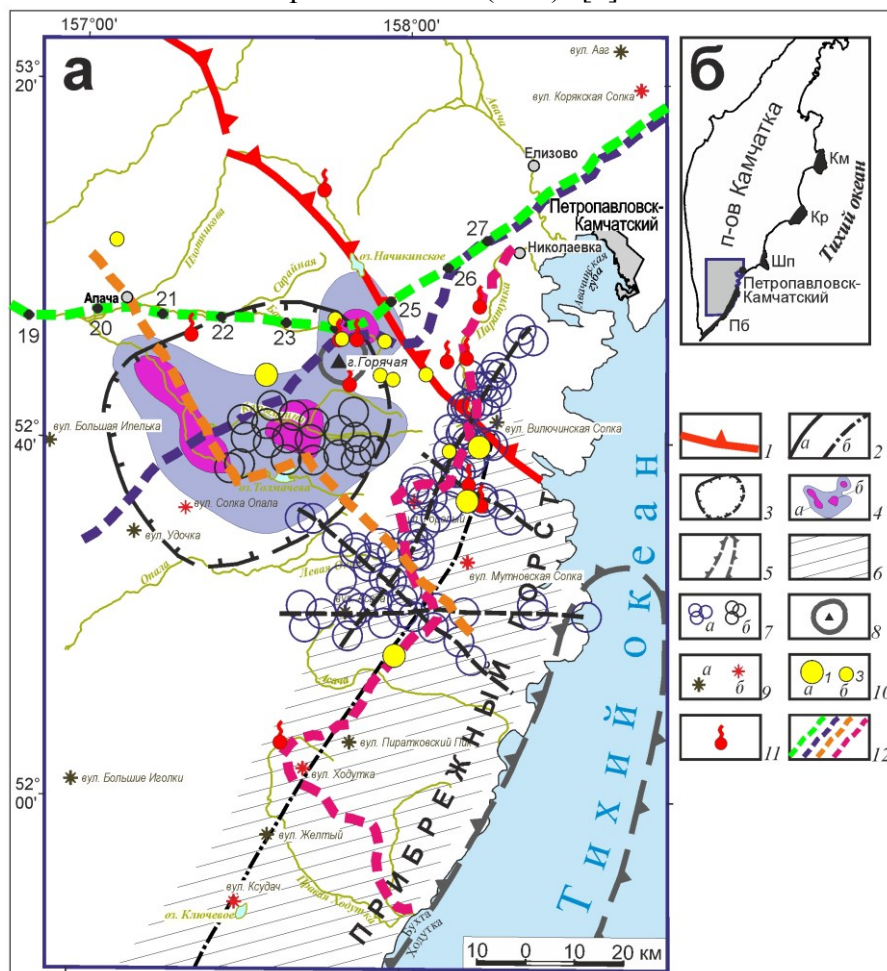


Рис. 1. Обзорная схема (а). 1 – юго-западная граница Начикинской зоны поперечных дислокаций; 2 – разломы, выходящие на дневную поверхность (а) и перекрытые вышележащими образованиями (б); 3 – граница коромантийной аномалии электропроводности, сформированной в зоне Толмачевского активного магматического центра; 4 – контуры зоны разуплотнения в переходном слое на глубине ~40 км (а), участки максимального разуплотнения в интервале глубин 35-45 км (б); 5 – гравитационный максимум; 6 – зона высокоградиентного поля силы тяжести – район современного активного вулканизма; 7 – эпицентры землетрясений ($h=0-40$ км), зарегистрированных за периоды времени 1981-1985 гг. (а) и 1987-1988 гг. (б); 8 – контуры палеовулкана сопки Горячей; 9 – вулканы потухшие (а) и действующие (б); 10 – месторождения (а) и рудопроявления (б) золото-серебряной формации; 11 – источники и месторождения гидротерм; 12 – геофизические профили: окрашен зеленым цветом – профиль п. Усть-Большерецк – п-ов Шипунский (МТЗ – 1979-1982 гг.), синим – г. Опала – р. Вахиль (МОВЗ-МТЗ – 1989-1992 гг.), оранжевым – п. Апача – бух. Мутная (МОВЗ-МТЗ – 1987-1989 гг.), пурпурным – бух. Ходутка – с. Николаевка (МОВЗ-МТЗ – 2009-2010 гг.). На врезке (б) показаны контуры исследуемой территории и террейны зоны восточных полуостровов – с юга на север: Пб – Прибрежный, Шп – Шипунский, Кр – Кроноцкий, Км – Камчатский.

Гипоцентры землетрясений расположены на глубине порядка 8 км и в плане совпадают с участком максимальной плотности шлаковых конусов в зоне ареального вулканизма. Землетрясения интерпретируются [8] как вулканотектонические

² Пак Г., Смирнов В.С., Апрельков С.Е. Результаты геофизических исследований на Петропавловск-Шипунском прогностическом полигоне и региональном геофизическом профиле бух. Мутная – п. Апача. Отчет Камчатской Комплексной Геофизической Партии региональных исследований, проведенных на Южной Камчатке по программе прогноза землетрясений и извержений вулканов в 1987-1989 годах. ЕГФЭ ПГО «Камчатгеология», 1989. 236 с.

землетрясения, которые непосредственно с извержением вулканов не связаны, а объясняются продвижением магматического расплава по ослабленным зонам. Комплексный анализ совокупности данных указывает на то, что в исследуемом районе расположен значительный по масштабам глубинный объект, представленный блоком земной коры, насыщенный интрузиями основного и ультраосновного состава, к востоку от которого расположен интрузивный массив среднего-среднекислого состава. Массив постоянно подпитывается из глубин верхней мантии магматическими расплавами и мощными тепловыми потоками [8]. Объект получил название Толмачевский активный магматический центр (ТАМЦ) [3].

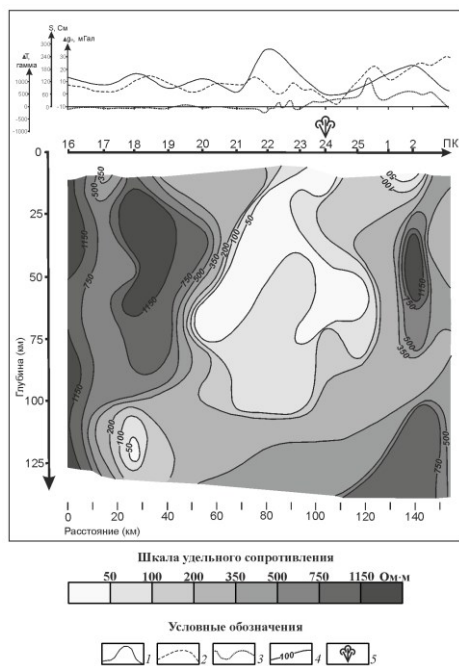


Рис. 2. Фрагмент геоэлектрического разреза вдоль профиля п. Усть-Большерецк – п-ов Шипунский [6]. 1 – график суммарной продольной проводимости; 2 – график поля силы тяжести (в редукции Буге, уровень условный); 3 – график напряженности магнитного поля; 4 – изолинии удельного электрического сопротивления (Ом·м); 5 – район Банных источников.

Впоследствии была создана трехмерная (3D) плотностная модель земной коры и верхней мантии Южной Камчатки с ее детализацией в районе ТАМЦ [3] (методика 3D плотностного моделирования представлена в статье [4]). В соответствии с полученной моделью в районе ТАМЦ выделена зона, где в результате субдукционного взаимодействия литосферных плит сформирован своеобразный выступ границы Мохо (М), в районе которого на глубине 35-45 км образовался переходный слой между границей М нависающей континентальной литосферы и кровлей погружавшегося в геологическом прошлом океанического слэба. Слой характеризуется пониженной плотностью ($3.0-3.1 \text{ г/см}^3$ на фоне $\geq 3.2-3.3 \text{ г/см}^3$), отдельные участки максимального разуплотнения ($\leq 2.8-3.0 \text{ г/см}^3$) отождествляются с очагами плавления. Контуры слоя вынесены на рис. 1. К востоку от ТАМЦ расположена зона высокоградиентного поля силы тяжести – район современного активного вулканизма (рис. 1). В соответствии с 3D-моделью, данная зона унаследована от области максимального перегиба палеослэба. Подъем магмы происходит по протяженной эруптивной трещине–магмоводу. Внедрение магмы в верхние горизонты сопровождается активными сейсмическими событиями² [8], эпицентры которых образуют протяженный (~70 км) сейсмический линеамент (рис. 1).

Обсуждение результатов

Представим временную последовательность, в течение которой происходило формирование литосферы на юго-востоке Камчатки [8]. До эоцена включительно, происходило погружение океанической литосферы под нависающую континентальную. В конце эоцена – начале олигоцена произошло приращение островодужного блока (Прибрежного террейна) к континентальному склону Палео-Камчатки, что привело к блокированию зоны субдукции и ее перескоку на восток, в акваторию океана. Начало

формирования рифтогенной зоны, вероятно, заложено в олигоцене. После чего, в олигоцен-четвертичное время, в ней активизировалась вулканическая деятельность. Высокоамплитудная (50-60 км) левосторонняя сдвиговая дислокация вдоль Начикинской зоны произошла в плиоцен-раннеплейстоценовое время [7], и она (дислокация) не затронула структуры ТАМЦ. Предполагается, что зарождение структур ТАМЦ произошло в результате взаимодействия литосферных плит в процессе погружения океанической литосферы под материковую, то есть, до блокирования зоны субдукции Прибрежным террейном. Таким образом, начало формирования ТАМЦ, вероятно, произошло не позднее эоцена. И в этом случае к названию объекта «Толмачевский активный магматический центр» необходимо добавить определение «долгоживущий».

В результате 3D плотностного моделирования определены границы мантийного выступа, в пределах которого на глубине 35-45 км находятся очаги плавления (рис. 3).

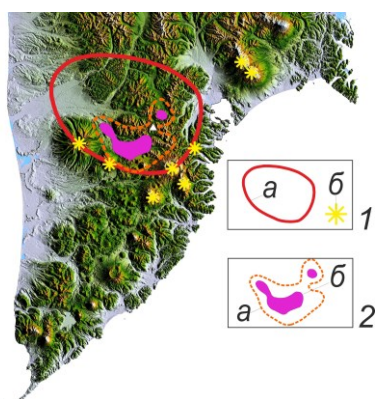


Рис. 3. Зона Толмачевского активного магматического центра на юге Камчатки. 1 – контуры мантийного выступа (а), действующие вулканы (б); 2 – контуры зоны разуплотнения в переходном слое на глубине 35-45 км (а) с участками максимального разуплотнения – очагами плавления (б).

Список литературы

1. Мороз Ю.Ф., Нурмухамедов А.Г., Лоцинская Т.А. Магнитотеллурическое зондирование земной коры Южной Камчатки // Вулканология и сейсмология. 1995. № 4-5. С. 127-138.
2. Нурмухамедов А.Г., Недядько В.В., Ракитов В.А., Липатьев М.С. Границы литосферы на Камчатке по данным метода обменных волн землетрясений // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2016. № 1. Вып. 29. С. 35-52.
3. Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д. Модель глубинного строения Южной Камчатки по результатам плотностного 3D-моделирования и комплексу геолого-геофизических данных // Тихоокеанская геология. 2022. Т. 41. № 2. С. 23-43. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-2-25-43>
4. Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д. Строение литосферы и ее влияние на золотоносность Юго-Восточной Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. № 3. Вып. 59. С. 20-41. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-3-59-20-41>
5. Нурмухамедов А.Г., Сидоров М.Д., Мороз Ю.Ф. Модель глубинного строения земной коры и верхней мантии в районе Карымшинского золоторудного узла по геофизическим данным (Южная Камчатка) // Георесурсы. 2020. № 1. Т. 22. С. 63-72. <https://doi.org/10.18599/grs.2020.1.63-72>
6. Нурмухамедов А.Г., Смирнов В.С. Результаты глубинных электромагнитных исследований на Южной Камчатке // Геология и полезные ископаемые Корьякско-Камчатской складчатой области. Материалы V Камчатской геологической конференции, апрель 1983 г. Петропавловск-Камчатский, 1985. С. 69-82.
7. Петренко И.Д. Золото-серебряная формация Камчатки. СПб: Изд-во картографической фабрики ВСЕГЕИ, 1999. 116 с.
8. Сидоров М.Д., Нурмухамедов А.Г. Объемное изображение плотностной модели земной коры на примере Южной Камчатки // Геология и геофизика. 2022. Т. 63. № 10. С. 1433-1452. <https://doi.org/10.15372/GiG2021155>
Nurmukhamedov A.G., Sidorov M.D. Deep structure and geothermal potential along the regional profile set from Opala Mountain to Vakhil' River (Southern Kamchatka) // 2nd International Geothermal Conference. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2019. V. 249. Art. 012041. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/249/1/012041>

Первые результаты мониторинга пространственно-временных изменений полного электронного содержания ионосферы, связанных с подготовкой сильных камчатских землетрясений

Полтавцева Е.В.¹, Гаврилов В.А.¹, Сагарьяров И.А.¹, Бусс Ю.Ю.¹, Титков Н.Н.²

First results of monitoring of spatiotemporal changes in the ionosphere's total electron content prior to strong Kamchatka earthquakes

Poltavtseva E.V., Gavrilov V.A., Sagaryarov I.A., Buss Yu.Yu., Titkov N.N.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: kianara@mail.ru*

² *Камчатский филиал Геофизической службы РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Представлены результаты совместного анализа данных скважинного мониторинга в районе Петропавловского геодинамического полигона (ППП) и рядов вариаций полного электронного содержания (ПЭС) ионосферы во временных окрестностях сильных камчатских землетрясений. Сопоставлялось пространственное распределение аномалий ПЭС на интервалах активной фазы подготовки землетрясений с локализацией зон растяжения и сжатия геосреды в районе ППП.

В настоящее время в мировой практике в качестве одного из источников информации о процессах подготовки сильных землетрясений достаточно широко используются результаты измерений полного электронного содержания ионосферы (ПЭС), получаемые по данным Глобальных Навигационных Спутниковых Систем (ГНСС) [1]. Возможность непрерывного мониторинга изменений ПЭС при использовании сетей ГНСС позволяет, в том числе, практически в режиме реального времени создавать двумерные карты аномалий ПЭС для выбранной пространственной локации. По этой причине создание подобной системы мониторинга для района ППП может значительно повысить надежность среднесрочного и краткосрочно прогнозирования сильных камчатских землетрясений, опасных для г. Петропавловск-Камчатский. Вместе с тем, возможный физический механизм формирования аномальных возмущений ПЭС, стабильно регистрируемых перед сильными землетрясениями, а также сама возможность использования данных мониторинга ПЭС для прогнозирования землетрясения, в настоящее время являются предметами дискуссий [5].

Основной задачей первого этапа исследований, проводившихся авторами в рамках указанного научного направления, являлась оценка целесообразности привлечения данных непрерывного мониторинга изменений ПЭС ионосферы для повышения эффективности существующей системы мониторинга процессов подготовки сильных камчатских землетрясений. Для этого планами работ предусматривалось построение двумерных карт для района ППП с аномалиями ПЭС, зарегистрированными на интервалах активной фазы подготовки Жупановского ($M_W=7.2$; 30.01.2016 г.) и Вилючинского ($M_W=6.5$; 03.04.2023 г.) землетрясений – самых сильных за последние 10 лет камчатских землетрясений по величине отношения длины очага землетрясения к гипоцентральному расстоянию (37 % и 34 %, соответственно). Кроме этого, по результатам обработки исходных данных изменений УЭС геосреды для тех же временных интервалов выделялись зоны сжатия и растяжения геосреды в районе ППП. Критерием целесообразности использования данных ПЭС ионосферы для задач мониторинга процессов подготовки камчатских землетрясений являлась степень коррелированности пространственно-временных изменений ПЭС ионосферы над районом ППП с изменениями УЭС геосреды для района ППП на интервалах активной фазы подготовки Жупановского и Вилючинского землетрясений.

Для получения значений ПЭС ионосферы, необходимых для решения указанной задачи, использовались данные RINEX-файлов Камчатской сети ГНСС наблюдений, обработанные по методике, описанной в [1]. С помощью разработанного авторами программного обеспечения полученные значения ПЭС затем обрабатывались для

формирования временных рядов ПЭС подионосферных точек территории ПГП. Как показано ниже, такой подход, базирующийся на совместном анализе временных рядов данных разнородных видов измерений (в данном случае результатов ГНСС наблюдений и данных изменений УЭС геосреды), позволяет, как правило, получать более наглядные и надежные результаты в сравнении с другими подходами при анализе таких данных.

Данные временных рядов УЭС геосреды в районе ПГП, использованные для проведения исследований, являются результатами непрерывного электромагнитного мониторинга изменений напряженно-деформированного состояния (НДС) геосреды, проводимого с 2005 г. в целях средне- и краткосрочного прогнозирования сильных камчатских землетрясений [2, 3]. Электромагнитный мониторинг проводится с использованием подземных электрических антенн, основным конструктивным элементом которых является металлическая обсадная колонна скважины. Физическая основа метода – зависимость УЭС горных пород от степени их влажности.

На рис. 1 представлены двумерные интерполированные карты возмущений ПЭС ионосферы над районом ПГП, построенные для выбранных временных интервалов на заключительной стадии подготовки Жупановского землетрясения.

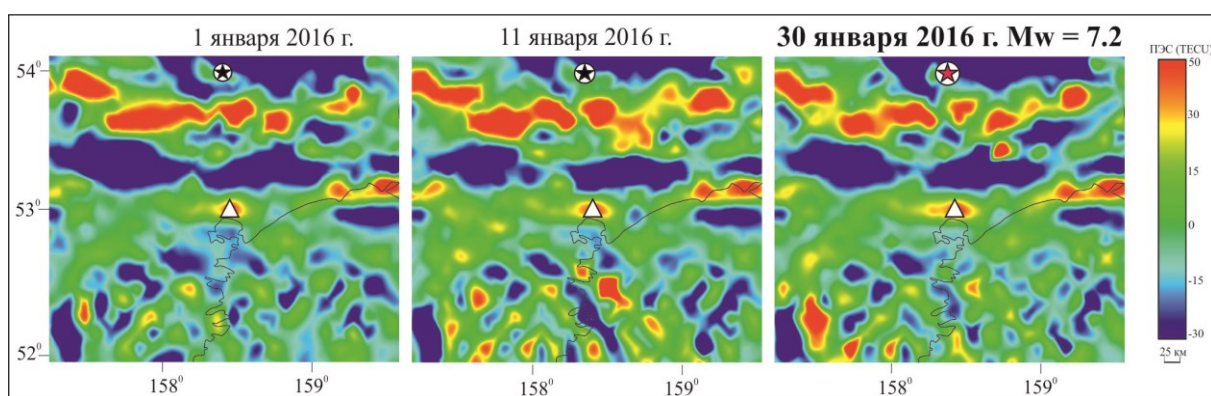


Рис. 1. Двумерные интерполированные карты возмущений ПЭС ионосферы, построенные за выбранные сутки в период подготовки и реализации Жупановского землетрясения. Треугольником отмечено расположение скважины Г-1, звездочкой – расположение эпицентра.

Можно видеть, что уже за 30 суток до момента землетрясения в районе его будущего очага появились области с повышенными значениями ПЭС ионосферы. Фактически это указывает на перспективность использования данных непрерывного мониторинга ПЭС ионосферы для задач среднесрочного и краткосрочного прогнозирования сильных камчатских землетрясений.

Отметим, что существование таких долговременных аномалий ПЭС практически невозможно объяснить с позиций физических механизмов, в которых основной акцент делается на изменениях объемной активности радона перед землетрясениями.

На рис. 2 приводится карта возмущений ПЭС ионосферы в январе 2016 г. перед Жупановским землетрясением в сопоставлении с распределением зон сжатия и растяжения в районе ПГП. Для построения карты на основе данных о смещениях измерительных пунктов Камчатской сети ГНСС наблюдений, после необходимой предобработки (сглаживания, устранения субдукционного тренда и сезонных вариаций) рассчитывалась дилатация для каждого треугольника сети как сумма главной диагонали тензора плоской деформации, и по результатам расчетов формировался временной ряд среднесуточных значений плоской дилатации. При этом анализировались относительные процентные изменения в каждом ряде дилатации за 90-120 суток до Жупановского землетрясения. На рис. 2 синей штриховкой отмечены зоны, для которых в соответствующих рядах наблюдалось уменьшение дилатации на 30 % и более процентов, красной штриховкой – зоны с возрастанием дилатации на 50 %

и более процентов. В частности, зона ПГП и скв. Г-1 находятся в обширной зоне сжатия, что совпадает с количественными оценками по консолидационной модели И.П. Добровольского, приведенными в работе [4].

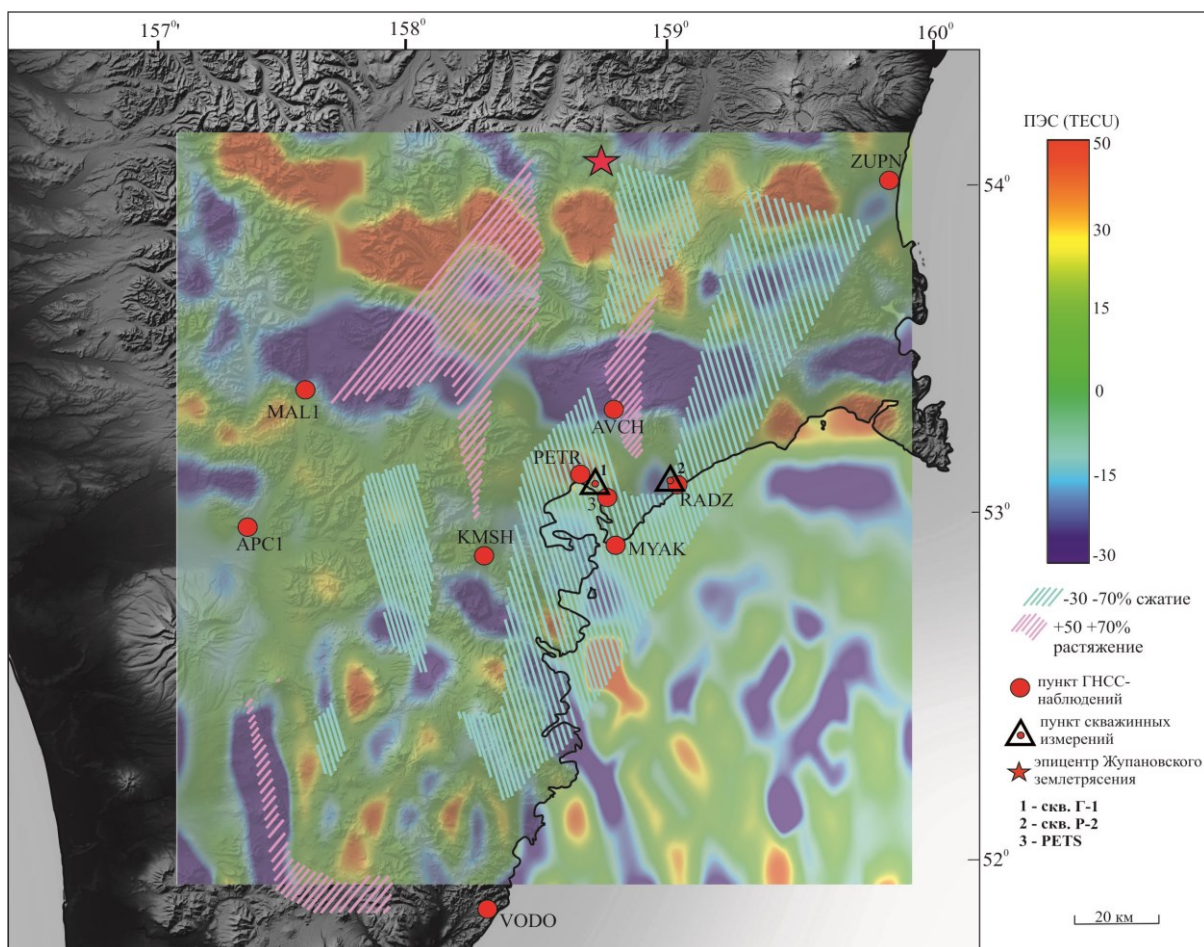


Рис. 2. Карта возмущений ПЭС ионосферы в январе 2016 г. перед Жупановским землетрясением в сопоставлении с распределением зон растяжения и сжатия. Синей штриховкой отмечены зоны, для которых в соответствующих рядах наблюдалось уменьшение дилатации на 30 % и более процентов, красной штриховкой – зоны с возрастанием дилатации на 50 % и более процентов.

Из приводимых на рис. 2 данных можно сделать вывод, что долговременные (более 90 суток) аномалии ПЭС ионосферы отражают изменения УЭС геосреды, связанные с процессами на заключительной стадии подготовки сильного Жупановского землетрясения.

На рис. 3 приводится аналогичная карта, полученная по данным накануне Вилючинского землетрясения. Можно видеть, что в этом случае основная часть как положительных, так и отрицательных ионосферных аномалий сосредоточена над Авачинским заливом. При этом зона растяжения качественно ложится на области положительных аномалий ПЭС, зона сжатия – на области отрицательных.

Отметим, что большее число пунктов ГНСС наблюдений могло бы существенно уточнить картину распределения деформационных зон, приводимых на рис. 2 и рис. 3.

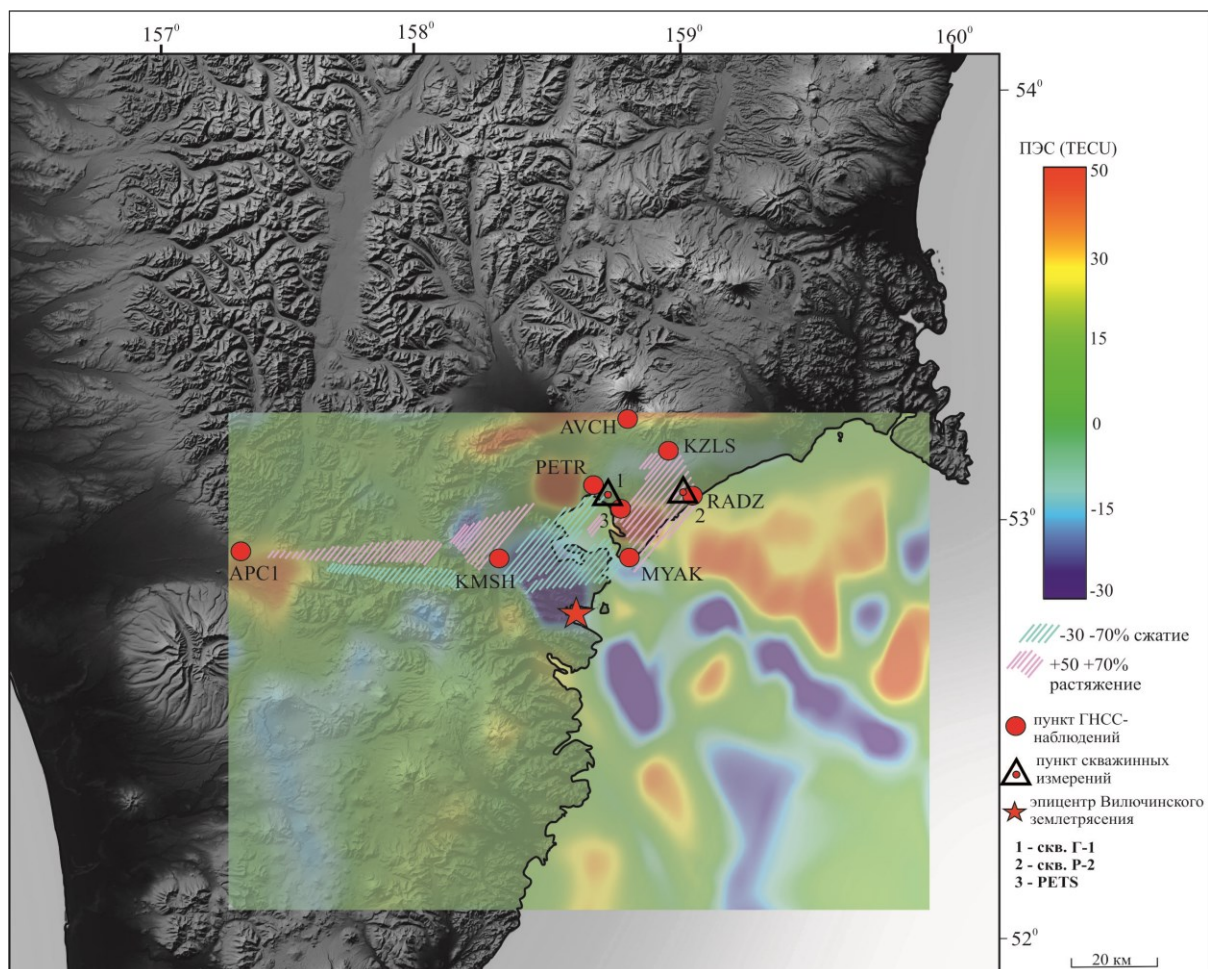


Рис. 3. Карта возмущений ПЭС ионосферы в январе 2016 г. перед Жупановским землетрясением в сопоставлении с распределением зон растяжения и сжатия. Синей штриховкой отмечены зоны, для которых в соответствующих рядах наблюдалось уменьшение дилатации на 30 % и более процентов, красной штриховкой – зоны с возрастанием дилатации на 50 % и более процентов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФ, проект № 23-27-00352 (<https://rscf.ru/project/23-27-00352/>).

Список литературы

1. Афраймович Э.Л., Первалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск: ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН, 2006. 480 с.
2. Гаврилов В.А. Воздействие переменных электромагнитных полей на геоакустические процессы: эмпирические закономерности и физические механизмы. Дис. на соиск. уч. ст. докт. физ.-мат. наук. Москва, 2017. 385 с.
3. Gavrilov V.A., Deshcherevskii A.V., Vlasov Y.A. et al. Network of multidisciplinary borehole measurements at the Petropavlovsk-Kamchatsky geodynamic testing area // *Seismic Instruments*. 2022. V. 58. P. 121-138. <https://doi.org/10.3103/S0747923922020050>
4. Gavrilov V.A., Poltavtseva E.V., Titkov N.N. et al. Monitoring of changes in the stress-strain state of geoenvironment at the Petropavlovsk Geodynamic testing site based on the multi-instrumental borehole and GPS data during the active phase of preparing the Zhupanovsky earthquake (January 30, 2016, Mw 7.2) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2023. V. 14. № 6. Art. 0732. <https://doi.org/10.5800/GT-2023-14-6-0732>
5. Pulinets S.A., Boyarchuk K.A. *Ionospheric Precursors of Earthquakes*. Berlin: Springer, 2004. 315 p.

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на I 2024 – XII 2028 гг. Концепция статистической уверенности при сейсмическом мониторинге геодинамических процессов

Соломатин А.В.

Long-term seismic forecast for the Kuril-Kamchatka arc for I 2024 – XII 2028. The concept of statistical certainty in seismic monitoring of geodynamic processes

Solomatina A.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: alf55@mail.ru

Представлены актуальные данные долгосрочного сейсмического прогноза (ДССП) по методу С.А. Федотова для Курильских островов и Камчатки. Предложена концепция статистической уверенности/определенности при сейсмическом мониторинге геодинамического состояния сейсмоактивной среды. Приведен пример ее применения для Камчатского участка региона.

Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги на I 2024 – XII 2028 гг.

На основе базового метода ДССП [4, 5] представлен прогноз сильнейших землетрясений для Курило-Камчатского региона на период I 2024 – XII 2028 гг. Основные результаты прогноза заключаются в следующем.

Сохраняется очень высокая сейсмическая опасность в районе г. Петропавловск-Камчатский (прогнозные участки 11-13, рис. 1), где пятилетняя вероятность возникновения землетрясения с магнитудой $M \geq 7.7$ и силой 7-9 баллов достигает величины $P(M \geq 7.7) = 46.1\%$. Пятилетняя вероятность того, что такое землетрясение будет иметь силу 9 баллов и катастрофические последствия в Петропавловск-Камчатской городской агломерации, превышает 15.7 %, что в 4-5 раз выше средней такой опасности в Курило-Камчатской сейсмогенной зоне, являющейся наиболее сейсмичной территорией в Российской Федерации.

На Курильских островах опасность сильнейшего землетрясения существенно ниже, при этом она максимальна в районе Средних Курильских о-вов (участки 6, 8 и 9, рис. 1), вблизи концов главного разрыва Симуширского землетрясения 15.IX 2006 г., $M=8.2$. Вероятности $P(M \geq 7.7)$ в этих участках оцениваются величинами 8.3 %, 4.3 % и 10.5 %, соответственно.

Участок 10 в районе Северных Курильских островов, расположенный между двумя указанными выше протяженными сейсмическими брешами, также характеризуется максимально высокой сейсмической активностью, что указывает на значительную вероятность его охвата очагом следующего сильнейшего землетрясения.

Для лучшего понимания текущего уровня сейсмической опасности в регионе, особенно в Авачинском заливе, необходимо продолжать и развивать непрерывные наблюдения за сеймотектоническими процессами всеми имеющимися методами.

Повышенную опасность представляют также сейсмические бреши в районе Камчатского залива (участок 15, $P(M \geq 7.7) = 11.2\%$), где до сих пор проявляются тектонические последствия сильнейшего Ближне-Алеутского землетрясения 2017 г., и в участке 1 (м. Сириха – п-ов Немуро, $P(M \geq 7.7) = 6.4\%$), рис. 1.

В целом, приведенный долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги следует использовать, как это делалось с предыдущими такими прогнозами, для обоснования и принятия необходимых государственных мер по предотвращению катастрофических потерь и ущерба в Камчатском крае, неизбежных без таких мер. Для этого в угрожаемых районах и, прежде всего, в г. Петропавловск-Камчатский, ежегодно должно существенно возрастать количество сейсмоустойчивых домов для проживания населения, а также других объектов инфраструктуры.

Приведенный сейсмический прогноз является одновременно прогнозом больших цунами как последствий сильнейших землетрясений на Курильских о-вах и Камчатке.

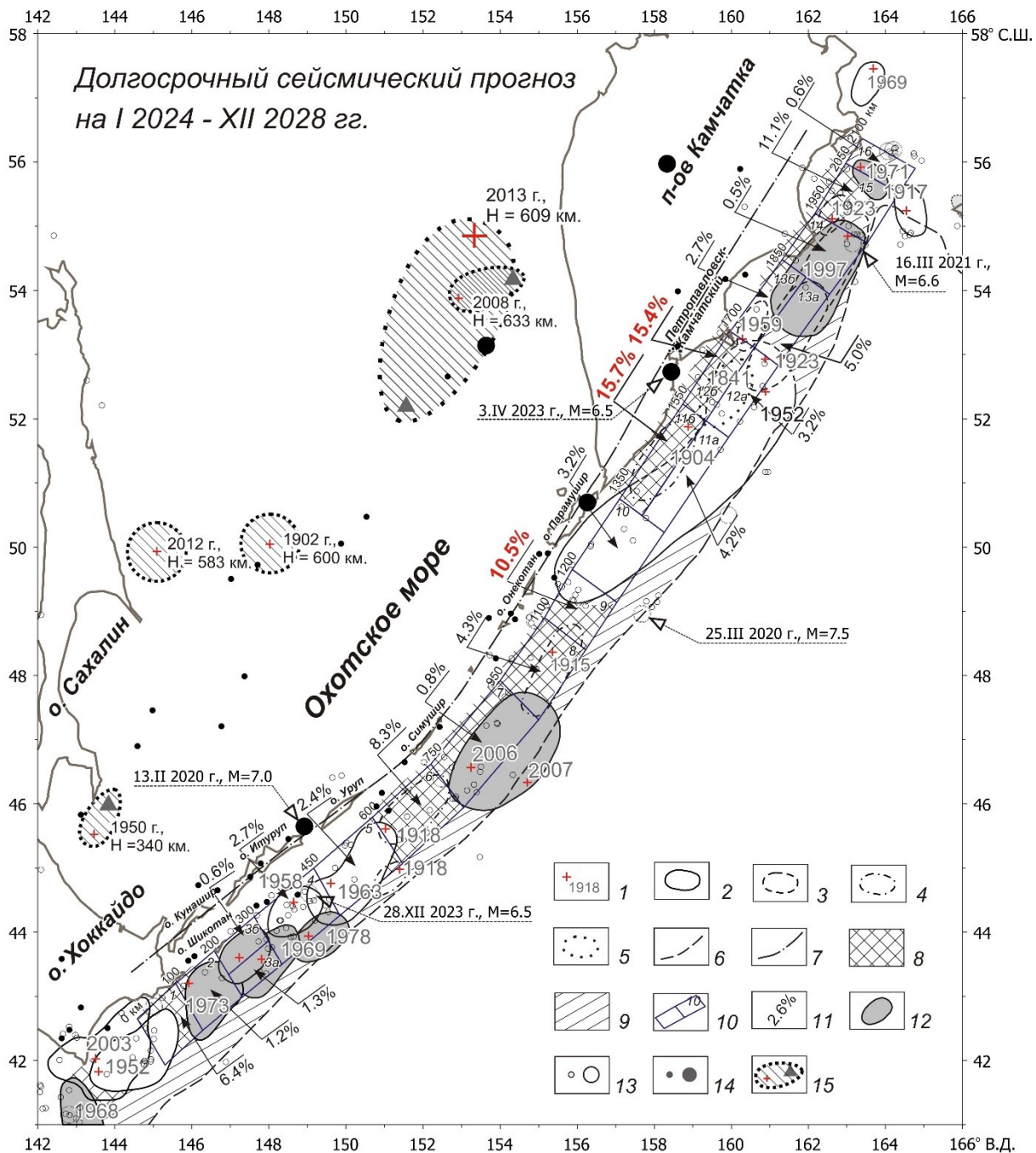


Рис. 1. Карта долгосрочного сейсмического прогноза для Курило-Камчатской дуги, очагов курило-камчатских землетрясений 1902-2023 гг. с $M \geq 7.7$ и вероятностей возникновения неглубоких ($H < 80$ км) таких землетрясений в I 2024 – XII 2028 гг. во всех участках полосы прогноза: 1 – инструментальные эпицентры и годы главных толчков землетрясений с $M \geq 7.7$; 2-5 – границы очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, проведенные с различной точностью; 6-7 – оси глубоководных желобов и вулканического пояса Курило-Камчатской дуги; 8-9 – наиболее вероятные и возможные места следующих землетрясений с $M \geq 7.7$; 10-11 – границы, номера участков прогноза и вероятности неглубоких землетрясений $M \geq 7.7$ в них в I 2024 – XII 2028 гг.; 12 – области очагов землетрясений с $M \geq 7.7$, которые произошли после 1965 г. в предсказанных сейсмических брешах; 13 – эпицентры неглубоких землетрясений, произошедших в период I 2019 – XII 2023 гг., меньший кружок, соответствует $m_b = 5.0-5.9$, больший – $M_S = 6.0-7.5$, $H < 80$ км; 14 – то же с $H \geq 80$ км; 15 – эпицентры и предположительные области очагов глубоких ($H > 300$ км) сильнейших землетрясений, треугольники – положение их главных афтершоков. Средняя вероятность возникновения курило-камчатских землетрясений с $M \geq 7.7$ в одном месте в течение 5 лет равна 3.6-4.2 %.

О параметре возможности P

При изучении сложных процессов, кроме теоретико-вероятностного, представляется перспективным подход на основе нечетких оценок возможности. Вводимый при этом параметр $P(X)$ строится на основе нормированной ранговой статистики величин исходного параметра X или на основе его функции распределения. Как и обычная вероятность, параметр $P(X)$ заключен в интервале $[0; 1]$ (условно – $]0; 1[$), но в отличие от нее сохраняет информацию о величине параметра X .

О смысле кумулятивного ряда с использованием P -шкалы

Рассмотрим кумулятивный ряд: $C(t) = \sum_{\tau=0}^t P(\tau)$. Здесь $P(\tau)$ – P -оценка возможности отнесения исследуемого параметра X , наблюдаемого в момент времени τ , к нечеткому классу «больших» значений. Как правило, при мониторинге важно оценить отличия исследуемого параметра на интервале $[t_i, t_j]$: $C(t_i, t_j) = \sum_{\tau=t_i}^{t_j} P(\tau)$ от его долговременных средних значений. При этом «средние долговременные» значения параметра X в P -шкале определяются его медианным значением X_{med} : $P_{med} = 0.5$.

Во временном ряду $C(t)$ величины его трендов $C(t_i, t_j)/(t_j - t_i)$ определяются интегрально, что позволяет говорить о средней *уверенности/определенности (certainty)* в повышенных (или пониженных) значениях X на указанном временном интервале. Единицей измерения C в этом случае являются «шансы». Хотя при необходимости можно получить и статистическую оценку, для мониторинга чаще бывает достаточно способности интегральных кривых наглядно отражать наиболее значимые тренды и временные участки их смены относительно долговременного среднего уровня:

$$C(t) = \sum_{\tau=0}^t (P(\tau) - 1/2) \quad (1)$$

О кумулятивных рядах P -оценок интенсивности сейсмического процесса и его энергетического спектра

Построим еще один кумулятивный ряд значений P в виде:

$$C^L(t) = -\sum (\text{Ln}(1 - P(t)) + 1), \quad (2)$$

где по образцу (1) учитывается равенство: $\overline{\text{Ln}(1 - P)} = -1$.

С использованием информационной дивергенции Кульбака-Лейблера легко показать, что выражение (2) отражает кумулятивное изменение информации о величинах землетрясений в P -шкале, близкое к информационным оценкам Хартли.

С другой стороны, используя представление об обобщенном энергетическом классе K^F [1, 3], представление закона Гутенберга-Рихтера в виде:

$$\text{Lg}(1 - P(K^F)) = \gamma \cdot (K^F - K_{min}^F), \quad (3)$$

а также оценку на основе максимального правдоподобия коэффициента его наклона γ , согласно [6], можно показать, что выражение (2) и дополнительное к нему:

$$C^H(t) = -\sum (\text{Ln}(P(t)) + 1) \quad (4)$$

представляют вариации уверенности в уровне сейсмических событий: относительно как наиболее слабых – (2), так и наиболее сильных из них – (4).

Рассмотрим кумулятивный временной ряд интенсивности сейсмического процесса – P^A для некоторой пространственной области в виде:

$$C^A(t) = -\sum (\text{Lg}(P^A(t)) - \overline{\text{Lg}(P^A)}) = -\sum (\text{Lg}(1 - [(1 - P^T(t)) \cdot (1 - P^E(t))]^{0.3}) - \overline{\text{Lg}(P^A)}), \quad (5)$$

где P^E – P -оценка величин землетрясений, а P^T – P -оценка временных интервалов между ними. Вид выражения (5) предполагает максимум интенсивности P^A на основе максимума любой из его компонент.

Модель Камчатского участка Курило-Камчатской сейсмогенной зоны

Используем (5) для отражения хода сейсмического процесса в Камчатском регионе для двух диапазонов гипоцентров землетрясений: выше и ниже 100 км на основе регионального каталога КФ ФИЦ ЕГС РАН.

На рис. 2 представлены соответствующие ряды $C^A(t)$ и кривая гармоник регионального геодинамического цикла с $T = 17.15/2$ лет [2]. На ее экстремумы с высокой точностью приходятся времена известных сильнейших землетрясений региона: (23.III 1923 г. (-1.00 – минимум функции); 4.XI 1952 г. (0.96); 5.VII 2008 г. (-0.94); 24.V 2013 г. (1.00); 17.VII 2017 г. (-1 – по построению). Отметим, что изменения рядов (5) для глубоких и неглубоких событий противофазны.

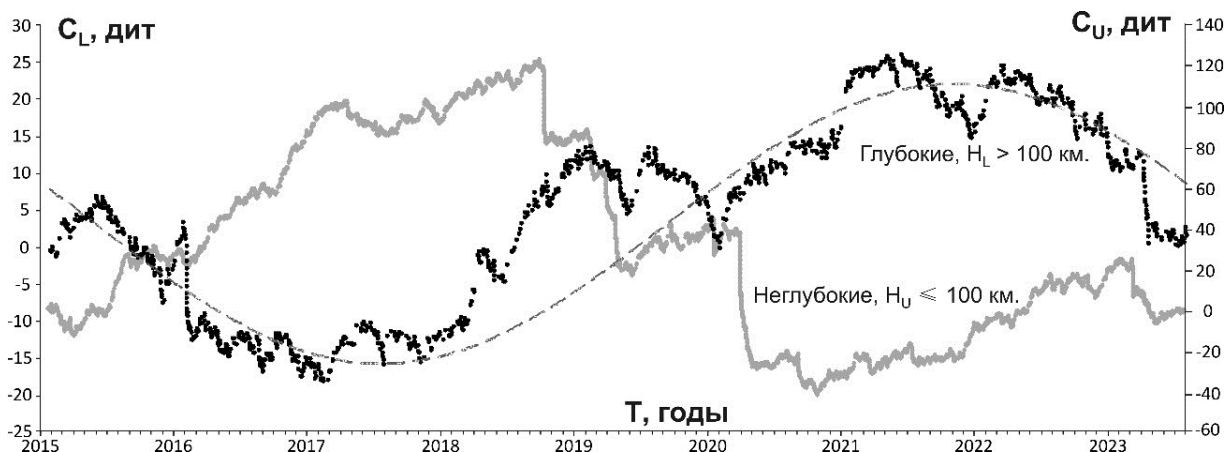


Рис. 2. Вариации уровня уверенности для глубоких (черные точки) и неглубоких (серые точки) землетрясений Камчатки. Первый ряд аппроксимирован в виде пунктира зависимостью: $-\text{Cos}(2 \cdot \pi \cdot (t - t_0) / 8.575)$. При этом временной интервал $t - t_0$ выражается в годах, а t_0 соответствует дате Ближне-Алеутского землетрясения: 17.VII 2017 г.

В то же время, выражение на основе (2) и (4):

$$C^K(t) = -\sum (\text{Lg}(1 - P^K(t)) - \text{Lg}(P^K(t))), \quad (6)$$

за счет максимализации вклада более сильных событий относительно вклада наиболее слабых, гипотетически отражает вариации субдукционных подвижек.

Графики $C^K(t)$ для указанных выше диапазонов глубин синфазны, описываются той же гармонической кривой, но сдвинуты на четверть периода. Подобный сдвиг фаз указывает на возможность дискретной, аналогично маятниковому механизму, автогенерации колебаний субдукционного участка вокруг оси на глубине 50-100 км. При этом региональные сильнейшие события (включая Ближне-Алеутское землетрясение 2017 г.) приходятся в равной степени на ее крайние положения.

Список литературы

1. Соломатин А.В. Закон повторяемости землетрясений и энергетический баланс сейсмического процесса // Вопросы инженерной сейсмологии. 2011. Т. 38. № 4. С. 39-48.
2. Соломатин А.В. Исследование связи вулканической активности и сильнейших землетрясений Курило-Камчатского региона // Вулканология и сейсмология. 2014. № 1. С. 61-76.
3. Соломатин А.В. Энергетический спектр сейсмического процесса в приложении к долгосрочному сейсмическому прогнозу и среднесрочно-краткосрочному уточнению сейсмической опасности // Вулканология и сейсмология. 2021. № 2. С. 67-79.
4. Федотов С.А. Долгосрочный сейсмический прогноз для Курило-Камчатской дуги. М.: Наука, 2005. 302 с.
5. Федотов С.А., Соломатин А.В. Долгосрочный сейсмический прогноз (ДССП) для Курило-Камчатской дуги на VI 2019 – V 2024 гг.; свойства предшествующей сейсмичности в I 2017 – V 2019 гг. Развитие и практическое применение метода ДССП // Вулканология и сейсмология. 2019. № 6. С. 6-22.
6. Aki K. Maximum likelihood estimate of b in the formula $\text{lg } N = a - bM$ and its confidence limits // Bulletin of the Earthquake Research Institute. 1965. V. 43. P. 237-239.

Морфолитодинамические исследования береговой зоны Курильского залива (о. Итуруп)

Хомчановский А.Л., Батанов Ф.И.

Morpholythodynamic study of the Kuril bay coastal zone (Iturup Island)

Khomchanovsky A.L., Batanov F.I.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: khomscience@mail.ru

Проведены исследования морфолитодинамических процессов в береговой зоне Курильского залива на о. Итуруп. Сделан вывод о том, что в данный момент аккумулятивная морская терраса находится в стабильном состоянии. Размыв террасы возможен либо катастрофическими штормами редкой повторяемости, либо после резкого косейсмического опускания берега, которое может произойти в ходе сильного землетрясения.

Введение

На о. Итуруп были проведены работы по изучению морфо- и литодинамики берегов морской аккумулятивной террасы в районе г. Курильск и прогнозированию ее дальнейшего развития. Одной из основных научных проблем на Курильских островах является прогноз повторяемости и последствий экстремальных природных явлений в Курило-Камчатской зоне субдукции (землетрясения, цунами, извержения). Для этих целей было проведено геолого-геоморфологическое и палеосейсмологическое исследование в районе Курильского залива и на прилегающей к нему морской аккумулятивной террасе, где расположен самый крупный населенный пункт острова – г. Курильск. Аккумулятивная часть залива приурочена к устью р. Курилка. Современная морская терраса сложена береговыми валами, примыкающими к древней цокольной террасе. На фоне общего медленного тектонического поднятия острова [2, 4, 6] берег может быть подвержен периодическим косейсмическим опусканиям, в результате которых повышается относительный уровень моря [8]. Медленные движения задают общий тренд вертикальных деформаций [7]. После резкого повышения уровня моря все берегоформирующие процессы усиливаются, а иногда и полностью меняют «знак» (с аккумуляции на размыв), происходит перестройка профиля динамического равновесия [1, 3, 10, 11], что влияет на береговые формы рельефа и транспорт наносов, иными словами, – на морфолитодинамику, исследованию которой и посвящена данная работа.

Материалы и методы исследований

Во время полевых исследований морфо- и литодинамики берегов о. Итуруп использовались стандартные подходы: геоморфологическое описание, фотосъемка, отбор проб песка, проходка и геологическое описание шурфов, их палеосейсмологическая интерпретация, нивелировка береговых валов и батиметрическая съемка подводного берегового склона. В процессе обработки полученных материалов использовались методы геоинформационного картографирования в программе ArcGIS Desktop и математического моделирования в программах «IC – Береговой инженерный калькулятор» [5] и «SBEACH» [13]. При моделировании использовались модели Брууна-Зенковича [3, 10], CERC, Дина [11] и др. Для определения профиля динамического равновесия применялась модель Дина [11]. Расчеты профиля динамического равновесия проводились в программе «IC – Береговой инженерный калькулятор». Для расчета величины отступления берега в результате подъема относительного уровня моря использовалось правило Брууна-Зенковича [3, 10]. Расчеты проводились в программе Microsoft Excel. Моделирование переформирования поперечного профиля берега заданным сценарием штормов с учетом колебания уровня моря было проведено в программе SBEACH.

Результаты и обсуждение

Для Курильского залива был рассчитан теоретический профиль относительного динамического равновесия по модели Дина [11]. Проанализировав результаты моделирования, можно сделать вывод, что на данный момент на берегу происходит аккумуляция, что подтверждается наличием аккумулятивных береговых валов (рисунок). Данный вывод доказывается тем, что теоретический равновесный профиль лежит ниже истинного. Второй подход исследования профиля пляжа основан на данных выполненной нами батиметрии. Напротив участков, где были найдены погребенные уступы размыва, измерены топографические профили через аккумулятивную морскую террасу. По построенной цифровой модели рельефа были получены профили подводного берегового склона. Для каждого из них был рассчитан профиль динамического равновесия. Отснятые профили накладывались друг на друга, и из совокупности точек строился общий линейный тренд, который служил исходным материалом для моделирования среднего профиля равновесия для всего участка. Достоверность аппроксимации линейного тренда составила 0.96. Данным подходом также доказывается аккумулятивный характер побережья, либо аккумулятивная стадия его формирования.

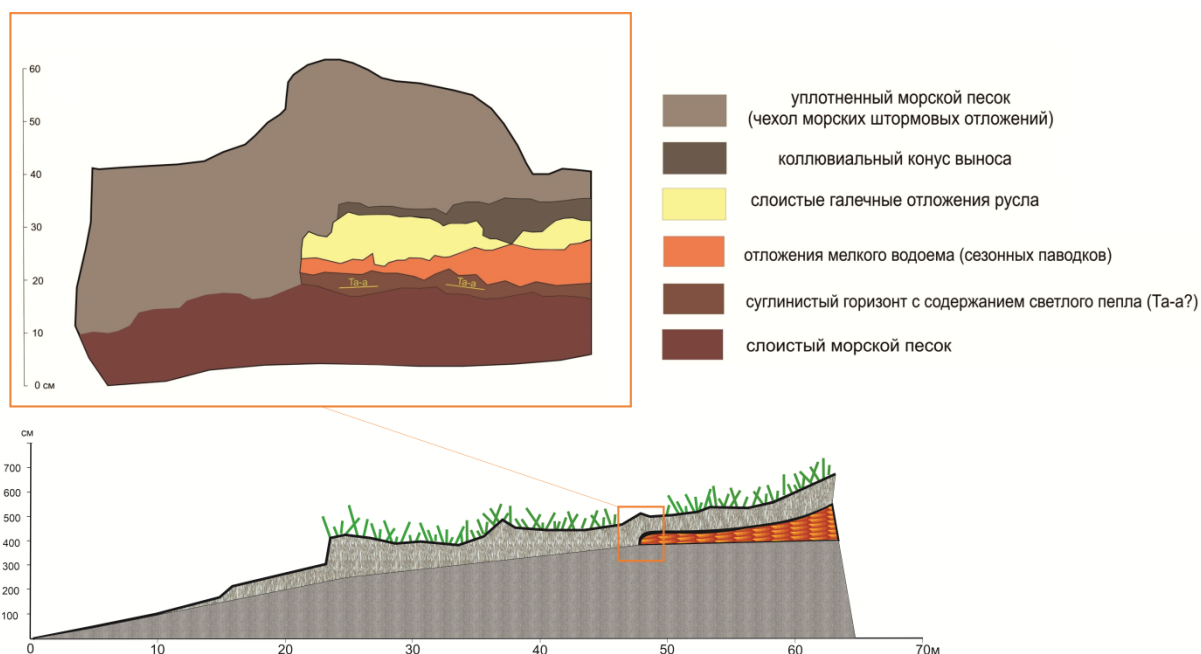


Рисунок. Профиль морской аккумулятивной террасы и погребенный уступ размыва.

Для моделирования отступления берега после относительного подъема уровня моря, которое может произойти при климатических изменениях, штормовых нагонах, цунами и землетрясениях, использовалась модель Брууна-Зенковича [3, 10]. Для геоморфологических и гидроклиматических условий Курильского залива выяснилось, что в среднем при подъеме уровня воды на каждые 10 см берег будет отступать на 10 м. При ранее проведенных палеосейсмологических работах для похожих участков на о. Итуруп доказано, что опускание поверхности берега при сильных землетрясениях может достигать амплитуды 1 м и даже более [8]. Картографическое моделирование затопления территории показало, что при определенных условиях (например, совокупном влиянии штормовых нагонов и косейсмическом опускании) нижние районы г. Курильск могут быть затоплены.

В программе SBEACH было проведено моделирование переформирования поперечного профиля берега заданным сценарием штормов с учетом колебания уровня моря. По его результатам видно, что основные изменения берега происходят при сильных штормах редкой повторяемости (высота волны 5-10 м) и при повышении

относительного уровня моря. Хорошо прослеживается тенденция движения штормовых валов вверх по склону в сторону суши при повышении уровня моря, в соответствии с правилом Брууна-Зенковича [3, 10] и его модернизацией для аккумулятивных форм – моделью Дина-Маурмайера [12]. Также заметно, что некоторые штормы приводят не к размыву, а, наоборот, к выдвигению береговой линии. Это, вероятно, происходит из-за большого количества материала, которым сложен подводный береговой склон. Большая часть материала транспортируется сюда рекой, а также, вероятно, поступает от размыва с ближайших мысов. Однако, чтобы сделать однозначные выводы, необходимо иметь данные о твердом расходе наносов р. Курилка и о расходах вдольберегового транспорта. Помимо динамики берега, в соответствии с правилом Брууна-Зенковича, зависящей от уровня, на аккумулятивных берегах существуют и принципиально иные механизмы движения наносов, которые следует учитывать [9].

На аккумулятивной морской террасе, сложенной серией береговых валов, были проведены палеосейсмологические работы с целью выявления геологических доказательств изменения рельефа берега. Как правило, следы косейсмического опускания берега представлены погребенными уступами размыва, которые образуются из-за перестройки профиля динамического равновесия в соответствии с новым относительным уровнем моря. Предполагаемые погребенные уступы были найдены в четырех шурфах и, по-видимому, связаны с одним сейсмическим событием (рисунок). Исходя из палеосейсмологических исследований на оз. Доброе [8], максимальная амплитуда опускания здесь не превышала 30 см, что вполне допустимо представленной мощностью отложений молодых морских осадков. Отложения древней морской террасы, перекрывающей штормовые отложения, содержат слой тефры (предположительно, извержение вулкана Тарумаэ 1739 г.). Других пеплов в шурфах найдено не было, что позволяет судить о возрасте молодых береговых валов, который составляет не более 280 лет.

Заключение

Подводя итоги вышесказанного, можно сделать вывод, что современная стабильность и аккумулятивная тенденция берегов Курильского залива обеспечиваются мощной подпиткой аллювиальным материалом за счет выносов реки, абразии клифов и перераспределения наносов по подводному береговому склону, и, возможно, вдольбереговым переносом. Тем не менее, эту стабильность и равновесие могут нарушить экзогенные и эндогенные процессы, а совокупное их влияние может привести к катастрофе.

Полевые данные получены при поддержке гранта Российского научного фонда № 21-17-00049, руководитель Е.И. Гордеев, <https://rscf.ru/project/21-17-00049/>. Обработка материала происходила в рамках темы НИР № 0282-2019-0005 (FWEW-2019-0005) «Глубинное строение, сейсмичность и геодинамика Курило-Камчатской островодужной системы», руководитель А.И. Кожурин.

Список литературы

1. *Афанасьев В.В.* Морфолитодинамические процессы и развитие берегов контактной зоны субарктических и умеренных морей Северной Пацифики // Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2020. 233 с.
2. *Дунаев Н.Н., Леонтьев И.О., Репкина Т.Ю.* Морфодинамика берега, сложенного пирокластическим материалом (на примере о. Итуруп Курильского архипелага) // Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)», 2020. С. 67-70.
3. *Зенкович В.П.* Основы учения о развитии морских берегов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 710 с.
4. *Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г.* Берега. М.: Мысль, 1991. 480 с.

5. *Леонтьев И.О., Кошелев К.Б., Марусин К.В. и др.* Программные продукты для математического моделирования и прогнозирования береговых процессов волновой природы // Создание искусственных пляжей, островов и других сооружений в береговой зоне морей, озер и водохранилищ: Труды Международной конференции, Новосибирск, 20-25 июля 2009 года. Новосибирск: Издательство Сибирского отделения РАН, 2009. С. 24-31.
6. *Мелекесцев И.В., Брайцева О.А., Эрлих Э.Н. и др.* Камчатка. Курильские и Командорские острова. История развития рельефа Сибири и Дальнего Востока. / Отв. ред. И.В. Лучицкий. М.: Наука, 1974. 437 с.
7. *Пинегина Т.К., Кожурин А.И.* Косейсмические и медленные тектонические деформации островной дуги: по данным исследований восточного побережья полуострова Камчатка (Дальний Восток, Россия) // Геотектоника. 2023. № 6. С. 130-143. <https://doi.org/10.31857/S0016853X23060061>
8. *Пинегина Т.К., Разжигаева Н.Г., Дегтерев А.В., Хомчановский А.Л.* По следам голоценовых сильных землетрясений острова Итуруп // Природа. 2023. № 3(1291). С. 51-57. <https://doi.org/10.7868/S0032874X23030055>
9. *Сафьянов Г.А.* Геоморфология морских берегов. М.: Изд-во МГУ, 1996. 400 с.
10. *Bruun P.* The Bruun rule of erosion by sea-level rise: a discussion on large-scale two- and three-dimensional usage // Journal of Coastal Research. 1988. V.4. № 4. P. 627-648.
11. *Dean R.G.* Beach nourishment. Theory and practice. World Scientific, 2002. 398 p.
12. *Dean R.G., Maurmeyer E.M.* Models for Beach Profile Response // CRC Handbook of Coastal Processes and Erosion. P.D. Komar ed. Boca Raton, Fl.: Coastal Research Center Press, 1983. 305 p.
13. *Hanson H., Kraus N.C.* GENESIS: Generalized model for simulating shoreline change. Tech. Report CERC-89-19. Coastal Engineering Research Center. US Army Corps of Engineers, 1989. 247 p.

Вулканогенно-тектоническая модель формирования рудолокализирующих структур и обогащения межсолевых залежей промышленных литиеносных рассолов Ангаро-Ленского артезианского бассейна, Сибирская платформа

Вахромеев А.Г.¹, Кирюхин А.В.², Литвинова И.В.³, Данилова М.А.⁴, Сурмаажав Д.¹

Volcanogenic-tectonic model of the formation of ore-localizing structures and enrichment of deposits of industrial lithium-bearing brines of the halogen-carbonate hydrogeological formation of the Angara-Lena Artesian basin, Siberian Platform

Vakhromeev A.G., Kiryukhin A.V., Litvinova I.V., Danilova M.A., Surmaazhav D.

¹ ФБГУН Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск;

e-mail: andrey_igp@mail.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

³ АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Новосибирск;

e-mail: LitvinovaIV@alrosa.ru

⁴ ФГБОУ ВО ИрНГУ, институт Сибирская школа геонаук, г. Иркутск

На примере известных месторождений и залежей промышленных редкометалльных (литоносных) рассолов межсолевых карбонатных резервуаров в юго-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна рассмотрена магматогенная гипотеза формирования вторичных аномально-гидропроводных коллекторов, процессов вторичного концентрирования предельно насыщенных рассолов галогенно-карбонатной гидрогеологической формации.

В конце прошлого века иркутскими гидрогеологами были обобщены сведения о богатом литиеносном гидроминеральном сырье Иркутской области и выделены Тыретско-Тулунско-Нижнеудинская и Иркутско-Жигаловская перспективные зоны для постановки геологоразведочных работ на промышленные редкометалльные воды-рассолы. Со временем фонд глубоких скважин (на углеводороды) значительно увеличился, возросла геофизическая изученность осадочного чехла платформы, что позволило гидрогеологам ВСНИИГиМС, СНИИГиМС, Института земной коры СО РАН дать региональную оценку наиболее перспективных территорий юга Сибирской платформы, которые отнесены к «гидроминеральной провинции Сибирской платформы» [2]. В то же время, минерагения-металлогения «жидкой редкометалльной руды» – поликомпонентных металлоносных рассолов этой гигантской редкометалльной провинции пока раскрыта не в полной мере и требует своего обобщения [2].

В поисках «жидкой литиевой руды» геологи концентрируют внимание [2] на следующих блоках. Формирование месторождения рассолов предполагает: 1) формирование коллектора природного резервуара; 2) формирование геологической структуры в резервуаре, благоприятной для локализации залежи; 3) формирование водонапорной системы, залежи и ее параметров; 4) формирование химического состава жидкой руды. Блок формирования химического состава, пожалуй, самый сложный и требует мультидисциплинарных исследований. Длительное концентрирование рассолов в замкнутом осадочно-породном бассейне ведет к выравниванию концентраций этого элемента и его содержания выше в природных резервуарах с замедленным водообменом [8, 10]. Но в гидрогеологическом разрезе осадочного чехла наблюдается инверсия концентраций промышленно-ценных элементов. Максимальное концентрирование рассолов (ЩЗМ, РЗМ, Li и Br) фиксируется именно в средней, галогенно-карбонатной толще солеродного кембрийского бассейна осадочных пород чехла, в интервале усолевской свиты. Процессы концентрирования привели к формированию предельно-насыщенных рассолов Ca и Mg-Ca состава, почти к 2-кратному росту суммы солей, к более высоким значениям концентраций K, Rb, Cs, B, Sr, Br и др. элементов, и при этом, к 3-5-кратному росту содержания иона Li (мет.) 250-460-700 мг/дм³ и выше (по отдельным пробам) относительно среднего, уровень концентрации Li в рассолах ниже залегающей терригенной гидрогеологической формации не превышает 150 мг/дм³. Процессы, послужившие концентрированию Li в рассолах межсолевых горизонтов (400-700 мг/дм³ по металлу, или 2400-4200 дм/м³ по

хлориду), а хлоридной системы именно до стадии предельно насыщенных рассолов, требуют своего объяснения [2, 8, 10, 11].

Не решенным окончательно вопросом авторы считают тему генезиса вторичных каверново-трещинных межсолевых карбонатных коллекторов, в которых распределены промышленные рассолы с оптимально высокими концентрациями солей и редких элементов. Притоки предельно насыщенных рассолов получены из глубоких скважин, пробуренных в мульдообразных структурах компенсационного типа, сходных по морфологии с воронками проседания вокруг эруптивных вулканических аппаратов трубок взрыва [2, 7]. Помимо гидрохимической инверсии концентраций ценных элементов и параметра минерализации в скважинах, где из межсолевых трещинных карбонатных коллекторов получены притоки предельно насыщенных рассолов, фиксируется АВПД. Дебиты фонтанирования скважин достигают первых тысяч м³/сут., а флюидное давление приближается к значениям горного (давления). В разные годы авторы высказывали следующие геологические гипотезы возможного формирования локальных отрицательных депрессионных структурных форм, мульд проседания и геодинамически обусловленного АВПД-явления: 1) связь с процессами глубинного соляного и карбонатного карста [2]; 2) наличие нижнего в подошве соляной толщи регионально распространенного горизонта-коллектора, способного фильтровать природные растворы разной минерализации, включая распресненные, по модели гидроинжекции [1, 2]. Предположительно, эту роль играл осинский продуктивный горизонт [2]; 3) связь с шарьяжно-надвиговой тектоникой и локализация структур проседания, мульд в восточном, аллохтонном крыле фронтальных надвигов. Показано, что структуры проседания формируются именно на аллохтонных крыльях [2, 6]; 4) формирование АВПД через передачу части веса надвинутой пластины на карбонатный трещинный коллектор в области мульд под солевой крышкой или благодаря проседанию кровли мульдообразных структур и деформации слоистой галогенно-карбонатной толщи процессами субгоризонтальных геодинамических напряжений [2, 6]. Как воронки проседания, так и локальные мульды на крыльях аллохтонных антиклиналей сформированы процессами глубинного соляного карста в мезо-кайнозойское время как наложенные, бескорневые структуры, захватывающие только интервал осадочного чехла от осинского продуктивного горизонта до балыхтинского, реже в верхах соленосной толщи раннего кембрия.

В конце палеозоя – начале триаса на территории Сибирской платформы активно проявилась фаза основного магматизма [7, 8], включавшая три крупные фации: интрузивную, вулканогенно-классическую и эффузивную. В пределах Ангаро-Ленской ступени интрузивная гипабиссальная фация пластовой формы – Усольский силл (рисунок, а) – представлена долеритами. По А.В. Мигурскому, «самый известный пластовый трапп – Усольский силл с площадью более 300 000 км², самое обширное из известных на Земле пластовых трапповых тел. Удаленность границы выклинивания Усольского силла от очаговой области (центральная часть Присяжно-Енисейской синеклизы) достигает 500 км и более» [5]. Рассматривая южную и юго-восточную области Ангаро-Ленского артезианского бассейна, на примере одного из участков Верхнеленской палеовпадины, ныне одноименного поднятия, мы отмечаем, что между расположением скважин, которые дали притоки предельно насыщенных рассолов, и расположением гигантского Усольского силла наблюдается определенная связь. Рассматривая область ранее выделенного Ангаро-Ленского месторождения поликомпонентных промышленных рассолов в галогенно-карбонатной толще раннего кембрия [2], отметим, что в южной – юго-восточной части Ангаро-Ленской ступени Усольский силл прослежен на Правобережной, Жигаловской, Грузновской, Чиканской, Ковыктинской Омолойской и Усть-Кутской разведочных площадях. К востоку от Ковыктинской площади [9] трапповое тело отсутствует (рисунок, б).

Этап траппового магматизма на Сибирском кратоне сопровождался внедрениями гигантских объемов магм в осадочный чехол в режиме гидроразрыва и формированием высокотемпературных гидротермальных систем, их воздействием на межсолевые карбонатные породы-коллекторы. Функционированием вулканических

кипение и концентрирование прилегающих геофлюидных систем каверново-трещинных карбонатных межсолевых резервуаров под солевыми покрывками восточной части Восточно-Сибирского солеродного бассейна.

Выводы. На примере известных месторождений и залежей промышленных редкометалльных (литиеносных) рассолов межсолевых карбонатных резервуаров в юго-восточной части Ангаро-Ленского артезианского бассейна рассмотрены магматогенная гипотеза, верхне-коровый процесс формирования активных циркуляционные гидротермальных систем с участием природных рассолов терригенной формации и металлоносных гидротерм мантии. Эта модель – одна из гипотез влияния платформенного магматизма на процессы вторичного концентрирования природных рассолов, мигрировавших в разогретом выше 150 °С состоянии по гидрогеологическим «окнам» трубок взрыва, разгрузившихся как на поверхности, так и в галогенно-карбонатной толще, формируя вторичные аномально-гидропроводные коллекторы в межсолевых карбонатных горизонтах кембрия, ближайших по разрезу к Усольскому силлу. Авторы выделяют магматический этап эволюции, вторичного концентрирования метаморфогенных рассолов, как самостоятельный, важнейший цикл преобразования флюидных систем и природных резервуаров осадочного чехла – процессов вторичного концентрирования солевой системы предельно насыщенных рассолов и обогащения редкими металлами.

Список литературы

1. Александров А.А., Левит А.Н., Семакин Б.В. Локальные неоднородности соляных толщ в сейсморазведке. М.: Наука, 1989.
2. Вахромеев А.Г. Закономерности формирования и локализации месторождений промышленных рассолов в карбонатных каверново-трещинных резервуарах кембрия юга Сибирской платформы (по данным глубокого бурения, испытания скважин и полевой геофизики). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 248 с.
3. Вахромеев А.Г., Горлов И.В., Мисюркеева Н.В. и др. Гидрогеологические основы локального прогноза флюидонапорных систем с аномально высоким пластовым давлением в карбонатных природных резервуарах кембрия Ковыктинского газоконденсатного месторождения // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2018. № 4 (36). С. 49-59.
4. Кирюхин А.В. Геотермофлюидомеханика гидротермальных, вулканических и углеводородных систем. СПб: Эко-Вектор Ай-Пи, 2020. 431 с.
5. Мигурский А.В. Масштабные латеральные перемещения пород и флюидов на Сибирской платформе // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2010. № 1. С. 53-57.
6. Мисюркеева Н.В., Вахромеев А.Г., Буддо И.В. и др. Детализация внутреннего строения надвиговых структур при обосновании геологической модели осадочного чехла // Литосфера и геодинамика. Материалы XXIX Всероссийской молодежной конференции (г. Иркутск, 11-16 мая 2021 г.). Иркутск: Институт земной коры СО РАН, 2021. С. 176-178.
7. Одинцов М.М., Домышев В.Г., Страхов Л.Г. и др. Ангаро-Виллюйский рудный пояс Сибирской платформы. Новосибирск: Наука, 1980. 110 с.
8. Пиннекер Е.В. Рассолы Ангаро-Ленского артезианского бассейна. М.: Наука, 1966. 322 с.
9. Смирнов О.А., Бородкин В.Н., Плавник А.Г. и др. Характеристика траппового магматизма в пределах месторождений Ангаро-Ленской нефтегазоносной области по данным бурения и сейсморазведки 3D // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2022. № 6(366). С. 5-10.
10. Шварцев С.Л., Пиннекер Е.В., Перельман А.И. и др. Основы гидрогеологии. Гидрогеохимия. Новосибирск: Наука, 1982. 286 с.
11. Alexeev S.V., Alexeeva L.P., Vakhromeev A.G. Brines of the Siberian platform (Russia): Geochemistry and processing prospects // Applied Geochemistry. 2020. V. 117. Art. 104588.
12. Hubbert M.K., Rubey W.W. Role of Fluid Pressure in Mechanics of Overthrust Faulting. I Mechanics of Fluid-Filled Porous Solids and its Application to Overthrust faulting // Geological Society of America Bulletin. 1959. V. 70. № 2.

Структурные условия эпитермального Au-Ag рудообразования в тыловой зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса

Глухов А.Н.

Structural conditions for the formation of epithermal Au-Ag mineralization at the rear zone of Okhotsk-Chukotka volcanic belt

Glukhov A.N.

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН, г. Магадан;

e-mail: gluhov76@list.ru

В тылу ОЧВП, на удалении 200 км от его оси, расположено эпитермальное Au-Ag месторождение Печальное, ассоциирующее с вулканитами контрастной трахириолит-базальтовой ассоциации. Ему присущи особенности морфологии и состава рудных тел, которые отличны от других Au-Ag объектов пояса, и отражают специфические структурные условия его формирования.

Эпитермальные Au-Ag месторождения являются продуктами деятельности высокотемпературных гидротермальных систем (ГТС, [9]), которые формируются в областях континентального вулканизма. Соответственно, закономерности развития ГТС, установленные в областях современной вулканической деятельности, могут быть использованы для понимания генезиса эпитермального оруденения и оценки его потенциала. Нами изучено эпитермальное Au-Ag месторождение Печальное, расположенное в 290 км к северу от г. Магадан, в пределах Оротуканской магматической зоны (ОМЗ), которая представляет собой рифтогенную структуру [2], развитую в тылу Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) и удалена от осевой части пояса более чем на 200 км. ОМЗ образована Верхне-Оротуканским лейкогранитным массивом (U-Pb возраст 84 млн лет, [3]) и бимодальной вулканоплутонической ассоциацией, ранее выделенной в печальнинский вулканический комплекс [2, 3]. Породы комплекса слагают Майскую и Коллективнинскую вулканоструктуры, имеющие диаметр 2-4 км и представляющие собою экструживно-купольные поднятия [3]. Общая площадь ареала порядка 100 км²; суммарная площадь выходов рассматриваемых вулканитов 30 км²; объем эффузивов около 15 км³, в том числе кислого состава – порядка 9 км³. В составе вулканического комплекса выделяются четыре фазы:

I – дайки субщелочных базальтов, коагматичные им базальтовые покровы;

II – дайки и мелкие тела массивных риолитов и гранит-порфиров;

III – флюидалные трахириолиты и комендиты, слагающие мелкие тела, штоки и дайки, и коагматичные экстружии и покровы;

IV – дайки щелочных гранит-порфиров.

Разрез образований покровной фации комплекса имеет двучленное строение с оливиновыми базальтами в нижней и трахириолитами и комендитами в верхней частях; в основании залегает пачка полимиктовых конгломератов и гравелитов [4]. Общая мощность разреза 150-300 м. Субщелочным базальтам присущи повышенные глиноземистость и щелочность; трахириолиты, комендиты и щелочные граниты характеризуются повышенными концентрациями SiO₂, Na₂O, K₂O, Fe₂O₃, летучих компонентов, пониженными – Al₂O₃ и CaO. Геохимические особенности кислых вулканитов печальнинского вулканического комплекса определяются высокими концентрациями Zr, Y, Rb, Nb, Sn, P3Э, низкими – Ba и Sr; им присуща ярко выраженная Eu-аномалия и высокое отношение La/Yb (8-10). Геологическое строение и состав печальнинского вулканического комплекса позволяют отнести его к типичным рифтогенным образованиям, характерным для тыловых зон активных континентальных окраин [11]. Помимо ОМЗ, в пределах ОЧВП комендиты известны лишь в его Восточно-Чукотском сегменте [8].

На месторождении Печальное рудные тела представлены адуляр-кварцевыми жилами, залегающими среди юрских песчаников и алевролитов. Последние перекрываются конгломератами и базальтами печальнинской свиты, и вместе с ними прорваны экструзией трахириолитов. Рудное поле характеризуется аномально высокой насыщенностью прожилково-жилковыми образованиями, доля которых на отдельных его участках достигает 10-15 %. Геологоразведочными работами выявлено 45 рудных тел; все они располагаются вблизи экструзии у основания горизонта базальтов; наиболее богатые из них приурочены непосредственно к контакту вулканитов и юрских осадочных пород. Экструзивные трахириолиты здесь осветлены, при этом жилы и прожилки в них не проникают. Мощности жил 0.1-1 м, их морфология простая, плитообразная. Жилы характеризуются незначительной протяженностью и вертикальным размахом (менее 200 м); при этом вертикальная протяженность собственно рудных тел не превышает 50 м. Непосредственно на контакте конгломератов и пород цоколя бурением выявлено согласное субгоризонтального залегания рудное тело мощностью 0.2-2 м. Оцененные прогнозные ресурсы месторождения категории P_1 составляют 1 т золота и 50 т серебра при средних содержаниях 2-6 г/т и 50-400 г/т, соответственно. Руды содержат повышенные концентрации As (>2 %), Pb (0.01-0.03 %), Sb (0.01-0.03 %) и Co (до 0.03 %) и характеризуются большим разнообразием текстур, среди которых наиболее распространены колломорфно-полосчатые и каркасно-пластинчатые. Среди рудных минералов преобладают пирит и арсенопирит, широко распространены также галенит и халькопирит; продуктивная минерализация представлена самородным золотом, блеклыми рудами и сульфоселенидами.

Месторождение Печальное по геологическому строению существенно отличается от других эпитермальных Au-Ag объектов ОЧВП и не имеет аналогов в целом на Северо-Востоке Азии. Главными его особенностями являются:

- 1) связь с вулканической ассоциацией контрастного трахириолит-базальтового состава;
- 2) локализация в терригенной толще мезозойд близ контакта с вулканитами, в которые оруденение не проникает;
- 3) исключительно высокая насыщенность рудного поля жилами и прожилками при ограниченном развитии собственно продуктивной минерализации и общем непромышленном характере объекта.

Изучение действующих ГТС Камчатки позволило И.Д. Петренко [7] выделить три их основных структурных типа: Узонский (приуроченный к кальдерам), Банно-Карымчинский (к купольным структурам) и Мутновский (без явной связи с морфоструктурами). Наивысшими температурами и наиболее широким спектром гидротерм различного состава при ярко выраженной зональности и высоких концентрациях металлов, включая золото, в термальных водах, характеризуется Узонская ГТС [5]. Все промышленные эпитермальные Au-Ag месторождения сформированы системами такого типа. Ключевым структурным фактором для их формирования является наличие кальдеры. Оно обеспечивает ГТС, с одной стороны, необходимым количеством тепловой энергии, поступающей при быстром внедрении на верхнекоровые уровни глубинных базальтовых магм [6], а с другой – стабильным питанием метеорными водами, которые составляют более 90 % объема растворов, участвующих в формировании ГТС. Воды и нелитифицированные осадки озер, зачастую заполняющие кальдеры, играют роль эффективного флюидоупора, наличие которых приводит к формированию и длительному существованию так называемой «зоны пародоминирования» [10], где в результате сочетания процессов смешения вод различного состава и температуры и их дегазации происходит образование эпитермальных руд. Примером является Асачинское месторождение, где доказано существование надрудного кратерного озера в мааровой воронке [1]. Флюидоупоры

другого типа, такие как площадные зоны аргиллизированных пород, возможны, но намного менее эффективны. В случае отсутствия кальдеры, ГТС должна разгружаться за пределами вулканической постройки, либо на ее периферии, как это и происходит в системах Банно-Карымчинского и Мутновского типов; рудная составляющая терм при этом рассеивается на большой площади, а концентрации металлов в возникающих зонах минерализации разубоживаются вплоть до величин, близких к геохимическому фону. Высокая эффективность флюидоупора приводит к значительной вертикальной и латеральной протяженности зоны пародоминирования, что, в свою очередь, позволяет сформироваться единичным, но мощным и протяженным рудным телам со значительным вертикальным размахом. Примерами являются Au-Ag месторождения Купол и Крипл-Крик. Низкая эффективность флюидоупора напротив, приводит к образованию множества мелких непротяженных жил и прожилков с непромышленным оруденением.

Майскую экструзивно-купольную рудоконтролирующую структуру, которая вмещает Au-Ag месторождение Печальное, можно параллелизовать с ГТС Банно-Карымчинского типа. Для нее характерны преобладание экструзивных фаций вулканитов и малые мощности эффузивных покровов, которые играют роль флюидоупоров. Как следствие, зона пародоминирования распространилась на значительную площадь, соответствующую площади эффузивов, что привело к образованию многочисленных жил и прожилков. Однако низкая эффективность флюидоупора не позволила ей функционировать так долго и с такими температурными градиентами, которые были достаточны для формирования промышленного месторождения.

Следует отдельно остановиться на причинах отсутствия кальдер в пределах ареала вулканитов печальнинского комплекса. Для кальдерообразования необходимо выполнение следующих условий:

- 1) подъем магмы с глубоких уровней к поверхности;
- 2) наличие прогиба фундамента, заполненного мощной толщей осадочно-вулканогенных отложений, создающей слабопроницаемый чехол, способствующий накоплению магмы на относительно небольшой глубине;
- 3) существование зон проницаемости в фундаменте и чехле [6].

Рассматриваемые вулканиты локализованы непосредственно среди триасово-юрских терригенных комплексов, слагающих в данном сегменте ОЧВП его основание. Значительная удаленность от зоны фронтальной части вулканического пояса и, как следствие, большая глубина залегания здесь зоны субдукции препятствовали поступлению больших объемов магмы. В результате, кальдерообразования не происходило.

Список литературы

1. Боровиков А.А., Лапухов А.С., Борисенко А.С., Сереткин Ю.В. Физико-химические условия формирования эпitherмального Асачинского Au-Ag месторождения (Южная Камчатка) // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. № 8. С. 897-909.
2. Глухов А.Н. Магматические ассоциации и металлогения Хурчан-Оротуканской рифтогенной структуры (Северо-Восток России) // Руды и металлы. 2009. № 5. С. 12-17.
3. Егоров В.Н., Жигалов С.В., Волков А.В., Сидоров А.А. О редкометалльном оруденении в трахириолитах и комендитах Хурчан-Оротуканской металлогенической зоны // Доклады Академии наук. 2005. Т. 405. № 2. С. 237-242.
4. Кузнецов В.М., Жигалов С.В., Ведерникова Т.А., Штикерман В.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-56 – Сеймчан. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 426 с.
5. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм / Отв. ред. В.И. Белоусов. М.: Наука, 1989. 104 с.

6. *Леонов В.Л., Гриб Е.Н.* Структурные позиции четвертичных кальдер Камчатки / Отв. ред. В.И. Белоусов. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.
7. *Петренко И.Д.* Золото-серебряная формация Камчатки. СПб: Издательство ВСЕГЕИ, 1999. 116 с.
8. *Полин В.Ф., Молл-Столкан Э.Дж.* Петролого-геохимические критерии тектонических условий формирования Чукотского звена Охотско-Чукотского вулканогенного пояса // Тихоокеанская геология. 1999. Т. 18. № 4. С. 29-47.
9. *Рычагов С.Н., Главатских С.Ф., Сандимирова Е.И., Белоусов В.И.* Рудные минералы в структуре гидротермально-метасоматических систем: состав, распределение, условия формирования // Геотермальные и минеральные ресурсы областей современного вулканизма. Материалы Международного полевого Курило-Камчатского семинара. 19 июля – 6 августа 2005 г. Петропавловск-Камчатский: «ОТТИСК», 2005. 460 с.
10. *Шарапов В.Н.* Влияние структурно-динамических условий разгрузки гидротермальных вулканических систем и рудообразование в их недрах // Доклады Академии наук. 2010. Т. 432. № 3. С. 396-402.
11. *Ярмолюк В.В., Коваленко В.И.* Рифтогенный магматизм активных континентальных окраин и его рудоносность. М.: Наука, 1991. 263 с.

Проект геоинформационной системы «Термальные поля и источники Курильских островов»

Долгая А.А., Калачева Е.Г.

Project of the geographic information system «Thermal fields and springs of the Kuril Islands»

Dolgaya A.A., Kalacheva E.G.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: adolgaya@kscnet.ru*

Приведено описание создаваемой в ИВиС ДВО РАН геоинформационной системы, предназначенной для аккумулирования и визуализации данных о поверхностных проявлениях вулcano-гидротермальных систем (термальные источники, фумарольные и сольфатарные поля) Курильских островов. Отмечено наличие web-версии системы с разграничением прав доступа, позволяющей реализовать широкий набор функций для разных типов пользователей.

Введение

В Институте вулканологии и сейсмологии (ИВиС) ДВО РАН на протяжении многих лет ведутся исследования вулcano-гидротермальных систем, расположенных на Курильских островах [например, 1-9]. В рамках этих работ получен большой объем данных о химическом и изотопном составе термальных вод и фумарольных газов, представлены оценки гидротермального выноса магматических летучих, химической эрозии вулканических построек, рассмотрены процессы современного минералообразования, протекающих на сольфатарных полях активных вулканов.

Для систематизации и анализа накопленного объема данных было принято решение о создании специализированной геоинформационной системы (ГИС), которая позволила бы также обеспечить открытость данных и их доступность широкому кругу пользователей.

В результате анализа имеющихся на рынке программных продуктов для создания ГИС был выбран комплекс решений компании NextGIS, включающий в себя полноценное настольное приложение для работы с геопространственными данными NextGIS QGIS, веб-приложение NextGIS Web для работы с геоданными через браузер, мобильное приложение NextGIS Mobile и множество других приложений и сервисов (<https://nextgis.ru/software/>). Программа для ЭВМ «NextGIS QGIS» включена в Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных.

Структура системы

Создаваемая геоинформационная система должна решать две основные задачи:

1) предоставлять доступ к накопленным наборам данных по различным типам термопроявлений для авторизованных пользователей с возможностью оперативного изменения или добавления данных, поиска, фильтрации и визуализации данных на карте;

2) визуализировать справочную информацию о вулcano-гидротермальных системах Курильских островов для неограниченного круга лиц.

Проект структуры ГИС, приведенный на рис. 1, позволяет решить обе эти задачи. К базе геопространственных данных подключается настольная версия ГИС, с помощью которой происходит настройка внешнего вида слоев, классификация данных и более сложная геоаналитика. Полученные в итоге базовые и тематические слои с помощью сервиса NextGIS Connect загружаются в веб-версию ГИС. Доступ к веб-версии, имеющей открытый адрес в сети Интернет, может получить любой пользователь, который без авторизации может видеть общедоступные слои данных и работать с интерактивной картой (перемещаться по карте, изменять масштаб, менять базовые подложки и т.д.). Авторизованный пользователь получает права администратора и может помимо базовых функций редактировать данные, добавлять

новые слои и администрировать систему (назначать права пользователям, просматривать логи подключения и др.). Настольная и веб-версия ГИС взаимосвязаны: внесенные администратором в веб-версии изменения после синхронизации с помощью сервиса NextGIS Connect отражаются в настольной версии системы, и наоборот.

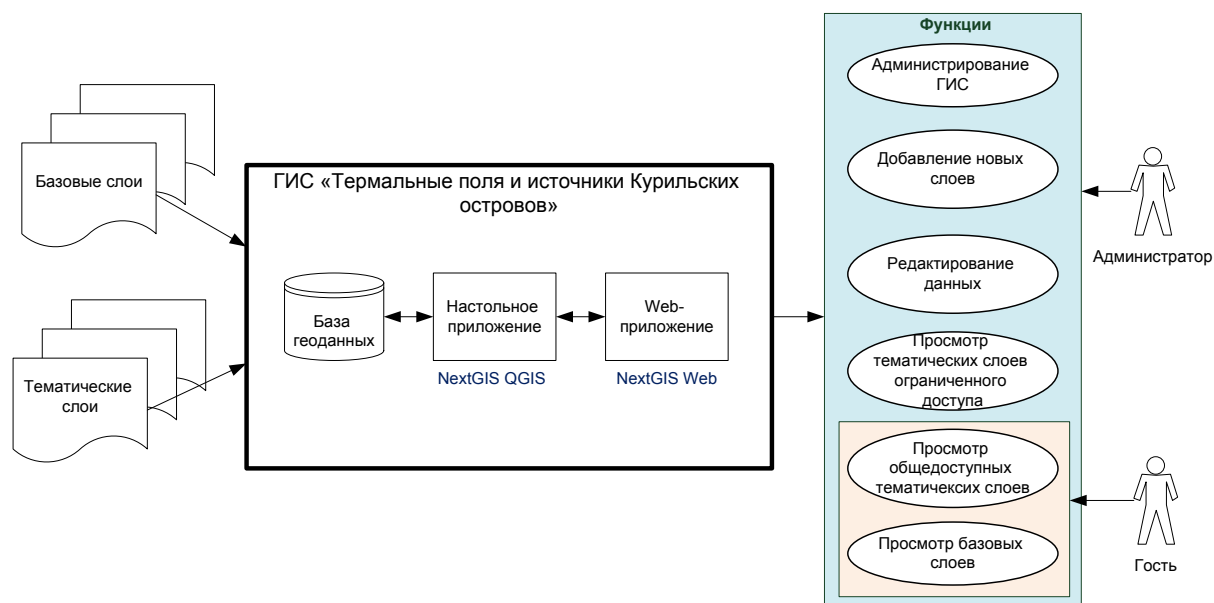


Рис. 1. Структура ГИС «Термальные поля и источники Курильских островов».

На данном этапе развития геоинформационной системы к числу базовых слоев относятся:

- топографическая карта;
- стандартная подложка с базовой географической информацией;
- безоблачная мозаика спутниковых снимков;
- государственная геологическая карта масштаба 1:200 000.

Тематические слои ГИС включают в себя:

- вулканы Курильской островной дуги;
- термальные поля и отдельные источники/группы термальных источников;
- точки опробования;
- классификация термопроявлений по физико-химическим параметрам (температура, рН, минерализация, химический состав и тип вод).

Из перечисленных тематических слоев для пользователя категории «Гость» не доступен только слой точек опробования термальных полей без классификации. Для всех классифицированных точек опробования гостю доступен ограниченный объем данных (год и место отбора, температура, рН, минерализация и тип вод). Неклассифицированный слой с данными о точках опробования содержит также данные содержания основных макрокомпонентов, а также шифр пробы, точную дату опробования и ряд других параметров. Этот слой может содержать предварительные, неполные или еще не опубликованные данные, поэтому общий доступ к ним ограничен.

Элементы тематических слоев (вулканы, термальные поля, точки опробования) в веб-версии системы сопровождаются фотографиями и краткими описаниями со ссылками на источники литературы. Это делает веб-ГИС удобным инструментом для аккумуляции и популяризации знаний, так как пользователь может сразу прочитать базовую информацию, например, о вулкане, посмотреть фотографии и перейти по ссылкам на тематические ресурсы для получения более детальных сведений.

Описание интерфейса

В настоящее время первый вариант веб-версии геоинформационной системы «Термальные поля и источники Курильских островов» размещен в сети Интернет по адресу <https://kamkursprings.nextgis.com>. Интерфейс системы для авторизованного пользователя показан на рисунке 2.

Блок 1 включает в себя доступные пользователю слои данных.

Блок 2 – варианты базовых карт. На рис. 2 в качестве подложки выбрана ESRI Standart, которая позволяет отобразить базовый рельеф поверхности суши и упрощенную батиметрию. Базовые карты подключаются из каталога QuickMapServices, доступного в NextGIS Web, или из других источников данных.

Блок 3 – окно интерактивной карты, в которой можно легко перемещаться движением мыши, изменять масштаб, измерять расстояние и площадь произвольно выбранного места, отображать координаты курсора и т.д.

Блок 4 – табличное представление объектов слоя. Выбранные в таблице строки можно открыть в отдельном окне, отредактировать, удалить и выделить на карте. Содержимое таблицы также можно сохранить в различных форматах табличных или геопространственных данных.

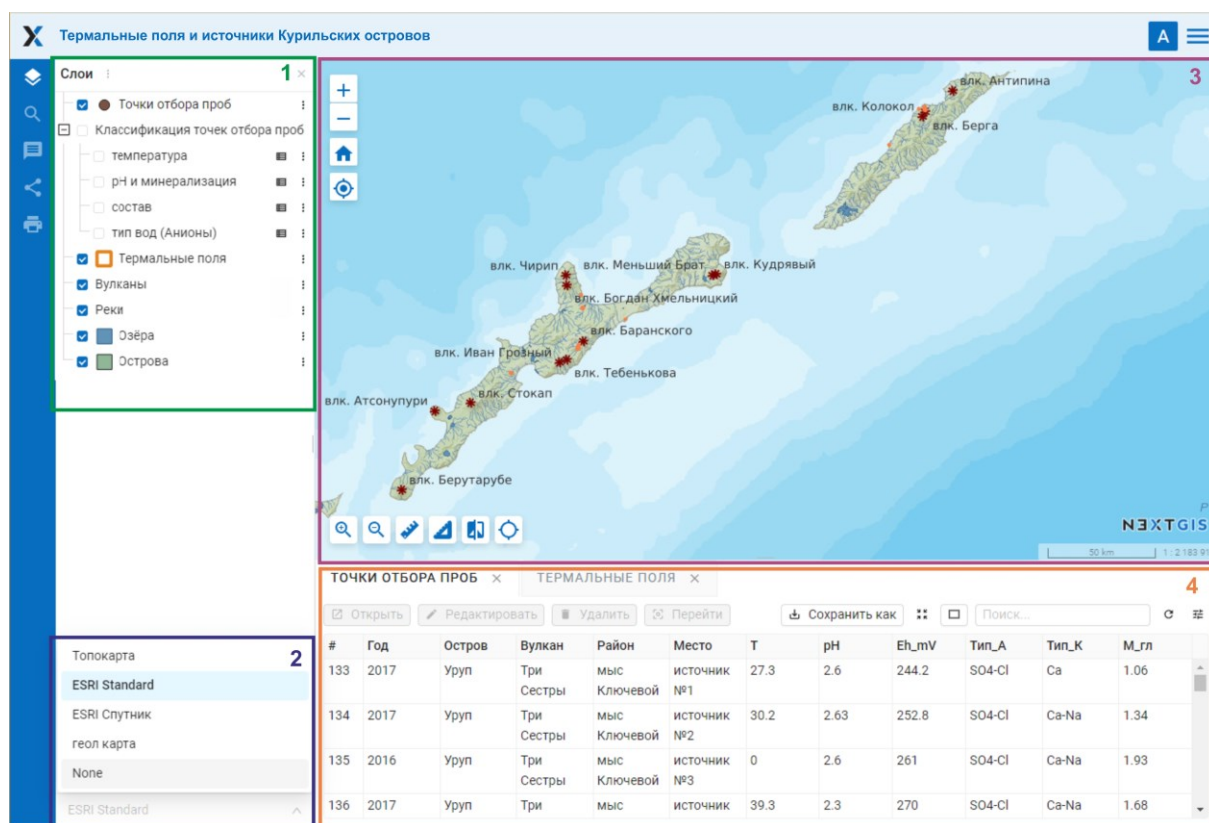


Рис. 2. Общий вид интерфейса ГИС «Термальные поля и источники Курильских островов» в режиме администратора. Цифрами обозначены функциональные блоки интерфейса (пояснение в тексте).

В режиме с ограниченными правами (пользователь «Гость») интерфейс геоинформационной системы выглядит практически идентично, отличается лишь набор доступных слоев в блоке 1, а также набор функций в блоке 4 – нет кнопки «Редактировать».

Заключение

Геоинформационная система «Термальные поля и источники Курильских островов» в настоящее время находится на начальном этапе своего существования,

однако уже сейчас она предоставляет множество возможностей для решения различных задач, связанных с изучением гидротермальных процессов на Курильских островах.

Дальнейшие планы развития ГИС связаны, во-первых, с добавлением новых блоков данных результатов анализов отобранных проб (микроэлементы, изотопный состав и др.), во-вторых, с добавлением данных по опробованию рек, дренирующих термальные поля и источники, вулканических озер; в-третьих, с расширением географического охвата и добавлением данных по гидротермальным системам Камчатки. Отдельным направлением развития можно назвать планы по использованию мобильной версии ГИС непосредственно во время проведения полевых работ.

Работа выполняется в рамках темы НИР ИВиС ДВО РАН «Роль гидротермальных систем Курило-Камчатской вулканической дуги в перераспределении мантийного и корового вещества, в процессах минерало-рудогенеза» (№ FWME-2024-0006).

Список литературы

1. Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Котенко Л.В., Волошина Е.В. Геохимия термальных вод и фумарольных газов о. Шиадокотан (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 12-26.
2. Калачева Е.Г., Таран Ю.А. Процессы, контролируемые изотопный состав (δD и $\delta^{18}O$) термальных вод Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2019. № 4. С. 3-17. <http://doi.org/10.31857/S0203-0306201943-17>
3. Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В., Котенко Т.А. Геохимия термальных вод о. Кетой (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2018. № 3. С. 21-35. <http://doi.org/10.7868/S020303061803002>
4. Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Волошина Е.В. и др. Кратерное озеро Кипящее в кальдере вулкана Головинина: геохимия воды и газов, вынос магматических летучих // Вулканология и сейсмология. 2023. № 1. С. 3-20. <http://doi.org/10.31857/S0203030622700018>
5. Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Котенко Т.А., Волошина Е.В. Геохимия кислых термальных вод острова Уруп (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 5. С. 1-16. <http://doi.org/10.31857/S0203030621050035>
6. Калачева Е.Г., Таран Ю.А., Котенко Т.А. и др. Ультракислые сульфатно-хлоридные воды вулкана Баранского (о. Итуруп, Курильские о-ва). Состав и вынос магматических и породообразующих компонентов // Вулканология и сейсмология. 2022. № 5. С. 31-48. <http://doi.org/10.31857/S0203030622050054>
7. Taran Y., Kalacheva E. Role of hydrothermal flux in the volatile budget of a subduction zone: Kuril arc, Northwest Pacific // *Geology*. 2019. V. 47. № 1. P. 87-90.
8. Taran Y., Zelenski M., Chaplygin I. et al. Gas emissions from volcanoes of the Kuril island arc (NW Pacific): geochemistry and fluxes // *Geochemistry, geophysics and geosystems*. 2018. V. 19. № 6. P. 1859-1880. <https://doi.org/10.1029/2018GC007477>
9. Taran Y., Kalacheva E. Seawater hydrothermal system in the middle of the Kuril Arc: Yankich Island, Ushishir Archipelago // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2023. V. 436. Art. 107784. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2023.107784>

Текстурные особенности кварца как индикатор рудообразующих процессов, на примере эпitherмального рудопоявления Эвевпента (Камчатка, Россия)

Жегунов П.С.¹, Грибушин К.А.², Швейгерт П.Е.¹, Буханова Д.С.¹

Textural features of quartz as an indicator of ore-forming processes, using the example of epithermal ore occurrence Evevventa (Kamchatka, Russia)

Zhegunov P.S., Gribushin K.A., Schweigert P.E., Bukhanova D.S.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: pavel.zhegunov@bk.ru*

² *Санкт-Петербургский горный университет имени Императрицы Екатерины II,
г. Санкт-Петербург*

В работе рассматриваются текстурные особенности рудных жил с целью выявления признаков процессов, ответственных за формирование рудной минерализации.

Введение

В эпitherмальных условиях структурно-текстурные особенности рудоносных жил являются важным индикатором процессов, с которыми связано формирование рудной минерализации [3, 4, 6, 7]. С генетической точки зрения выделяют текстуры первичные, текстуры перекристаллизации и текстуры замещения [4, 6, 9]. К первичным относят текстуры, для которых характерен свободный рост минералов, прямое осаждение из гидротермальных растворов. К данному типу структур относят, например, друзовую, крустификационную, колломорфную. Текстуры перекристаллизации формируются в результате перекристаллизации первичного метастабильного кремнезема в стабильный кварц, к таким структурам относят: мозаичную, перистую и др. Текстуры замещения формируются в результате частичного или полного псевдоморфного замещения минералов-предшественников более поздними кварцем, полевым шпатом и др. К данному типу текстур относят, например, каркасно-пластинчатую.

Материалы и методы

Для данной работы методом оптической микроскопии были изучены 20 прозрачно-полированных пластинок, изготовленных из образцов рудоносных жил серебрино-золоторудного проявления Эвевпента.

Результаты

На участке Центральный изученные образцы представляют собой ортоклаз-кварцевые («адуляр»-кварцевых) жилы, связанные с продуктивной золото-теллуридно-кварцевой минеральной ассоциацией. Для изученных образцов наиболее характерна текстура, в которой скомбинированы каркасно-пластинчатая, крустификационная и друзовая текстуры (рисунок, а-б). Пластины сложены ортоклазом, который макроскопически обладает желтым, рыжевато-желтым цветом (рисунок, а). Полигональные полости между пластинками заполняются крустификационным и друзовым кварцем (рисунок, б). Рудная минерализация рассеяна по жильной массе либо образует ортоклаз-кварцевые стяжения черного цвета («гингуро»), которые резко обогащены минералами благородных металлов, сульфидами, теллуридами и самородным золотом.

На участке Северный изученные образцы представляют собой ортоклаз-кварцевые (\pm халцедон, иллит) жилы, связанные с продуктивной теллуридно-сульфидно-кварцевой минеральной ассоциацией (рисунок, в-е). В образце, представленном на рисунке (рисунок, в), можно выделить три генерации жильных минералов. Первая генерация (Qz^1) обладает мозаичной текстурой с элементами пластинчатой, где пластинки, сложенные ортоклазом, погружены в микрокристаллическую мозаичную основную ткань ортоклаз-кварцевого состава,

рудные минералы редки, представлены рассеянной пиритовой вкрапленностью. Вторая генерация (Qz^2) колломорфной текстуры, сложенная скрытокристаллическим кварцем (халцедоном), по которому рассеяны сульфидные минералы, теллуриды, сульфиды благородных металлов и самородное золото (рисунок, д). Третья генерация (Qz^3) характеризуется комбинацией крустификационной и друзовой текстур (рисунок, е), с ней связано развитие кислородных фаз вульфенит, мелковит (?), неназванная фаза состава Mo-Te-O.

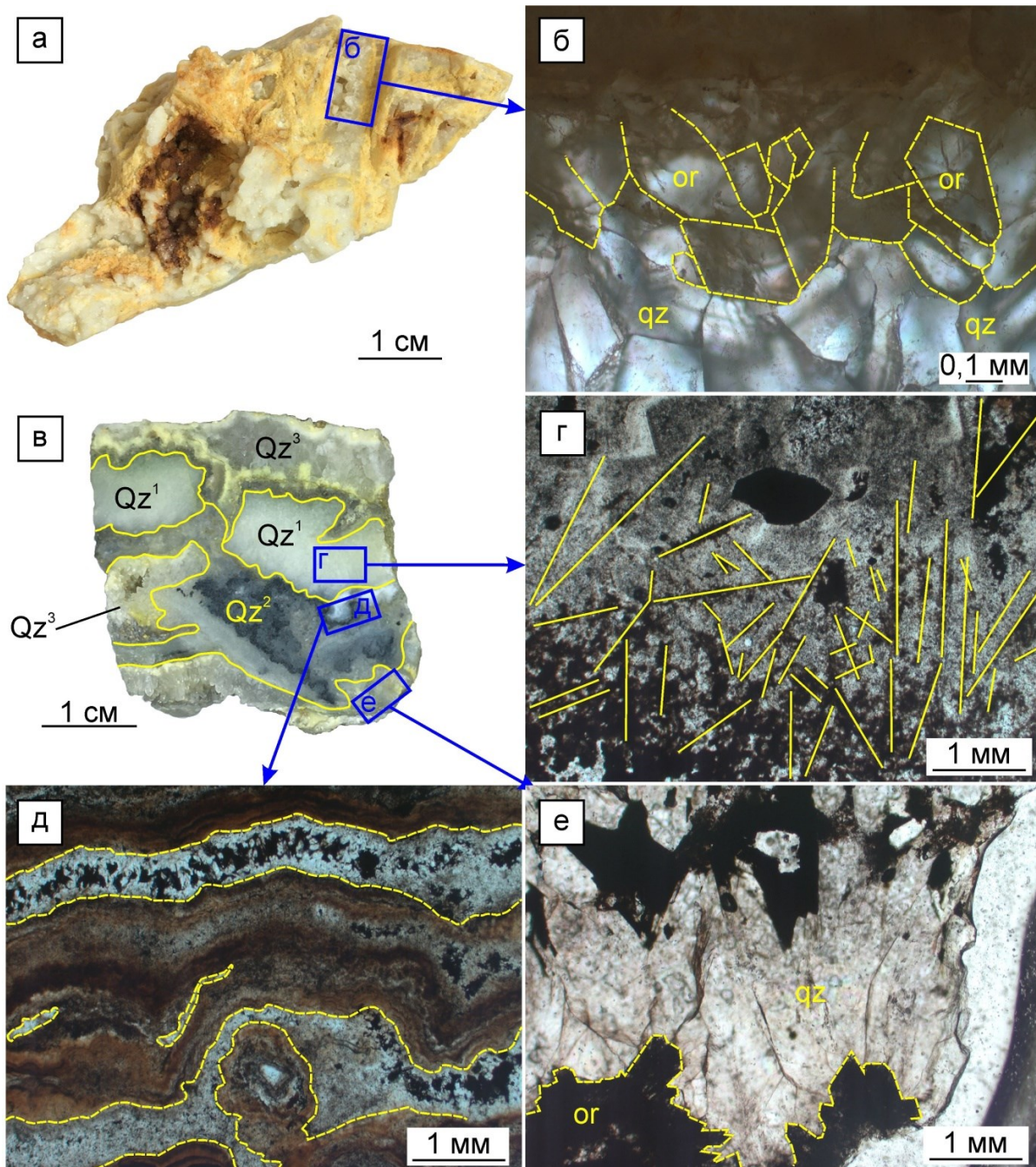


Рисунок. Текстурные особенности ортоклаз-кварцевых жил рудопроявления Эвепента: а – образец жилы каркасно-пластинчатой с элементами друзовой текстуры (участок Центральный); б – пластинки, сложенные ортоклазом (or), на которые нарастает кварц друзовой текстуры (qz); в – образец колломорфной, с элементами пластинчатой, и друзовой текстур (участок Северный), желтые контуры – разные генерации кварца (Qz^1 , Qz^2 , Qz^3 , соответственно, пояснения в тексте); г – кварц мозаичной с элементами пластинчатой текстур (желтые линии – пластинки); д – чередование полос халцедона (красновато-коричневый цвет) и мозаичного, микродрузового кварца; е – кварц друзовой текстуры, нарастающий на ортоклаз.

Обсуждение результатов

В изученных образцах встречаются три генетических типа текстур: первичные (крустификационная, друзовая, колломорфная), перекристаллизации (мозаичная) и замещения (каркасно-пластинчатая). Формирование каркасно-пластинчатой текстуры происходит в результате замещения первичного пластинчатого кальцита кварцем и/или ортоклазом [4-6, 8]. Образование каркасно-пластинчатого и пластинчатого кальцита связывают с быстрым ростом кристаллов из кипящих жидкостей в результате изменения рН растворов, кипения и потери CO₂ [1, 8]. Впоследствии, под действием относительно более поздних растворов, кальцит замещается ортоклазом и кварцем, при этом наличие ортоклаза также связывают с процессами интенсивного кипения флюида [4, 5]. Формирование крустификационной текстуры также связывают с резким вскипанием жидкости в результате падения давления [2, 4]. Друзовой кварц образуется в результате медленного свободного роста в условиях, близких к равновесным [4]. Другой распространенной текстурой, особенно характерной для участка Северный, является колломорфная. Этот тип текстуры образован в результате выпадения аморфного кремнезема или силикогеля, что возможно при резком вскипании гидротермальных флюидов в результате быстрого падения давления [4, 7]. Микроструктурный кварц мозаичной текстуры интерпретируют как результат перекристаллизации фаз кремнезема-предшественника (аморфный кремнезем или опал) [3, 4, 6].

Таким образом, процессы кипения и дегазации являются важными процессами формирования изученных минеральных ассоциаций, в том числе связанных с рудной минерализацией, поскольку в каждой генерации жильных минералов есть минералогические и текстурные признаки этого процесса. Эти выводы согласуются с общими представлениями, поскольку считается, что кипение и дегазация являются наиболее важными механизмами рудоотложения в эпитегрмальных системах [3, 4, 6].

Список литературы

1. *Browne P.R.L.* Hydrothermal alteration in active geothermal fields // Annual review of earth and planetary sciences. 1978. V. 6. № 1. P. 229-248.
2. *Buchanan L.J.* Precious metal deposits associated with volcanic environments in the Southwest // Geological Society of Arizona Digest. 1981. V. 14. P. 237-262.
3. *Camprubi A., Albinson T.* Epithermal deposits in México – update of current knowledge, and an empirical reclassification. In: Geological Society of America Special Paper 422 / Alaniz-Álvarez S.A., Nieto-Samaniego Á.F. 2007. P. 377-415. [https://doi.org/10.1130/2007.2422\(14\)](https://doi.org/10.1130/2007.2422(14))
4. *Dong G., Morrison G., Jaireth S.* Quartz textures in epithermal veins, Queensland; classification, origin and implication // Economic geology. 1995. V. 90. № 6. P. 1841-1856. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.90.6.1841>
5. *Etoh J., Izawa E., Watanabe K. et al.* Bladed quartz and its relationship to gold mineralization in the Hishikari low-sulfidation epithermal gold deposit, Japan // Economic Geology. 2002. V. 97. № 8. P. 1841-1851. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.8.1841>
6. *Moncada D., Mutchler S., Nieto A. et al.* Mineral textures and fluid inclusion petrography of the epithermal Ag–Au deposits at Guanajuato, Mexico: Application to exploration // Journal of Geochemical Exploration. 2012. V. 114. P. 20-35. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.12.001>
7. *Sander M.V., Black J.E.* Crystallization and recrystallization of growth-zoned vein quartz crystals from epithermal systems; implications for fluid inclusion studies // Economic Geology. 1988. V. 83. № 5. P. 1052-1060. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.83.5.1052>
8. *Simmons S.F., Christenson B.W.* Origins of calcite in a boiling geothermal system // American journal of science. 1994. V. 294. № 3. P. 361-400. <https://doi.org/10.2475/ajs.294.3.361>
9. *Zeeck L.R., Monecke T., Reynolds T.J. et al.* Textural characteristics of barren and mineralized colloform quartz bands at the low-sulfidation epithermal deposits of the Omu camp in Hokkaido, Japan: Implications for processes resulting in bonanza-grade precious metal enrichment // Economic Geology. 2021. V. 116. № 2. P. 407-425. <https://doi.org/10.5382/econgeo.4795>

Медно-никелевая минерализация рудопроявления Северное (Центральная Камчатка)

Зобенько О.А., Скильская Е.Д., Сергеева А.В.

Copper-nickel mineralization of the Severnoe ore field (Central Kamchatka)

Zobenko O.A., Skilskaya E.D., Sergeeva A.N.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: zobenko@yandex.ru

В сообщении приводятся сведения о минеральных ассоциациях и особенностях химических составов медно-никелевых, а также ассоциирующих с ними золото-серебряных и платиновых минералов одного из перспективных объектов Камчатской никеленосной провинции – Cu-Ni рудопроявления Северное.

Введение

Сульфидное медно-никелевое оруденение на Камчатке сосредоточено в пределах Камчатской никеленосной провинции (КНП), расположенной в 130 км от г. Петропавловск-Камчатский [3]. На ее территории находится комплексное медно-никелевое месторождение среднего масштаба Шануч, производительность которого составляет до 5 тыс. тонн никеля в год. В южной части КНП находится один из крупных рудных узлов – Дукук-Квинум-Кувалорогский рудный узел, где располагаются порядка 30 Cu-Ni рудопроявлений [4]. С Кувалорогским габбро-пироксенит-кортландитовым массивом связано изученное рудопроявление Северное.

Минеральный состав руд был исследован как методом классической минераграфии, так и с помощью современных методов физико-химического анализа в лаборатории вулканогенного рудообразования ИВиС ДВО РАН. Для определения химических составов минералов и изучения микровключений в них был использован сканирующий электронный микроскоп Vega III Tescan, оснащенный энергодисперсионным спектрометром Oxford Instruments X-max 80 mm². Проводящим слоем на полированных аншлифах выступало напыление углеродом. Ускоряющее напряжение составляло 20 кэВ, ток 1 нА, диаметр возбуждаемого пучка 5 мкм.

Текстуры руд меняются от прожилковых-вкрапленных до сплошных массивных. Минеральный состав представлен преимущественно пирротинном (70-75 %), а также пентландитом (до 25 %), халькопиритом (5-10 %) и пиритом (2-5 %). Эти сульфиды образуют тесные сростания между собой, и на основе преобладания того или иного минерала выделены две минеральные ассоциации: пирротин-пентландит-пиритовая и пирротин-пентландит-халькопиритовая, которые считаются типичными для медно-никелевых объектов Центральной Камчатки (месторождение Шануч, рудопроявления Аннабергитовая Щель, Рассоха) [1-3]. Из второстепенных и редких минералов отмечаются сфалерит, галенит, молибденит, сперрилит, герсдорфит, кобальтин, кочкарит, теллурувисмутит, мелонит, майченерит. Акцессорные минералы представлены такими оксидами как магнетит, ильменит, хромит и рутил. благороднометалльная минерализация представлена самородным золотом, электруммом и гесситом.

Пирротин – главный и наиболее распространенный рудный минерал. В химическом составе всех изученных зерен пирротина установлены примеси никеля до 1-2 вес. % и хрома до 2.6 вес. %.

Пентландит, второй по распространенности сульфид, находится в тесных сростаниях с пирротинном, образуя прожилки и сплошные бесформенные агрегаты. По данным СЭМ в пентландите установлены примеси кобальта (до 1.8 вес. %), меди (1.62 вес. %) и хрома (0.4 вес. %), что сближает его с пирротинном рудопроявления Рассоха [1].

Халькопирит часто наблюдается как в виде изометричных зерен в пирротине, так и в виде бесформенных агрегатов. По составу близок к стехиометричному.

Пирит преимущественно представлен бесформенными агрегатами в пирротине и халькопирите. В химическом составе пирита установлены примеси никеля и кобальта.

Остальные минералы встречаются гораздо реже и, в основном, образуют включения в пентландите и пирротине. Выявленная в рудах рудопроявления Северное благороднометалльная минерализация, представленная сперрилитом, электрумом и гесситом, ассоциирует с сульфоарсенидами никеля (герсдорфит), а также редкими выделениями теллуридов (мелонит), теллуровисмутидов (кочкарит, майченерит) и схожа с таковой рудопроявления Аннабергитовая щель (рисунок) [2].

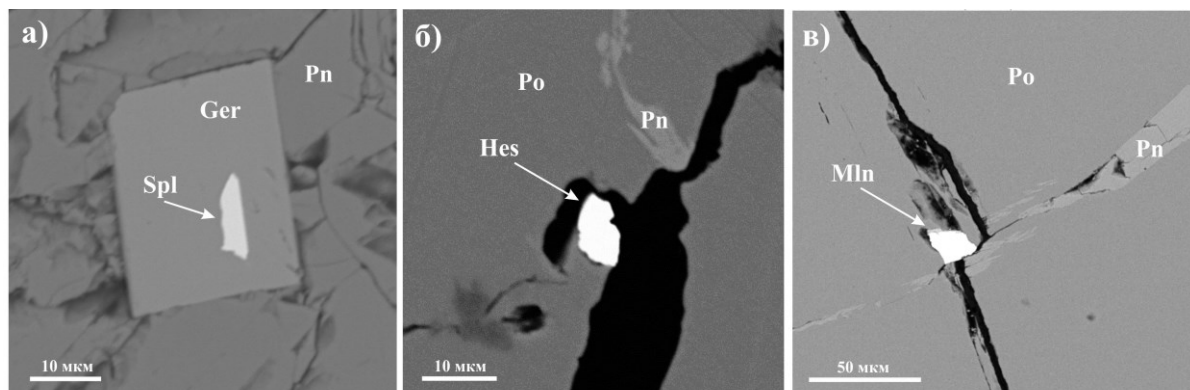


Рисунок. Фотографии, иллюстрирующие формы выделения редких минералов, установленных в рудах рудопроявления Северное: а – микровключение спериллита (Spl) в герсдорфите (Ger) в пентландитовой матрице (Pn); б – микровключение гессита (Hes) в пирротине (Po), ассоциирующем с пентландитом (Pn); в – пирротин (Po) с прожилком пентландита (Pn) и микровключением мелонита (Mln). Изображение в обратно-рассеянных электронах.

Пирротин-пентландит-халькопиритовая минеральная ассоциация характерна для руд многих Cu-Ni объектов Центральной Камчатки [2, 3]. Такая минеральная ассоциация формируется в результате сингенетических процессов формирования массива, а также при последующих преобразованиях, связанных с воздействием пострудных гранитоидов. Данные по минеральному составу и текстурно-структурным особенностям руд рудопроявления Северное позволяют предложить подобный механизм образования пирротин-пентландит-халькопиритовой минеральной ассоциации.

Авторы выражают благодарность ЗАО НПК «Геотехнология» за предоставленный каменный материал для исследований и плодотворную совместную работу.

Список литературы

1. Кунгурова В.Е., Трухин Ю.П., Кувакин Г.В. Сульфидное медно-никелевое рудопроявление Рассоха (Дукукский рудный район, Камчатка) // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2016. № S31. С. 72-82.
2. Новаков Р.М., Кунгурова В.Е., Москалева С.В. Условия образования благороднометалльной минерализации в сульфидных кобальт-медно-никелевых рудах Камчатки (на примере рудопроявления Аннабергитовая Щель) // Записки Горного института. 2021. Т. 248. С. 209-222.
3. Трухин Ю.П., Степанов В.А., Сидоров М.Д. Камчатская никеленосная провинция // Доклады РАН. 2008. Т. 418. № 6. С. 802-805.
4. Трухин Ю.П., Сидоров М.Д., Степанов В.А., Кунгурова В.Е. Строение и никеленосность Кувалорогского базит-ультрабазитового массива // Известия ВУЗов. Геология и разведка. 2009. № 6. С. 43-49.

Кислые хлоридно-сульфатные воды вулкана Синарка (о. Шиашкотан)

Калачева Е.Г., Коленко Т.А., Волошина Е.В.

Acidic chloride-sulfate waters of the Sinarka volcano (Shiashkotan Island)

Kalacheva E.G., Kolenko T.A., Voloshina E.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: keg@kscnet.ru

Дается представление о кислых сульфатно-хлоридных водах, разгружающихся на северо-западном склоне активного вулкана Синарка (о. Шиашкотан). Рассмотрены особенности макро- и микроэлементного состава вод на пяти термальных площадках, взаимосвязь и условия формирования отдельных групп источников.

Шиашкотан – один из островов Большой Курильской дуги (рис. 1а, б). Его основными морфологическими структурами являются два многоцентровых вулканических массива среднего плейстоцена-голоцена: Синарка и Кунтоминтар. Активный вулкан Синарка входит в одноименный массив, формирующий северную часть острова. Массив вытянут на 11 км в субмеридиональном направлении (при ширине 5-8 км), состоит из 20 лавовых стратовулканов и эффузивных куполов разной степени сохранности. Из кратера вулкана выступает молодой экструзивный купол извержения 1878 г. [1], проявляющий активную фумарольную деятельность. Постройка вулкана вмещает Северо-Шиашкотанскую гидротермальную систему, поверхностные проявления которой представлены разнообразными по химическому составу термальными источниками и парогазовыми выходами [2, 5].

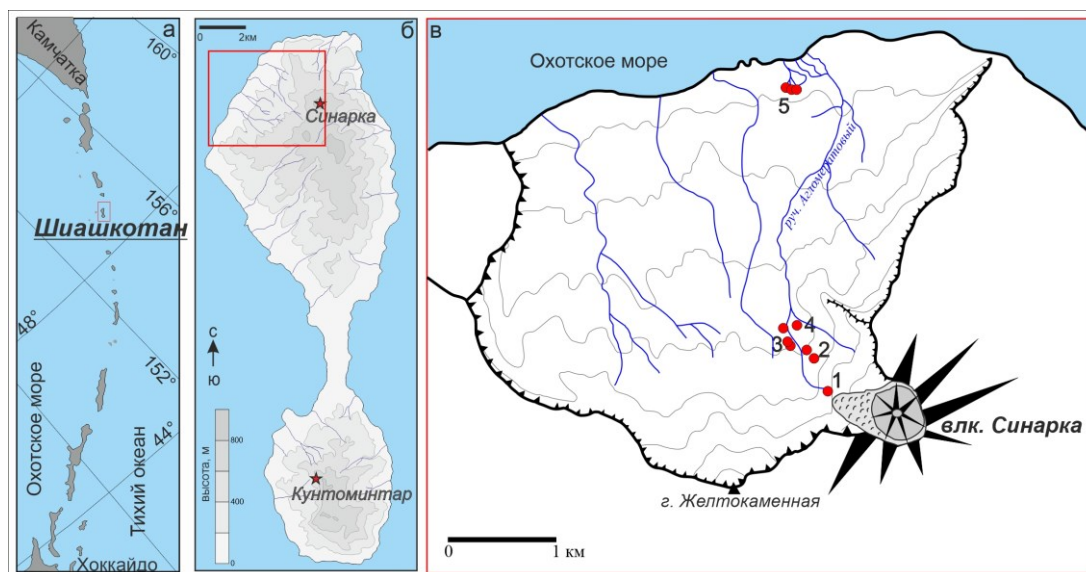


Рис. 1. Схема расположения термальных источников Центрального экструзивного купола вулкана Синарка. Номерами показаны термальные площадки.

Основная разгрузка кислых хлоридно-сульфатных вод сосредоточена на северо-западном склоне в эрозионной кальдере на нескольких площадках, расположенных на разном удалении от центрального экструзивного купола (ЦЭК) (рис. 1в). Все группы источников объединяются в единое термальное поле [4].

Всего здесь можно выделить пять обособленных основных площадок в диапазоне высот 380-500 м над уровнем моря. Термальные площадки 1-3 расположены по бортам истока руч. Агломератовый. Площадка 1 находится у подножия экструзивного купола на высоте 500 м над уровнем моря в полосе размером 20×50 м (рис. 2а). В 250-300 м к северо-востоку от нее на правом пологом борту промоины глубиной около 10 м расположена площадка 2 (рис. 2б). Ниже по течению, на левом крутом склоне руч. Агломератовый находится площадка 3 (рис. 2в).



Рис. 2. Термальные площадки ЦЭК: а) площадка 1; б) площадка 2, в) площадка 3, г) площадка 4, д) Общий вид на площадку 5.

Все эти термальные площадки покрыты плащами гидроокислов железа мощностью от 1 до 10 см. Сквозь небольшие проколы в плаще под напором вытекает вода, иногда образуя фонтанчики высотой до 10 см. Руслу формирующихся термальных ручейков покрыты термофильными водорослями ярко-зеленого цвета. Судя по площади распространения измененных пород и выцветов солей на площадках, можно предположить, что ранее выходов термальных вод было значительно больше. Температура вод, разгружающихся на данных площадках, составляет 37-52 °С, значения рН варьируют от 2.6 до 3.0, диапазон Eh составляет от +230 до +270 мВ.

Площадка 4 расположена в распадке, берущем начало у подножия экструзивного купола, выжатого несколько севернее ЦЭК (рис. 2г), вблизи устья безымянного ручья. Здесь находятся 2 отдельных источника, сток с которых формирует единый ручей общим дебитом ~2 л/с. Разгрузка термальных вод на поверхности сопровождается интенсивным осаждением сульфурита. Температура наиболее горячего источника составляет 46.4 °С, рН=2.45, минерализация 3.1 г/л.

Поступление воды с термальных площадок в холодный пресный исток руч. Агломератовый увеличивает его расход в 3 раза и обогащает его минеральными компонентами. На более низких отметках ручей принимает еще нескольких притоков, сформированных выходами минерализованных (до 1.5 г/л) кислых (рН=3.5) относительно холодных (Т=10-12 °С) вод.

Термальная площадка 5 находится на значительном расстоянии от основной зоны разгрузки, в 300 м к юго-западу от основного русла руч. Агломератовый, в приустьевой зоне. На расстоянии 200-250 м от берега Охотского моря на высоте 22-25 м находятся 10 источников, сток с которых образует 3 ручья, сливающиеся в единый поток (рис. 2д), впадающий в море. Температура воды в источниках достаточно низкая (14-16 °С), рН=2.9, минерализация достигает 2.4 г/л.

Химический состав вод

Макрокомпоненты. Отдельные результаты химических анализов водных проб термальных площадок ЦЭК вулкана Синарка представлены в таблице.

Таблица. Химический состав кислых термальных вод вулкана Синарка, мг/л

Место отбора	Т, °С	рН _{лаб}	F ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	Fe _{общ}	Mn	B	SiO ₂	М, г/л
Пл1	44.2	2.87	0.79	2247	1512	368	23.4	419	413	19.5	187	32.9	7.56	196	5.43
Пл2	34.6	2.79	0.41	1299	2103	240	12.0	458	263	108	66.0	18.8	5.61	195	4.77
Пл3	42.1	2.82	0.50	2071	1597	369	24.0	485	420	5.6	179	34.3	6.64	185	5.38
Пл4	46.4	2.45	1.16	527	1716	171	13.5	258	124	58.4	1.82	9.34	5.90	172	3.06
Пл5	14.5	2.99	2.61	219	1193	107	6.58	468	89	41.3	14.7	2.84	2.67	97.0	2.24

Все разгружающиеся на термальных площадках 1-5 воды имеют кислую реакцию (рН<3), достаточно высокую минерализацию (до 5.4 г/л). Исследуемые воды относятся к Cl-SO₄-типу с низким содержанием фтор-ионов. На треугольной диаграмме анионного состава (рис. 3а) все точки вытянуты вдоль Cl-SO₄ линии, попадая в область

распространения «смешанных вод» [6]. Самое высокое SO_4/Cl отношение наблюдается в водах источников площадок 4 и 5, самое низкое – в выходах площадок 1 и 3 (рис. 3б).

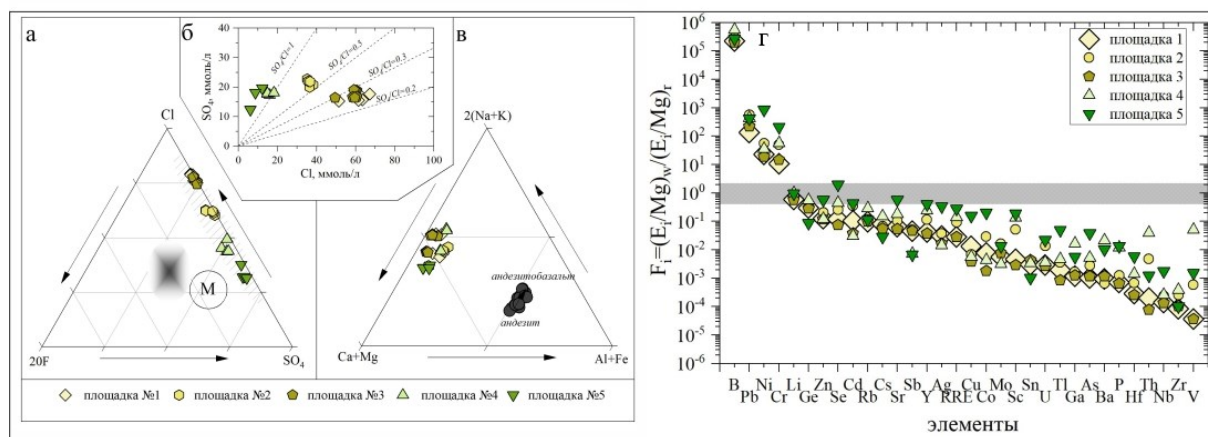


Рис. 3. Химический состав кислых вод ЦЭК вулкана Синарка: а) анионы; б) отношение SO_4/Cl ; в) катионы; г) микроэлементы.

Соотношение катионов во всех источниках близкое. Точки на графике (рис. 3в) концентрируются вблизи оси $Na+K/Ca+Mg$ с отношением близким к породному. Однако в водах наблюдаются низкие значения Al и Fe , что связано с пограничным pH , при котором происходит осаждение вторичных минералов, содержащих эти элементы. Проведенное геохимическое моделирование состояния насыщения вод по отношению к наиболее распространенным для кислых условий минеральным фазам показало, что все исследуемые термальные источники при температуре отбора перенасыщены по отношению к различным модификациям кремнезема (кварц, халцедон, кристобалит и др.) и близки к равновесию с баритом. По отношению к другим сульфатным минералам (ангидрит, целестин, гипс, эпсомит, алунит), окислам и гидроокислам алюминия и железа (диаспор, бемит, гиббсит, гетит и др.) наблюдается недосыщение.

Микроэлементы. Из группы сидерофильных элементов, помимо железа, концентрация которого позволяет отнести его к макрокомпонентам, в водах источников в небольших количествах обнаружены Ni , Co , Cu , Cr , Mo . Максимальные концентрации никеля, кобальта и меди в близких значениях (20-25 мкг/л) определены в источниках пятой площадки, тогда как на других участках их значения в среднем не превышают 2-4 мкг/л. Среди определенных халькофильных элементов в исследуемых водах максимальные концентрации характерны для Zn (0.27-0.29 мг/л). Содержания других элементов этой группы (As , Pb , Cd , Tl , Sn , Sb) в термальных водах не превышают первого десятка мкг/л. Литофильные микроэлементы в малых концентрациях широко распространены в исследуемых источниках. Содержания Li , Rb , Sc , Ti , Ba не превышают 100 мкг/л, среднее количество Cs , Ga , Ge , Be , Zr составляет 1-30 мкг/л.

Для сравнения редких элементов в водных пробах, полученных на разных площадках, использованы «обогащенные» коэффициенты переноса элементов, нормированные по магнию как наименее подвижному элементу в кислых условиях. Распределение элементов показано в соответствии с убыванием значений в термальных водах площадки 1 (рис. 3г). Хорошо видно, что точки вод площадок 2 и 3 имеют схожее распределение, тогда как для двух других площадок наблюдается больший разброс. В целом, для всех образцов характерен общий нисходящий тренд. Выше единицы находятся только бор и свинец, легко переносимые парогазовой смесью, а также никель и хром. Обращает на себя внимание отсутствие характерного для ультракислых вод горизонтального расположения каких-либо элементов на линии конгруэнтного растворения породы ($F_i = 1$). Практически без перегиба ветвь снижается, что также может быть связано с попутным осаждением редких и рассеянных элементов с железосодержащими минералами, преимущественно окислами и гидроокислами.

Заключение

Кислые вулканические воды вулкана Синарка, разгружающиеся на разном удалении от его ЦЭЖ, представляют собой разгрузку единого горизонта ультракислых вод, формирующихся за счет поглощения магматических газов подземными водами близповерхностной циркуляции. Доля магматической компоненты для этих вод не превышает 20 % [3]. Термальные источники имеют близкие значения pH, температуры и минерализации, но различаются по отношению SO_4/Cl , содержанию Al и Fe и микроэлементному составу. Основные различия в геохимии вод связаны с различной скоростью и объемами осаждения вторичных минеральных фаз при выходе подземных вод на поверхность. Термальные воды, разгружающиеся на пятой площадке, имеют наиболее продолжительный фильтрационный путь. За счет смешения с холодными грунтовыми водами происходит снижение температуры и минерализации, дополнительное взаимодействие с гидротермально-измененными породами, слагающими кальдеру, приводит к трансформации химического состава воды.

Список литературы

1. Горшков Г.С. Вулканизм Курильской островной дуги. М.: Наука, 1967. 287 с.
2. Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Котенко Л.В., Волошина Е.В. Геохимия термальных вод и фумарольных газов о. Шиашкотан (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 1-15.
3. Калачева Е.Г., Таран Ю.А. Процессы, контролирующие изотопный состав ($\delta^{18}O$ и δD) термальных вод Курильской островной дуги // Вулканология и сейсмология. 2019. № 4. С. 3-17. <https://doi.org/10.31857/S0203-0306201943-17>
4. Мархинин Е.К., Стратула Д.С. Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.
5. Kalacheva E., Taran Y., Kotenko T. Geochemistry and solute fluxes of volcano-hydrothermal systems of Shiashkotan, Kuril Islands // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2015. V. 296. P. 40-54. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2015.03.010>
6. Taran Y., Kalacheva E. Acid sulfate-chloride volcanic waters; Formation and potential for monitoring of volcanic activity // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2020. V. 405. Art. 107036. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107036>

Минералого-геохимическая характеристика эпитермального Au-Ag рудообразования в тыловой зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса

Колова Е.Е.

Mineralogical and geochemical characteristics of epithermal Au-Ag ore formation in the rear zone of the Okhotsk-Chukotka volcanogenic belt

Kolova E.E.

Северо-Восточный комплексный научно-исследовательский институт ДВО РАН,
г. Магадан;

e-mail: kolova@neisri.ru

Au-Ag месторождение Печальное сформировалось в два этапа в пределах тыловодужного рифта Охотско-Чукотского вулканогенного пояса. Основная минеральная рудная ассоциация представлена серебро-селенидным типом, которая, согласно фазовым равновесиям Ag_2S - Ag_2Se , образовалась при температурах 178-87 °С.

Золото-серебряное эпитермальное месторождение Печальное, открытое в 1984 г., по своему расположению, геологическому строению и структуре рудного поля контрастно отличается от известных на СВ России объектов этого типа: 1) локализуется в тыловой зоне Охотско-Чукотского вулканогенного пояса (ОЧВП) на удалении более чем 200 км от его осевой части, в крайней северо-восточной зоне Балыгычанского поднятия; 2) рудное поле, площадь которого составляет порядка 5 км², приурочено к экструзивно-купольному поднятию (Майская вулканоструктура), являющемуся частью проявления локального вулканического ареала площадью около 100 км², известного как печальнинский трахибазальт-трахириолитовый комплекс кампанского возраста [3], состоящий из вулканогенно-терригенных, субвулканических и жерловых образований; 3) расположено в экзоконтакте Верхне-Оротуканского массива, сложенного лейкократовыми гранитами Омсукчанского комплекса, возраст которого принят 87-81 млн лет [3]; 4) в рудном поле выявлено 45 жильных тел и кварцевое тело, залегающее согласно с подошвой конгломератовой пачки печальнинского комплекса; 5) жильные тела имеют плитообразную форму (падение 50-75°), мощность от 0.1 до 3 м, одна жила 6.2 м, протяженность 200-300 м, простираение преимущественно субширотное, группируются в три жильно-прожилковые зоны, образующие линзовидные кулисы мощностью до 300 м и протяженностью 1.2-4.1 км; субгоризонтальное кварцевое тело имеет площадь 1.3 км², мощность от 0.5 до 6.8 м; 6) состав рудных тел кварц-адуляровый, кварцевый, кварц-карбонатный, иногда кварц-флюоритовый, количество рудной минерализации не более 3 %; 7) рудные тела локализируются в нижнеюрских ороговикованных терригенных породах, концентрируясь вокруг экструзии трахириолитов печальнинского комплекса, но при этом не проникая ни в нее, ни в покровы базальтов; 8) трахириолиты повсеместно сильно пропилитизированы, вблизи от жил развиты кварц-серицит-гидрослюдистые, кварц-адуляровые, монокварцевые метасоматиты и аргиллизиты; 9) отношение Au:Ag – 1:40-1:60.

Исследованиями 2023 г. была охвачена центральная часть рудного поля, отобраны образцы руд из полотна поверхностных горных выработок и керн колонковых скважин.

По содержанию химических элементов (спектральный анализ, ЦКП СВКНИИ ДВО РАН, n=46) наши образцы делятся на четыре группы: (1) Au 18.3 г/т, Ag 20 г/т, Ge 7 г/т; (2) Zn до 325 г/т, Pb до 244 г/т, As до $4.6 \cdot 10^3$ г/т; (3) As до $21 \cdot 10^3$ г/т, Sb до 375 г/т, Ag до 20 г/т, Ni до 66 г/т, Co до 222 г/т; (4) Bi до 94 г/т, As до $4.9 \cdot 10^3$ г/т, Ni до 76 г/т, Co до 211 г/т, Zn до 170 г/т, W до 15 г/т. Полученные геохимические данные согласуются с ранее использованными для оценки рудного потенциала методами неиерархической классификации и горизонтальных сечений [2].

Каждая выделенная группа имеет текстурно-структурные и минералогическо-геохимические особенности. Текстуры образцов первой группы колломорфно-полосчатые, каркасно-пластинчатые, гребенчатые, кокардовые, брекчиевые, иногда массивные (рис. 1а-г). Полосчатость обусловлена чередованием белого с оттенками розового и оранжевого цветов, скрытокристаллического, мелкозернистого и халцедоновидного кварца, адуляра (рис. 1б) и гнездово-вкрапленной рудной минерализацией. Мощность прослоев с рудной минерализацией не превышает 0.5 см. (рис. 1а). Количество рудной минерализации 1 %, редко до 3 %. Образцы второй группы имеют прожилковую, массивную, кавернозную текстуры (рис. 1д). Прожилки сложены среднезернистым, иногда сахаровидным кварцем. Границы прожилков извилистые. Рудная минерализация гнездово-вкрапленная, размещается преимущественно в тонких, ветвящихся прожилках, сопровождающих более мощные (рис. 1д), ее количество не превышает 3 %. Образцы третьей и четвертой групп характеризуются прожилковой, массивной и брекчиевой текстурами (рис. 1е-з). Прожилки имеют ровные, рвущие контакты. Сложены серым, белым, полупрозрачным кварцем мелкозернистой до скрытокристаллической структуры. Брекчии сложены сульфидно-кварцевыми агрегациями, сцементированными серым, скрытокристаллическим кварцем (рис. 1з). Количество рудной минерализации в таких образцах достигает 40 %.

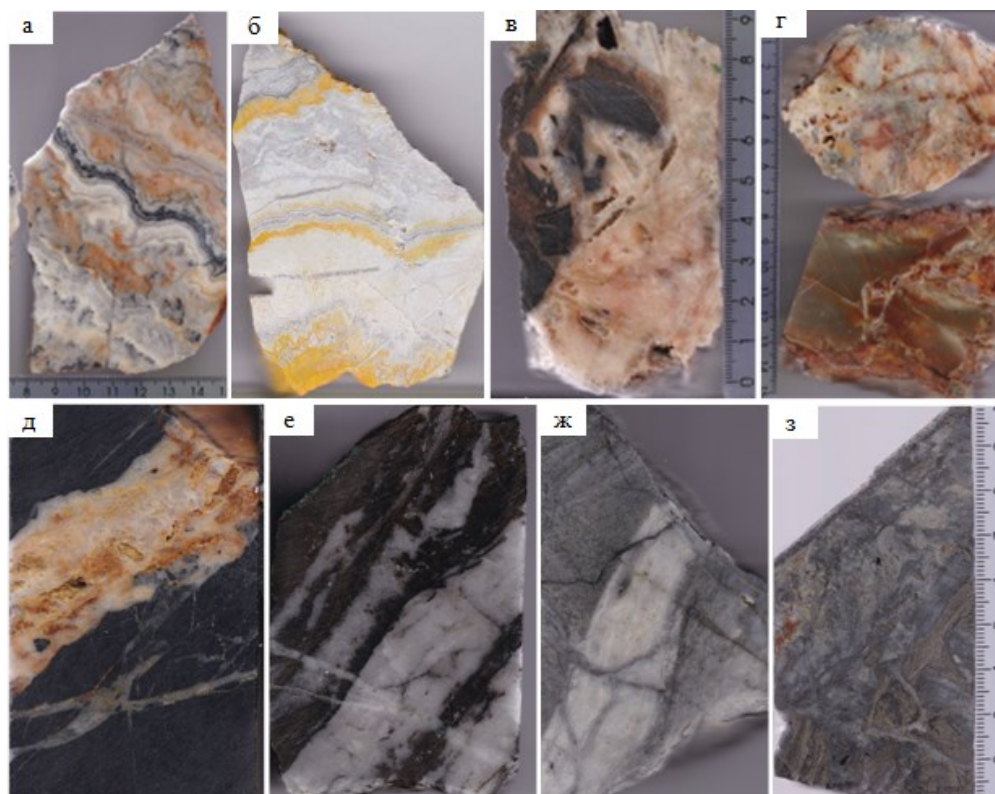


Рис. 1. Текстуры руд месторождения Печальное: а-б – колломорфно-полосчатая (б – реакционная окраска на выявление К-содержащих минералов); в – каркасно-пластинчатая в агрегации с брекчиевой; г – массивная в агрегации с кавернозной (верхний образец кварц-флюоритовая жила, нижний – халцедоновый прожилок); д-ж – прожилковая; з – брекчиевая.

Рудная минерализация распределена преимущественно неравномерно, формирует облачные скопления. Размер минеральных зерен до 250 мкм, в среднем 50-100 мкм.

В образцах первой группы преобладают минералы ряда акантит-науманнит. Из массива полученных микрорентгеноспектральных данных (n=247 определений) 17 % отвечают составу акантита; 14 % – акантита с примесью Se до 5 вес. %; 66 % – близки агвилариту, с вариацией Se от 5 до 16.8 вес. %; 3 % – науманнита с примесью S от 1.9 до 2.5 вес. % (рис. 2а). Селен образует в зернах наибольшие скопления в центральных и

краевых частях. Второй по распространенности минеральный ряд штернбергит-аргентопирит. Вариации Ag от 33.6 до 54.3 вес. %, единичные случаи наличия Cu до 4.4 вес. % и Se до 3.2 вес. %. Часто наблюдается минералы из группы полибазита-пирсеита с вариациями Se от 0.78 до 7.3 вес. %, Sb от 1.9 до 10.1 вес. %, As до 3.7 вес. %, в крайних значениях соответствуя биллингслеиту и селенополибазиту. Следующим по распространенности минеральным рядом в образцах первой группы является канфильдит-аргиродит, преимущественно соответствуя аргиродиту и имея постоянную примесь Se до 5.7 вес. % и Fe до 1.9 вес. %. В парагенезисе с перечисленными минералами, образуя тесные сростания, присутствует Au-Ag твердый раствор – 87 % всех анализов соответствует кюстелиту, 12 % электруму (рис. 2б). Редко, но диагностируется ютенбогартит. В его составе вариации Au от 30.2 до 41.9 вес. %, в единичных случаях присутствует Se до 3.6 вес. %. Из сульфидов в этих образцах имеется пирит, обладающий постоянной примесью Zn до 1.36 вес. %, сфалерит с примесью Fe до 8.5 вес. % и арсенопирит с примесью Sb до 1.5 вес. %.

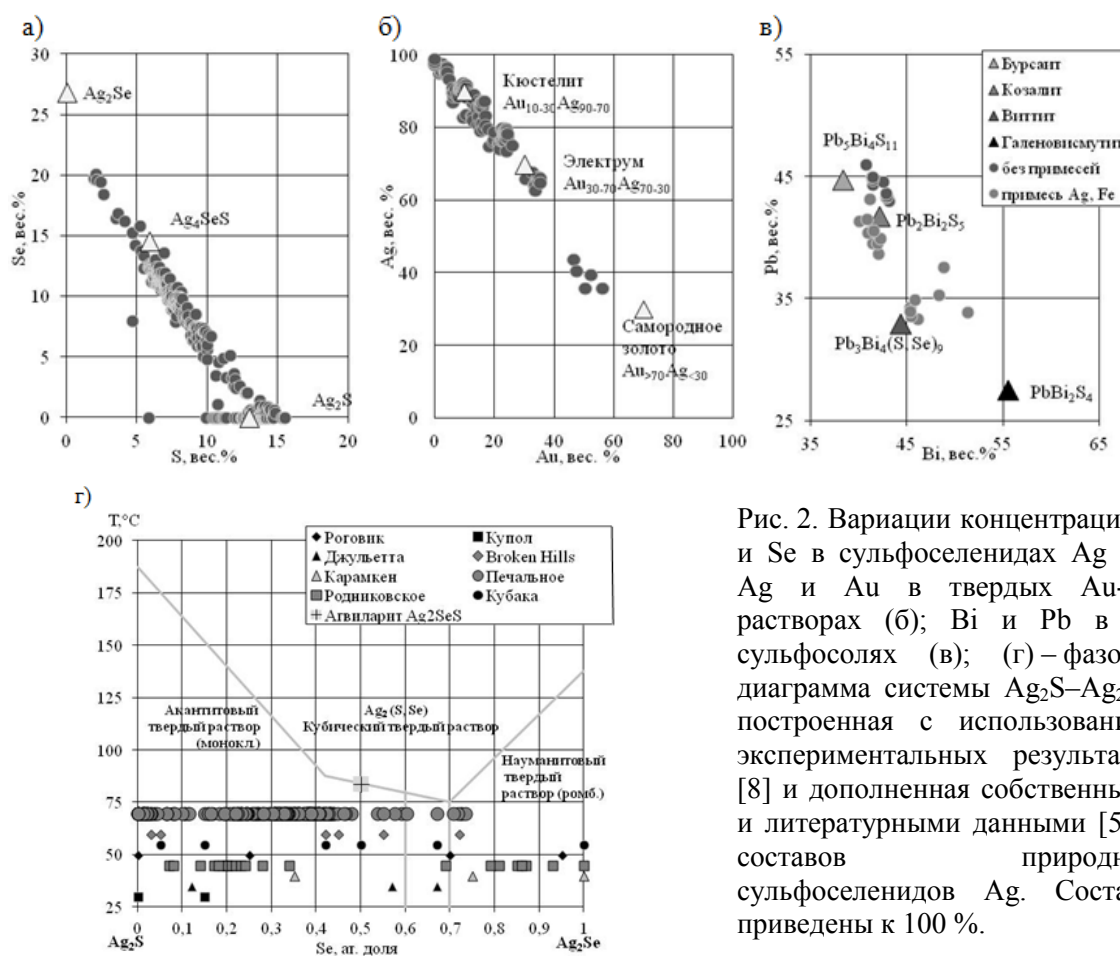


Рис. 2. Вариации концентраций S и Se в сульфоселенидах Ag (а); Ag и Au в твердых Au-Ag растворах (б); Bi и Pb в их сульфосолях (в); (г) – фазовая диаграмма системы Ag_2S – Ag_2Se , построенная с использованием экспериментальных результатов [8] и дополненная собственными и литературными данными [5, 6] составов природных сульфоселенидов Ag. Составы приведены к 100 %.

В образцах второй-четвертой групп минеральный состав схож. Наиболее распространенный минерал – пирит. Преимущественно он образует фрамбоидальные, скелетные агрегаты, зачастую зональной структуры. Его скопления имеют струйчатые, «кружаччатые» формы. Редко встречается идиоморфный пирит, но он катаклазирован. В составе пирита присутствуют примеси As до 2 вес. %, Sb до 0.4 вес. %, редко Cu до 2.4 вес. %. Второй по распространенности минерал – арсенопирит. Обычно формирует крупные идиоморфные кристаллы, краевые зоны которых кавернозные, каверны иногда заполнены сульфидами Ag. Имеются агрегаты арсенопирита скелетных форм. Арсенопирит часто катаклазирован. В составе арсенопирита в 80 % случаев установлены примеси Sb до 2.7 вес. %, Co до 3.1 вес. % и Ni до 2.7 вес. %. Состав арсенопирита эволюционирует до глаукодота, в котором количество Co варьирует от

6.3 до 14.9 вес. %, Ni от 1.1 до 4.7 вес. %. В парагенезисе с пиритом редко встречается халькопирит. Он имеет стехиометричный состав. В образцах с повышенным Bi микрорентгеноспектральным анализом установлены сульфосоли Bi и Pb, сульфотеллуриды, висмутин и висмут самородный. По соотношениям Bi и Pb в сульфосолях их составы близки преимущественно к козалиту, реже к виттиту (рис. 2в). 70 % изученных их агрегатов содержат примеси Fe до 0.8 вес. % и Ag до 7.1 вес. %. Сульфотеллуриды имеют вариации Te от 6.6 до 14.3 вес. % и примесь Pb до 6.1 вес. %, что позволяет их отнести к баксаниту и сульфожозеиту.

Проведенные исследования дают возможность сделать вывод о том, что в рудном поле месторождения Печальное проявлено два этапа рудообразования – высокотемпературный и низкотемпературный. Первый этап имеет As-Bi-Te-Co-Ni-W-Pb-Zn геохимическую специализацию, второй – Ag-Au-Se. Минералы первого этапа характерны для высокотемпературных скарновых и полиметаллических месторождений, связанных со становлением гранитных массивов. В данном случае, генератором рудообразования мог выступать Верхне-Оротуканский массив, в экзоконтакте которого находится рудное поле. Температуры формирования руд второго этапа в соответствии с фазовыми равновесиями псевдобинарной системы Ag_2S - Ag_2Se [8] оцениваются в 178-87 °C (рис. 2г). Наличие широкого спектра минеральных рядов с вариациями Ag, S, Se, Au, Fe, Sb, Ge, Sn свидетельствуют о скоротечности и низкоградиентности процесса рудообразования. Второй этап по минералогическим параметрам отвечает рудообразованию, связанному с вулканогенным процессом. Полученные результаты напрямую согласуются с выводами геохимических исследований [2] о наличии двух типов оруденения – сильно эродированного высокотемпературного Au-кварцевого и наложенного на него и также сильно эродированного низкотемпературного Au-Ag.

По минеральному составу, значительному распространению Se-содержащих минералов и вариаций S и Se в них (рис. 2г), которые являются прямым следствием их фугитивности в гидротермальном процессе, руды второго этапа месторождения Печальное проявляют схожесть со многими Au-Ag эпитермальными месторождениями СВ России [5, 6] и Пацифики [7]. По структуре рудного поля и минеральному составу руд наиболее близкий аналог месторождению Печальное является месторождение Аметистовое [1, 4]. Имея сходные черты с промышленно значимыми рудными объектами, месторождение Печальное, тем не менее, является непромышленным объектом с прогнозными ресурсами Au 3-4 т, Ag 150 т [3].

Список литературы

1. Бортников Н.С., Толстых Н.Д. Эпитермальные месторождения Камчатки // Геология рудных месторождений. 2023. Т. 65. № 7. С. 722-752.
2. Каменихин Н.Т. Геохимические способы определения ярусов оруденения на ранних стадиях исследования // Разведка и охрана недр. 2006. № 1. С. 39-45.
3. Кузнецов В.М., Жигалов С.В., Ведерникова Т.А., Шпикерман В.И. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Верхояно-Колымская. Лист Р-56 Сеймчан. Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2008. 426 с.
4. Некрасов И.Я. Вулкано-купольная структура Аметистового месторождения и зональность золото-серебряного оруденения // Доклады РАН. 1996. Т. 347. № 4. С. 509-511.
5. Пальянова Г.А., Кравцова Р.Г., Журавкова Т.В. Твердые растворы $Ag_2(S, Se)$ в рудах золото-серебряного месторождения Роговик (Северо-Восток России) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56. № 12. С. 2198-2211.
6. Савва Н.Е. Минералогия серебра Северо-Востока России / Науч. ред. А.А. Сидоров. М.: Триумф, 2018. 544 с.
7. Cocker H.A., Mauk J.L., Rabone S.D.C. The origin of Ag-Au-S-Se minerals in adularia-sericite epithermal deposits: constraints from the Broken Hills deposit, Hauraki Goldfield, New Zealand // Mineralium Deposita. 2013. V. 48. P. 249-266.
8. Pingitore N.E., Ponce B.F., Estrada L. et. al. Calorimetric analysis of the system Ag_2S - Ag_2Se between 25 and 250°C // Journal of Materials Research. 1993. V. 8. P. 3126-3130.

Вулканогенно-гидротермальный генезис железо-марганцевого месторождения Поперечное (Малохинганский рудный район, Дальний Восток России)

Коновалова Н.С., Бердников Н.В., Кеpezжинская П.К.

Volcanic-hydrothermal origin of Fe-Mn deposit Poperechny (the Lesser Khingan Range, Russian Far East)

Konovalova N.S., Berdnikov N.V., Kepezhinskaya P.K.

Институт тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН, г. Хабаровск;

e-mail: turtle_83@mail.ru

Железо-марганцевые месторождения в разновозрастных орогенных поясах содержат существенную часть ресурсов этих металлов. Часто они генетически связаны с эксплозивным вулканизмом и содержат продукты вулканической деятельности. На примере месторождения Поперечное обсуждаются процессы образования Fe-Mn минерализации Малохинганского рудного района.

Введение

Железо-марганцевые месторождения в разновозрастных орогенных поясах содержат существенную часть ресурсов этих важных для промышленности металлов. Их генетические типы включают железно-окисные-медь-золото (IOCG), железно-окисно-апатитовые (IOA, Kiruna-type), вулканогенные (Cuban-type), осадочно-гидротермальные (BIF-type), гидротермально-магматические и скарновые месторождения кор выветривания, а также многочисленные подтипы Fe-Mn минерализации [1]. Многие «орогенные» железо-марганцевые месторождения и металлогенические пояса генетически связаны с эксплозивным вулканизмом и содержат продукты вулканической деятельности. В данной работе на примере месторождения Поперечное обсуждаются процессы образования железо-марганцевой минерализации Малохинганского рудного района (Еврейская автономная область, Дальний Восток России).

Геологическое строение

Малохинганский рудный район локализован на западной окраине Цзямусы-Буреинско-Ханкайского супертеррейна, расположенного на юго-восточном окончании Центрально-Азиатского орогенного пояса. Входящее в его состав железо-марганцевое месторождение Поперечное, наряду с более 30 сходными месторождениями и проявлениями района, традиционно считалось осадочным (вулканогенно-осадочным) вследствие «стратиформного» облика рудных тел и их тесной ассоциации с вмещающими позднепротерозойскими карбонатами [6]. Альтернативная точка зрения на генезис месторождения предполагает гидротермальный (с водородным компонентом) генезис его минерализации [5]. Обнаружение среди пород месторождения эксплозивных брекчий (флюидолитов) андезитового состава, игнимбритов, туфов и «магнетитовых лав» с фенокристами магнетита в гидротермально измененном магматическом матриксе свидетельствует в пользу участия в его формировании вулканических процессов.

Типичные гидротермальные руды месторождения прорываются эксплозивными брекчиями, в ряде случаев наблюдается тонкое переслаивание руд, брекчий и литокристаллокластических туфов, обогащение рудных масс эксплозивным обломочным материалом (рис. 1). С другой стороны, многие образцы эксплозивных пород интенсивно ожелезнены, по ним развиваются гидротермальные магнетит-гематитовые руды. Эти наблюдения свидетельствуют в пользу того, что внедрение эксплозивного материала сопровождало гидротермальное рудообразование практически на всех его этапах. Присутствие среди пород месторождений магнетитовых лав, сходных с магнетитовыми потоками Эль Лако (El Laco) на севере Чили [10] указывает на непосредственное участие железистых расплавов в образовании

Fe-Mn руд месторождения, т.е. позволяют определить их генезис как вулканогенно-гидротермальный.



Рис. 1. Переслаивание гидротермальных руд, взрывных брекчий и туфов на месторождении Поперечное.

Эксплозивные брекчии Поперечного обладают «субдукционными» геохимическими характеристиками: обогащены крупноионными литофильными и легкими редкоземельными элементами, обеднены высокозарядными некогерентными элементами [3]. Пирокластика и магнетитовые лавы изученных месторождений образуют сильно дифференцированный обогащенный калием вулканический комплекс, сходный с дифференцированными высоко-калиевыми известково-щелочными магмами зрелых Циркум-Тихоокеанских островных дуг и активных континентальных окраин [2].

В рудах и ассоциирующих с ними брекчиях найдены минералы платиновой группы и золото. Зерна платины из флюидолитов и руд месторождения имеют возраст 125 ± 21 Ма [4], который значительно моложе позднепротерозойского возраста вмещающих карбонатных толщ, что исключает формирование рудно-магматического комплекса совместно с карбонатами.

Nd-Sr изотопные исследования показывают, что эксплозивные брекчии и Fe-Mn руды месторождения Поперечное интенсивно контаминированы компонентами как древней, так и вновь образованной континентальной коры. Вариации $\delta^{13}\text{C}$ в породах месторождения сходны с таковыми у биогенного углерода, что, по-видимому, является следствием рециклинга биогенного углерода в зоне палеосубдукции на границе Азиатского континента [5].

Обсуждение результатов

На основании приведенных материалов предлагается следующая модель образования Fe-Mn минерализации в Малохинганском рудном районе (рис. 2). Мы полагаем, что первоисточником железной и железо-марганцевой минерализации месторождения Поперечное в частности, и Малохинганского рудного района в целом, явились обогащенные Fe и Mn морские осадки (железо-марганцевые руды склонов подводных гор, илы и конкреции), преобразованные в результате полистадийной субдукции.

В.В. Голозубов и А.И. Ханчук [8] показали, что во время поздней юры – раннего мела плита Изанаги испытывала пологую субдукцию под Цзямусы-Буреинско-Ханкайский супертеррейн (рис. 2а). Пологая субдукция сопровождалась формированием компрессионных структур и аккреционных комплексов, в состав которых входили породы осадочного слоя, обогащенные железом и марганцем.

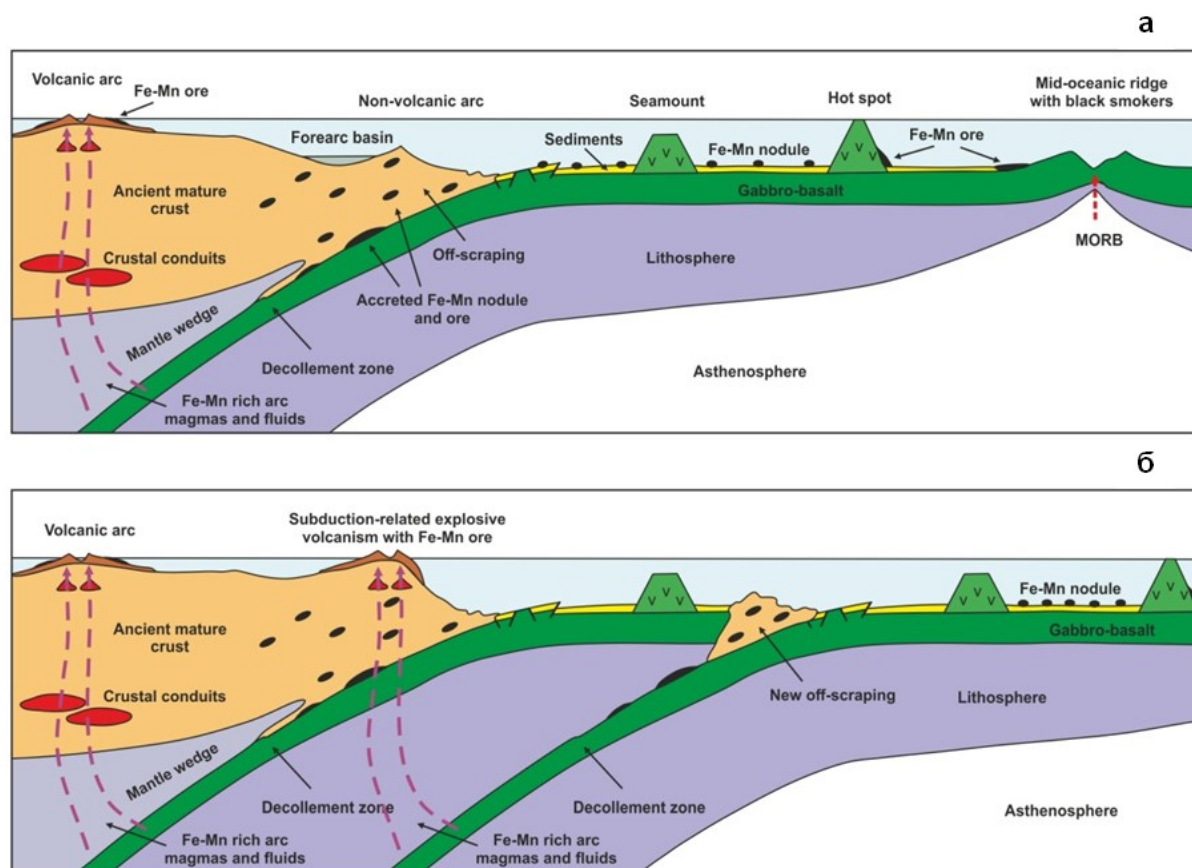


Рис. 2. Модель формирования Fe-Mn минерализации Малохинганского рудного района на тихоокеанской конвергентной окраине (на основе [9]). Стадии минерализации: а – позднеюрско-раннемеловая, б – конец раннего Мела.

В конце раннего мела в результате стагнации плиты глубоководный желоб сместился к востоку (рис. 2б) [7]. Дегазация и частичное плавление нового слэба инициировали восходящий поток насыщенных (за счет металлоносных пелагических осадков) железом и марганцем флюидов и расплавов, которые получали дополнительное обогащение рудными компонентами в процессе движения сквозь сформировавшиеся ранее минерализованные структуры [11]. Не исключено, что их проникновению в зону оруденения в верхней коре дополнительно способствовало формирование в пологом слэбе разрывов типа «слэб-виндоу» [8].

Исследование осуществлено в рамках Госзадания ИТиГ ДВО РАН при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-17-00023 (<https://rscf.ru/project/22-17-00023/>) с использованием научного оборудования Хабаровского инновационно-аналитического центра ИТиГ ДВО РАН.

Список литературы

1. Рудные месторождения СССР / Под ред. В.И. Смирнова. М., 1974. 256 с.
2. Фролова Т.И., Бурикова И.А., Гуцин А.В. и др. Происхождение вулканических серий островных дуг. М.: Недра, 1985. 275 с.
3. Berdnikov N., Kepezhinskas P., Nevstruev V. et al. Magmatic-Hydrothermal Origin of Fe-Mn Deposits in the Lesser Khingan Range (Russian Far East): Petrographic, Mineralogical and Geochemical Evidence // Minerals. 2023. V. 13. Art. 1366. <https://doi.org/10.3390/min13111366>
4. Berdnikov N.V., Nevstruev V.G., Kepezhinskas P.K. et al. PGE mineralization in andesite explosive breccias associated with the Poperechny iron-manganese deposit (Lesser Khingan, Far East Russia): whole-rock geochemical, 190Pt-4He isotopic, and mineralogical evidence // Ore Geology Reviews. 2020. V. 118. Art. 103352.

5. *Berdnikov N.V., Nevstruev V.G., Saksin B.G.* Sources and formation conditions of ferromanganese mineralization of the Bureya and Khanka massifs, Russian Far East // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2016. V. 10. P. 263-273.
6. *Chebotarev M.V.* Geological structures of the South Khingan manganese deposit and essential composition of its ores // *International Geology Review*. 1960. V. 2. P. 851-866.
7. *Didenko A.N., Nosyrev M.Y.* Reflection of paleo- and modern geodynamic processes in the deep structure of the Sikhote-Alin orogenic belt // *Geologic Processes in the Lithospheric Plates Subduction, Collision, and Plate Environments. Proceedings of the IV Russian Scientific Conference with Foreign Participants, 17-23 September 2018. Vladivostok, Russia: FEGI, 2018. 326 p.*
8. *Golozubov V.V., Khanchuk A.I.* The Heilongjiang Complex as a Fragment of a Jurassic Accretionary Wedge in the Tectonic Windows of the Overlying Plate: A Flat Slab Subduction Model // *Russian Journal of Pacific Geology*. 2021. V. 15. № 4. P. 279-292. <https://doi.org/10.1134/S1819714021040047>
9. *Nakagawa M., Santosh M., Maruyama S.* Manganese formations in the accretionary belts of Japan: Implications for subduction-accretion process in an active convergent margin // *Journal of Asian Earth Sciences*. 2011. V. 42. P. 208-222.
10. *Tornos F., Hanchar J.M., Steele-MacInnis M. et al.* Formation of magnetite-(apatite) systems by crystallizing ultrabasic iron-rich melts and slag separation // *Mineralium Deposita*. 2024. V. 59. P. 189-225. <https://doi.org/10.1007/s00126-023-01203-w>
11. *Yan Sh., Niu Zh., Li N. et al.* Extremely low $\delta^{56}\text{Fe}$ in arc tholeiites linked to ferrocyanate recycling: implications for Fe enrichment in the Awulale Arc, Central Asia // *Geological Society of America Bulletin*. 2024. V. 136. № 1-2. P. 184-200. <https://doi.org/10.1130/B36729.1>

Изучение геотермальных месторождений южной части Камчатского полуострова

Котов А.Н., Гравиров В.В., Жостков Р.А., Пузич И.Н., Белобородов Д.Е.

Study of geothermal deposits in the southern part of the Kamchatka Peninsula

Kotov A.N., Gravirov V.V., Zhostkov R.A., Puzich I.N., Beloborodov D.E.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

e-mail: gravirov@mail.ru

Изучение и разведка Камчатских геотермальных месторождений сегодня является актуальной задачей. Сейчас геотермальные месторождения активно используются как источники электрической энергии и тепла. На Камчатке уже пробурено большое количество скважин для добычи термальных вод с целью их использования в хозяйственных и курортно-оздоровительных целях. Нами было проведено изучение Паужетской гидротермальной системы и Камбального вулканического хребта.

Введение

Изучение и разведка Камчатских геотермальных месторождений является весьма перспективной задачей. В настоящее время они обширно используются как источники электрической энергии, на близлежащих территориях построено и введено в эксплуатацию несколько геотермальных электростанций.

Также на территории южной части Камчатского полуострова пробурено большое количество скважин для добычи термальных вод в хозяйственных и курортно-оздоровительных целях [3].

Существует немало научных трудов, посвященных исследованию геотермальных месторождений на юге Камчатки различными геолого-геофизическими методами. Однако работ по сейсмическому зондированию гидротермальных систем проведено на данный момент крайне мало.

Проведение геофизических изысканий

На территории Камчатского полуострова были проведены геофизические изыскания с целью изучения строения подземных геотермальных месторождений, а также уточнения глубин их залегания. Основными объектами исследований являлись Паужетская гидротермальная система, а также южная группа геотермальных месторождений Камбального вулканического хребта (рис. 1).



Рис. 1. Спутниковый снимок долины реки Паужетка и Камбального вулканического хребта. Точками указаны места установки сейсмостанций.

На земной поверхности рассматриваемые подземные месторождения проявляются в виде грязевых котлов и пароводяных гейзеров [4] (рис. 2).



Рис. 2. Поверхностные проявления подземных геотермальных месторождений: слева – поверхностный бурлящий грязевой котел, справа – пароводяной гейзер.

Измерения проводились при помощи разработанного сотрудниками лаборатории № 703 ИФЗ РАН и компании «R-Sensors» специализированного автономного гео-гидроакустического измерительного буйа на базе молекулярно-электронного преобразователя [5] (рис. 3).



Рис. 3. Гео-гидроакустический измерительный буй на базе молекулярно-электронного преобразователя.

В основу проведения полевых сейсморазведочных работ лег метод микросейсмического зондирования (ММЗ), применяемый для выявления преимущественно вертикальных геологических неоднородностей до глубины около 30-35 км. Для реализации ММЗ требуется минимум два широкополосных сейсмометра. Один устанавливается на некотором удалении от места проведения работ и служит «базовой» станцией, работающей постоянно и используемой для устранения временных вариаций. Второй «передвижной» сейсмометр используется для получения данных на исследуемых пунктах [1, 2].

В первый день проведения полевых работ вместе с первой расстановкой была установлена первая опорная станция в самом начале Паужетского профиля, проработавшая в дальнейшем в течение 6 суток. На следующий день в конце профиля была установлена вторая опорная станция, осуществлявшая запись в течение всего полевого сезона. В каждом измерительном пикете станции закапывались в землю на всю высоту. Длительность записи в каждой точке составляла не менее 10 ч. Шаг приема составлял 200 м. При прохождении Верхне-Паужетского геотермального поля в целях детализации шаг приема был уменьшен до 100 м (рис. 4).

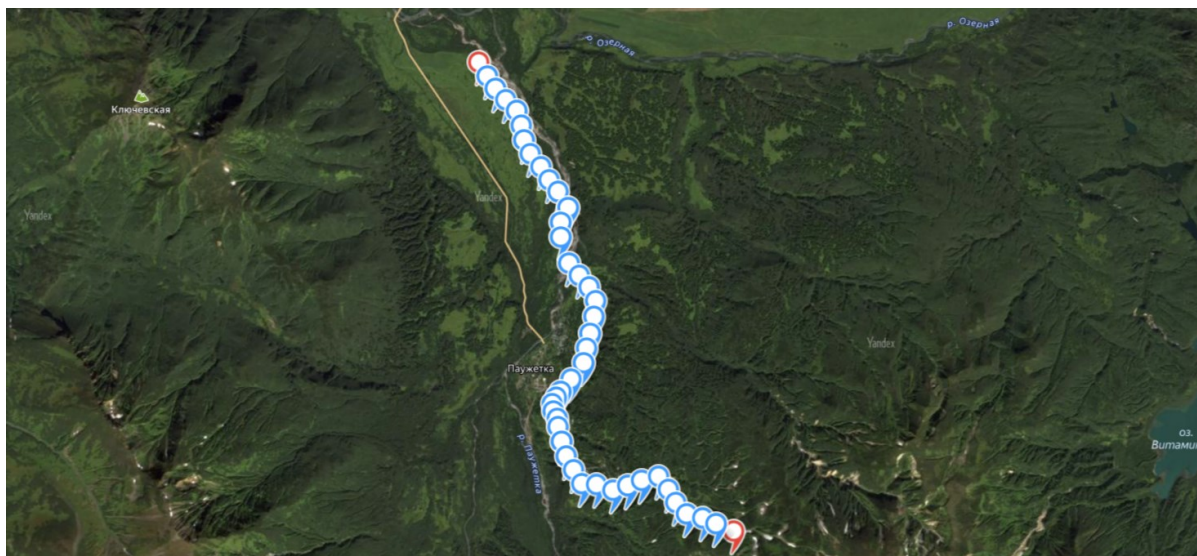


Рис. 4. Паужетский микросейсмический профиль; красным цветом отмечены положения опорных сейсмических станций.

На втором этапе проведения полевых работ, для «стыковки» Паужетского и Камбального микросейсмических профилей, была реализована серия из двух промежуточных расстановок с шагом приема в 600 м.

Третий и заключительный этап полевых работ заключался в проведении сейсморазведочных наблюдений на территории Южно-Камбальной группы термальных полей (ЮКБ т.п.). Шаг приема составлял 200 м, три последние точки профиля были разнесены между собой на 600 м (рис. 5).

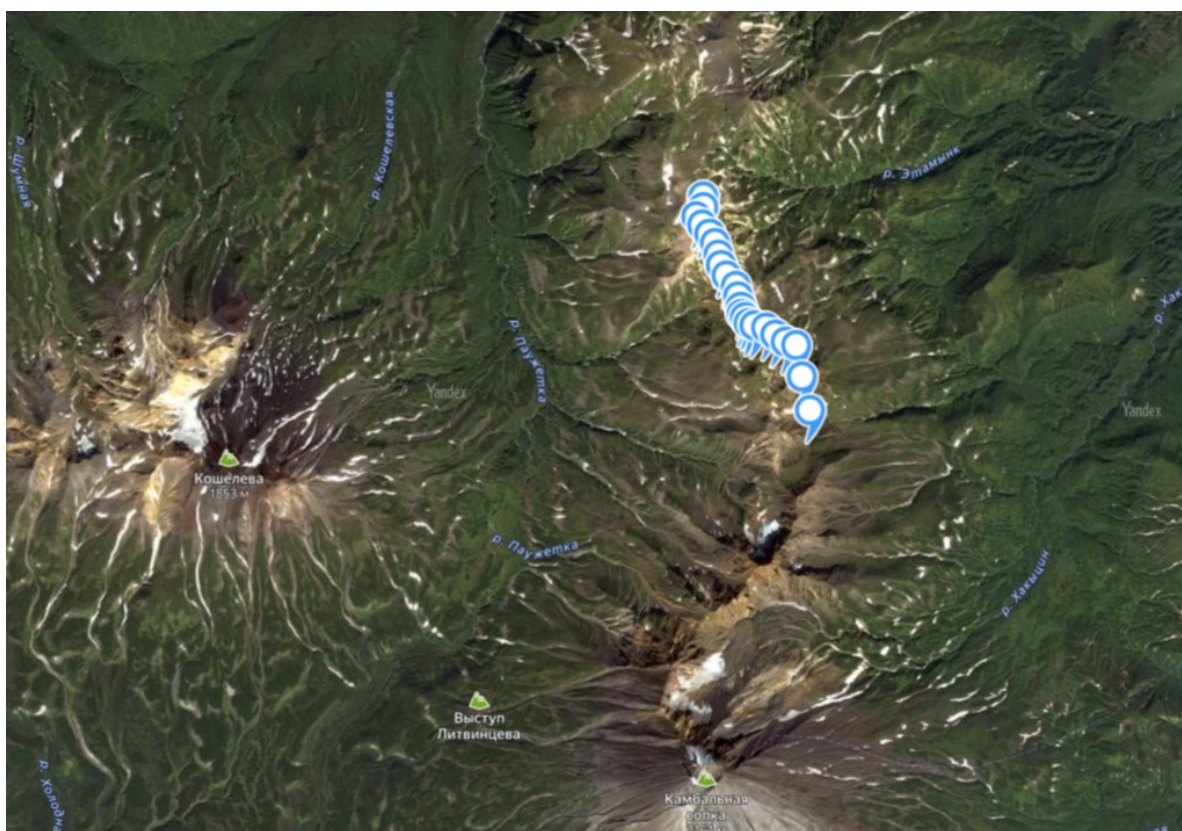


Рис. 5. Профиль ММ3 по Камбальной группе геотермальных месторождений.

По результатам проведенных работ был построен глубинный разрез по профилю ММ3 пос. Паужетка – влк. Камбальный (рис. 6).

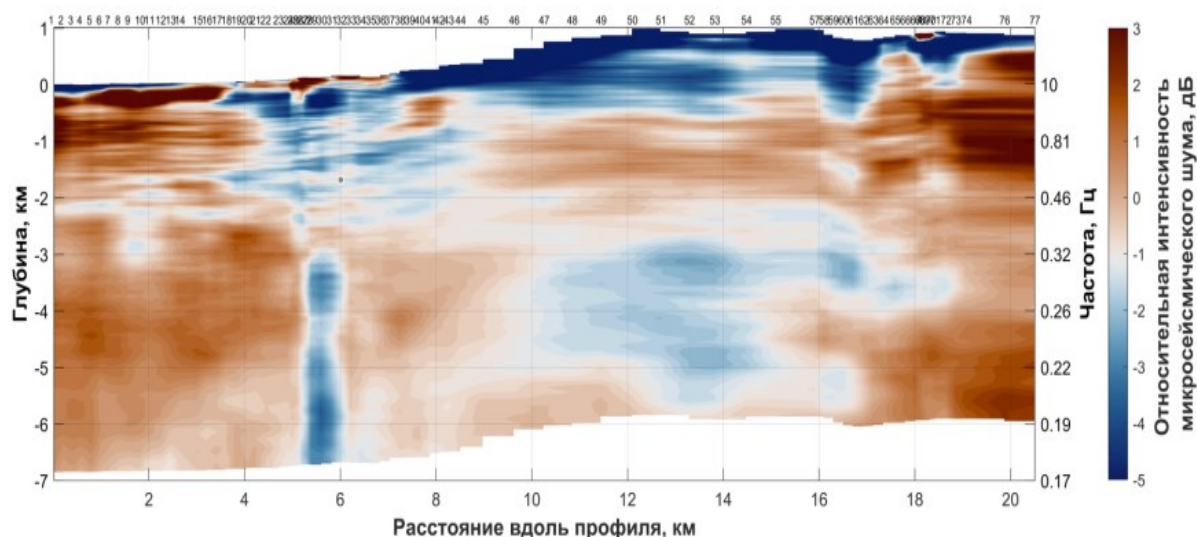


Рис. 6. Глубинный разрез по профилю ММЗ пос. Паужетка – влк. Камбальный.

На верхней горизонтальной оси отмечены номера измерительных точек. В приповерхностном слое, на глубинах приблизительно до 500 м, прослеживаются низкоскоростные контрастные аномалии, соответствующие поверхностным зонам разгрузки подземных гидротермальных флюидов.

Список литературы

1. Жостков Р.А., Преснов Д.А., Собисевич А.Л. Развитие метода микросейсмического зондирования // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2015. № 2. С. 11-19.
2. Котов А.Н., Агибалов А.О., Сенцов А.А. Низкочастотное шумовое загрязнение северо-восточной части пос. Мосрентген (г. Москва) // Геофизические приборы и биосфера. 2023. Т. 22. № 2. С. 109-121.
3. Нуждаев И.А., Рычагов С.Н., Феофилактов С.О., Денисов Д.К. Особенности магнитного поля геотермальных систем Паужетского района (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2023. № 2. С. 33-51.
4. Феофилактов С.О., Рычагов С.Н., Логинов В.А. и др. Глубинное строение района Паужетской гидротермальной системы (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 1. С. 40-56.
5. Sobisevich L., Agafonov V., Presnov D. et al. The Advanced Prototype of the Geohydroacoustic Ice Buoy // Sensors. 2020. V. 20. № 24. Art. 7213. DOI: 10.3390/s20247213

Малетойваямит $Au_3Te_6Se_4$ – вторая находка в мире на эпитермальном золоторудном месторождении Озерновское, Центральная Камчатка
Кудаева Ш.С.¹, Скильская Е.Д.¹, Козлов В.В.², Сергеева А.В.¹

Maletoyvayamite $Au_3Te_6Se_4$ – the second world finding in the Ozernovskoye epithermal deposit, Kamchatka

Kudaeva Sh.S., Skil'skaya E.D., Kozlov V.V., Sergeeva A.V.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*
e-mail: kudaeva.sharapat@gmail.com, wideworldscience@gmail.com

² *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва*

Приводятся сведения о первой находке редкого минерала селено-теллурида золота – малейтоваямита в рудах Au-Ag Озерновского месторождения. На основе изучения химического состава и минеральных ассоциаций обсуждаются условия кристаллизации малетойваямита и ассоциирующихся минералов селена в рудах Озерновского золоторудного месторождения.

В последние годы на золоторудных месторождениях северной и центральной Камчатки все чаще открывают новые минералы золота (толстыхит $Au_3S_4Te_6$, ауроселенид $AuSe$, гачингит $Au(Te_{1-x}Se_x)$, рудное поле Малетойваем, Северная Камчатка) и селена (светланаит $SnSe$, округинит Cu_2SnSe_3 , месторождение Озерновское, Центральная Камчатка), значительно расширяющие наши представления о минералогии этих месторождений [4-7]. Малетойваямит с идеализированной формулой $Au_3Se_4Te_6$ был впервые описан Н.Д. Толстых при изучении руд месторождений Малетойваемского рудного поля и утвержден в качестве нового минерала в 2020 г. [7]. В рудах Малетойваемского рудного поля малетойваямит формирует зерна 10-50 мкм, находящиеся в сростаниях с самородным золотом, калаверитом $AuTe_2$, твердыми растворами $AuSe-AuTe$, $Te-Se$, теннантитом, тетраэдритом, голдфилдитом и ватанабитом [7]. По данным [3], образование этого минерала в природе происходит при высокой активности селена и высоких fSe/fS отношениях.

Озерновское золоторудное месторождение расположено в пределах Северо-Камчатского рудного района в 700 км к северу от г. Петропавловск-Камчатский. Оно приурочено к Правоукинской вулcano-тектонической структуре длительного развития [1]. Месторождение относится к золото-серебряной формации золото-теллуридного промышленного типа. Руды месторождения отличаются широким развитием минералов группы блеклых руд, сложных сульфосолей типа Se-фрейбергита и селенидов [2, 5]. Новый селенотеллурид золота – малейтоваямит был обнаружен авторами в 2021 г. при изучении минералогии высокопробных руд участка БАМ Озерновского золоторудного месторождения.

В исследованных образцах малетойваямит относится к второстепенным минералам, однако встречается чаще остальных и обнаруживает тесную ассоциацию с твердыми растворами Se-Te ограниченной смесимости, вернее с самородным теллуром с устойчивыми соотношениями между элементами, близкими к $SeTe_2$ и $SeTe_5$. Обычно малетойваямит образует включения изометричной или вытянутой, пластинчатой формы, размером 20-40 мкм в твердом растворе Se-Te и продуктах его окисления – теллуриде (рисунок). Малетойваямит Озерновского месторождения имеет свои типоморфные особенности: во-первых, он включает примесь Ag до 2 вес. %; во-вторых, в нем не обнаружено примеси серы, в отличие от образцов из месторождений рудного поля Малетойваем [6, 7], где замещение селена серой существенно, вплоть до образования непрерывного ряда твердых растворов от малетойваямита до толстыхита (сернистого аналога малетойваямита). Отсутствие серы в составе малетойваямита указывает на пониженную активность серы рудообразующей среды Озерновской палеогидротермальной системы. Медианная формула малетойваямита Озерновского

месторождения рассчитана по 27 электронно-зондовым анализам – $Au_{2.51-3.00}Se_{3.65-4.43}Te_{5.78-6.66}$.

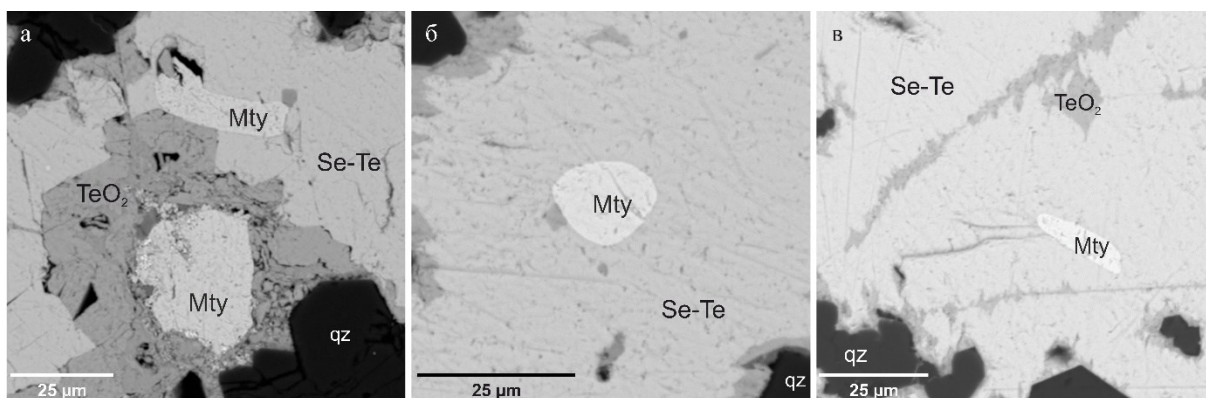


Рисунок. Формы выделения малтойваямита (Mty) в рудах Озерновского золоторудного месторождения: а – включение в теллуриде (TeO_2); б-в – включения в твердом растворе Se-Te. Изображения в обратно-рассеянных электронах.

При изучении минерального состава руд Озерновского месторождения был обнаружен уникальный селенотеллурид золота – малтойваямит. Это вторая находка малтойваямита в рудах месторождений Камчатки и Мира. Малтойваямит находится в тесной ассоциации с Se-Te твердым раствором и теллуридом. Присутствие серебра (до 2 вес. %) и отсутствие серы в химическом составе отличает малтойваямит Озерновского месторождения от малтойваямита из руд месторождений Малтойваямского рудного поля. Полное отсутствие в химическом составе малтойваямита серы служит признаком пониженной активности серы (fS_2) в рудоформирующей системе Озерновского месторождения. Находка малтойваямита на Озерновском месторождении позволяет рассматривать его с новых генетических позиций.

Список литературы

1. Демин А.Г. Озерновское месторождение как новый перспективный рудный объект Центральной Камчатки с комплексными рудами на золото, вольфрам, серебро и медь (своеобразие геологического строения, рудный потенциал и методика изучения) // Золото и технологии. 2015. № 1. С. 22-30.
2. Кудаева Ш.С., Скильская Е.Д., Козлов В.В. Новые данные о Se-Te минерализации в рудах Озерновского месторождения, Центральная Камчатка // Новое в познании процессов рудообразования. Материалы XII Российской молодежной научно-практической Школы, 27 ноября – 1 декабря 2023 г. Москва: ИГЕМ РАН, 2023. С. 111-112.
3. Hustor D.L., Sieb S.H., Suterb G.F. Selenium theoretical and its importance to the study of ore genesis: the basis and its application to volcanic-hosted massive sulfide deposits using pixeprobe analysis // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. 1995. V. 104. P. 476-480. [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(95\)00462-9](https://doi.org/10.1016/0168-583X(95)00462-9)
4. Kasatkin A.V., Nestola F., Plášil J. et al. Tolstykite, $Au_3S_4Te_6$, a new mineral from Maltoivayam deposit, Kamchatka peninsula, Russia // Mineralogical Magazine. 2023. V. 87. № 1. P. 34-39. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.109>
5. Okrugin V.M., Vymazalová A., Kozlov V.V. et al. Svetlanaite, $SnSe$, a new mineral from the Ozernovskoe deposit, Kamchatka peninsula, Russia. // Mineralogical Magazine. 2022. V. 86. № 2. P. 234-242. <https://doi.org/10.1180/mgm.2021.80>
6. Tolstyk N., Shapovalova M., Podlipsky M. Au-Ag-Se-Te-S Mineralization in the Maltoivayam High-Sulfidation Epithermal Deposit, Kamchatka Peninsula // Minerals. 2023. V. 13. № 3. P. 420. <https://doi.org/10.3390/min13030420>
7. Tolstyk N.D., Tuhý M., Vymazalová A. et al. Maltoivayamite, $Au_3Se_4Te_6$, a new mineral from Maltoivayam deposit, Kamchatka peninsula, Russia // Mineralogical Magazine. 2020. V. 84. № 1. P. 117-123. <https://doi.org/10.1180/mgm.2019.81>

Минералы возгонов термальных полей вулканического комплекса Большой Семячик и сольфатар пирокластического потока 2023 года вулкана Шивелуч (Камчатка)

Купчиненко А.Н.¹, Житова Е.С.¹, Шевелева Р.М.², Гирина О.А.¹, Пеков И.В.³, Кузнецов Р.А.¹, Давыдова В.О.³, Назарова М.А.¹, Плутахина Е.Ю.¹, Власенко Н.С.²

Exhalation minerals from geothermal fields of the Bolshoi Semiachik volcanic complex and solfataras of the 2023 pyroclastic flow of the Shiveluch volcano (Kamchatka)

Kupchinenko A.N., Zhitova E.S., Sheveleva R.M., Girina O.A., Pekov I.V., Kuznetsov R.A., Davydova V.O., Nazarova M.A., Plutakhina E.Yu., Vlasenko N.S.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; e-mail: kupchasta@yandex.ru*

² *Санкт-Петербургский государственный университет, г. Санкт-Петербург*

³ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва*

В работе приведена информация о минеральных парагенезисах, сформировавшихся в двух различных поствулканических обстановках: на поверхности термального поля и вокруг бескорневых сольфатар пирокластического потока.

Материалы и методы исследования

В работе изучены (а) минералы выцветов на поверхности термальных полей вулканического комплекса Большой Семячик (Северный Кратер Центрального Семячика – СКЦС) и (б) минералы сольфатар, образовавшихся на пирокластическом потоке извержения вулкана Шивелуч в апреле 2023 г. [1]. На термальном поле СКЦС образцы отбирались в 2020 г. с поверхности грунтов, температура которых на глубине 20 см достигала 70 °С, а также вблизи парогазовых струй. На пирокластическом потоке Шивелуча образцы отбирались из устья и вокруг сольфатар, температура выхода газа составляла более 300 °С на глубине 15 см. Отобранные образцы исследовались с помощью порошковой рентгеновской дифрактометрии и электронно-зондового микроанализа.

Результаты

По данным электронно-зондового микроанализа, наиболее распространенными минералами термального поля СКЦС являются феррикопиапит в ассоциации с кокимбитом и магнезиокопиапитом (рис. 1а, б), немного реже встречаются галотрихит и алуноген. В небольших количествах присутствуют ромбоклаз в виде ромбических пластинчатых кристаллов, халькантит, магнезиовольтаит, аммонировольтаит, вольтаит, гипс с примесью Fe^{2+} , чермигит с небольшим содержанием K^+ , буссенготит, риотинтоит с примесями Ba^{2+} и Sr^{2+} . Редко встречаются киноварь, барит, сабиит, карлсонит, ярозит, масканьит, морит (табл. 1).

Данными рентгенофазового анализа подтверждены наиболее распространенные минералы: члены групп копиапита и вольтаита, галотрихит, халькантит, гипс, алуноген, ромбоклаз, чермигит (рис. 2).

На сольфатарах вулкана Шивелуч, по данным электронно-зондового микроанализа, возгоны представлены нашатырем (рис. 1в), алуногеном (рис. 1г), пиккерингитом, магнезиовольтаитом, тамаругитом, гипсом, магнезиокопиапитом, ангидритом, серой и галитом (табл. 1). Данными рентгенофазового анализа подтверждаются наиболее распространенные минералы: гипс, галит, нашатырь, алуноген, члены группы вольтаита, тамаругит.

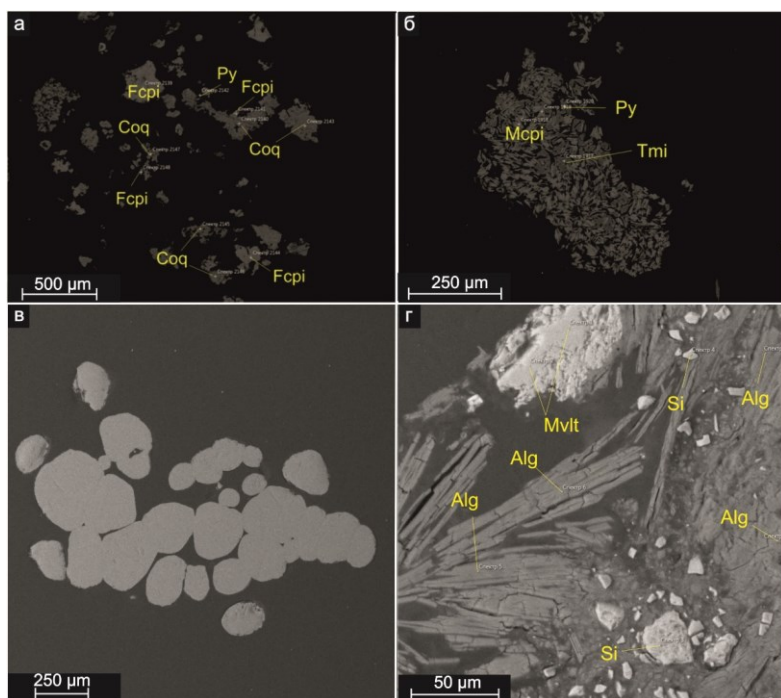


Рис. 1. Изображения минералов со сканирующего электронного микроскопа в обратно-рассеянных электронах: (а) пирит (Py), кокимбит (Coq), феррикопиаптит (Fcri) с СКЦС; (б) магнизокопиаптит (Mcri), чермигит (Tmi) и пирит (Py) с СКЦС; (в) нашатырь с вулкана Шивелуч; (г) алуноген (Alg), магнизовольтаит (Mvlt) и минерал кремнезема (Si) с вулкана Шивелуч.

Таблица 1. Идентифицированные в работе минералы и их идеальные химические формулы

Минерал	Идеальная химическая формула	Место находки
Группа копиаптита		
Феррикопиаптит	$Fe^{3+}_{0.67}Fe^{3+}_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$	СКЦС
Магнизокопиаптит	$MgFe^{3+}_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$	СКЦС, Шивелуч
Группа галотрихита		
Галотрихит	$Fe^{2+}Al_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	СКЦС
Пиккерингит	$MgAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$	Шивелуч
Группа вольтаита		
Магнизовольтаит	$K_2Mg_5Fe^{3+}_2Al(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$	СКЦС, Шивелуч
Аммонировольтаит	$(NH_4)_2Fe^{2+}_3Fe^{3+}_2Al(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$	СКЦС
Вольтаит	$K_2Fe^{2+}_5Fe^{3+}_2Al(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$	СКЦС
Группа кокимбита		
Кокимбит	$AlFe^{3+}_3(SO_4)_6 \cdot 18H_2O$	СКЦС
Группа алунита		
Ярозит	$KFe^{3+}_3(SO_4)_2(OH)_6$	СКЦС
Другие железосодержащие сульфаты		
Ромбоклаз	$(H_5O_2)Fe^{3+}(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$	СКЦС
Аммониевые минералы		
Сабииит	$(NH_4)Fe^{3+}(SO_4)_2$	СКЦС
Карлсонит	$(NH_4)_5Fe^{3+}_3O(SO_4)_6 \cdot 7H_2O$	СКЦС
Морит	$(NH_4)_2Fe^{2+}(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	СКЦС
Чермигит	$(NH_4)Al(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$	СКЦС
Буссенготит	$(NH_4)_2Mg(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	СКЦС
Масканьит	$(NH_4)_2SO_4$	СКЦС
Нашатырь	NH_4Cl	Шивелуч
Сульфаты, содержащие только двухвалентные катионы		
Халькантит	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	СКЦС
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	СКЦС
Ангидрит	$CaSO_4$	Шивелуч
Барит	$BaSO_4$	СКЦС
Сульфаты алюминия		
Риотинтоит	$Al(SO_4)(OH) \cdot 3H_2O$	СКЦС
Алуноген	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 17H_2O$	СКЦС, Шивелуч
Тамаругит	$NaAl(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$	Шивелуч
Сульфиды		
Киноварь	HgS	СКЦС

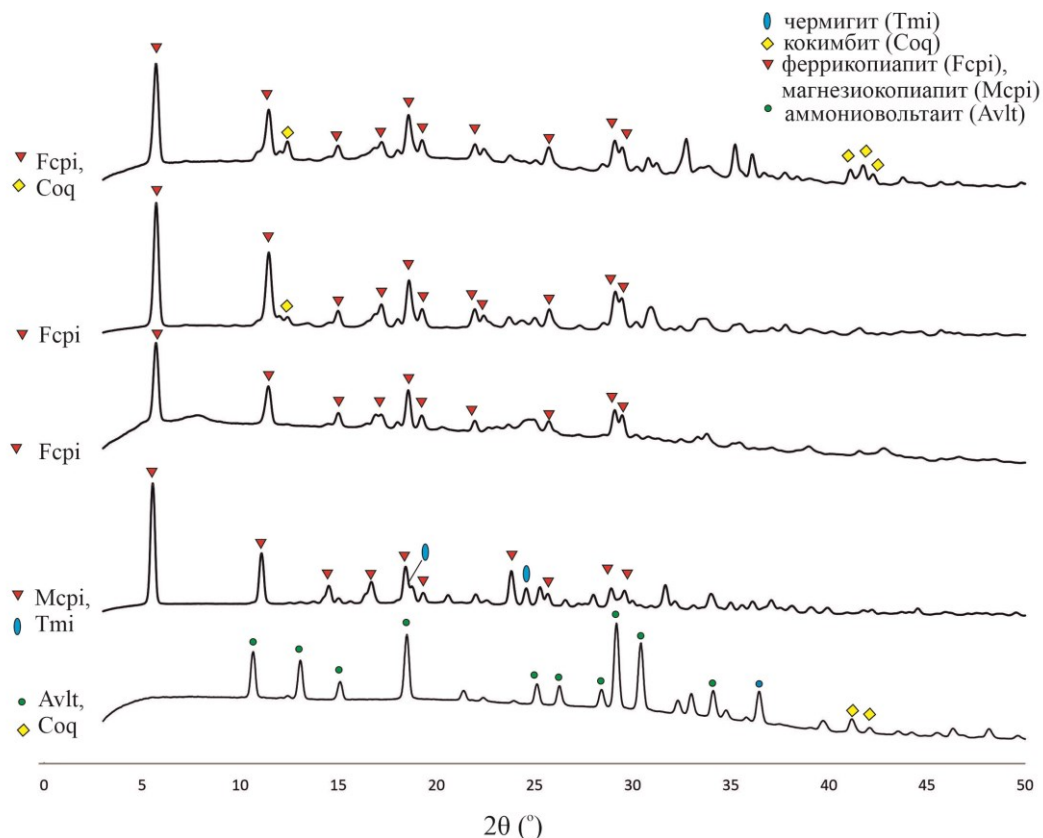


Рис. 2. Рентгенограммы минералов-выцветов с термальных полей вулканического комплекса Большой Семейчик. Идентифицированы минералы групп вольтаита и копиапита, кокимбит, и чермигит. Излучение – $\text{CuK}\alpha$.

Обсуждение результатов

Исходя из результатов исследования, наиболее распространенными минералами СКЦС являются сульфаты, преимущественно гидратированные, петрогенных элементов: Fe, Mg, Al, Ca. Среди них минералы групп копиапита (магнезиокопиаптит и феррикопиаптит), вольтаита и кокимбита, галотрихит, алуноген, ромбоклаз, ярозит, гипс. Из аммонийсодержащих минералов чаще всего можно наблюдать чермигит, также встречены сабиит, карлсонит, буссенготит, масканьит, морит. Широко распространен опал, возникающий в результате воздействия кислых растворов на породы.

Вблизи сольфатар на поверхности отложений пирокластических потоков вулкана Шивелуч распространены нашатырь, алуноген, пиккерингит, магнезиовольтаит, тамаругит, гипс, магнезиокопиаптит, ангидрит, гематит, альбит, опал, сера и галит.

Сопоставление полученных данных показало, что на поверхности потоков Шивелуча из минералов ряда галотрихит-пиккерингит наиболее распространен пиккерингит, в котором Mg существенно преобладает над Fe: содержание Fe^{2+} не превышает 0.25 атома на формулу (табл. 2). Для термального поля СКЦС характерен галотрихит с близкими атомными соотношениями Mg и Fe^{2+} при небольшом преобладании Fe^{2+} , $\text{Fe}^{2+} : \text{Mg} = 54 : 46$ [2]. Весьма схожая ситуация наблюдается для минералов группы вольтаита: например, в магнезиовольтаите с Шивелуча Mg сильно превалирует над Fe^{2+} , $\text{Fe}^{2+} : \text{Mg} = 77 : 23$, тогда как для магнезиовольтаита с термального поля СКЦС характерно близкое к 50:50 отношение Mg и Fe^{2+} [4]. Таким образом, минералы возгонов сольфатар вулкана Шивелуч в целом более магнезиальные по сравнению с минералами выцветов термального поля СКЦС, что согласуется с высокой магнезиальностью силикатных вулканических пород Шивелуча [3].

Таблица 2. Сравнение химического состава минералов одной и той же группы из разных обстановок проявления поствулканической активности

	СКЦС	Шивелуч
Группа галотрихита		
Минерал	Галотрихит	Пиккерингит
Эмпирическая формула	$(\text{Fe}^{2+}_{0.54} \text{Mg}_{0.46})_{\Sigma 1.00}$ $(\text{Al}_{1.88} \text{Fe}^{3+}_{0.11})_{\Sigma 1.99}$ $(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$	$(\text{Mg}_{0.86} \text{Fe}^{2+}_{0.22})_{\Sigma 1.08}$ $\text{Al}_{2.01}$ $(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$
Источник	[2]	Настоящая работа
Группа вольтаита		
Минерал	Магнезиевольтаит	Магнезиевольтаит
Эмпирическая формула	$[\text{K}_{1.68}(\text{NH}_4)_{0.28}\text{Na}_{0.08}]_{\Sigma 2.04}$ $(\text{Mg}_{2.51}\text{Fe}^{2+}_{2.54})_{\Sigma 5.05}$ $(\text{Fe}^{3+}_{2.75}\text{Al}_{0.24})_{\Sigma 2.99}$ $\text{Al}_{1.00}(\text{S}_{0.99}\text{P}_{0.01}\text{O}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	$\text{K}_{1.81}$ $(\text{Mg}_{3.78}\text{Fe}^{2+}_{1.13})_{\Sigma 4.91}$ $(\text{Fe}^{3+}_{2.81}\text{Al}_{0.18}\text{Ti}_{0.10})_{\Sigma 3.09}$ $\text{Al}_{1.00}(\text{SO}_4)_{12} \cdot 18\text{H}_2\text{O}$
Источник	[4]	[4]

Примечательно, что возгоны на поверхности пирокластических потоков вулкана Шивелуч содержат нашатырь и галит, что нехарактерно для термального поля СКЦС и, вероятно, отражает более высокое содержание хлора в сольфатарных газах. Нашатырь встречается здесь повсеместно в виде скоплений и сростков округлых зерен (см. рис. 1в). На термальном поле СКЦС аммониевые минералы представлены только сульфатами.

Исследования выполнены авторами в Ресурсном Центре СПбГУ «Рентгенодифракционные методы исследования» и Аналитическом Центре ИВиС ДВО РАН. Работа выполнена по гос. заданию ИВиС ДВО РАН в рамках темы научно-исследовательских работ «Минералообразование в надсубдукционной зоне Северной Пацифики» (№ FWME-2024-0004).

Список литературы

1. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
2. *Шевелева Р.М., Назарова М.А., Нурждаев А.А. и др.* Распространенность и химический состав галотрихита на геотермальных полях Камчатки // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2023. Вып. 58. № 2. С. 5-16. <https://doi.org/10.31431/1816-5524-2023-2-58-5-16>
3. *Gorbach N., Portnyagin M., Tembrel I.* Volcanic structure and composition of Old Shiveluch volcano, Kamchatka // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. V. 263. P. 193-208. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.12.012>
4. *Zhitova E.S., Sheveleva R.M., Kupchinenko A.N. et al.* The Crystal Chemistry of Voltaite-Group Minerals from Post-Volcanic and Anthropogenic Occurrences // Symmetry. 2023. V. 15. № 12. Art. 2126. <https://doi.org/10.3390/sym15122126>

Первые данные о потоке почвенного CO₂ на термальных полях кальдеры Узон

Мельников Д.В., Калачева Е.Г.

First data on the soil CO₂ flux in the thermal fields of Uzon caldera

Melnikov D.V., Kalacheva E.G.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: dvm@kscnet.ru

Впервые проведены измерения эмиссии почвенного газа CO₂ на термальных полях кальдеры Узон. Измеренный средний поток CO₂ составляет 1362 г/м²/д, а максимальные измеренные значения достигают 17105 г/м²/д, что сопоставимо со средним и максимальным потоком CO₂ из почвы на других активных геотермальных полях с интенсивными фумарольными проявлениями.

В центре Карымско-Семячинского участка грабен-синклиория Восточной Камчатки располагается Узон-Гейзерная депрессия. Собственно кальдера Узон – более молодая западная часть депрессии – образование сложного тектонического генезиса. Она имеет черты как структуры проседания (кольцевой разлом со смещением >1 км), так и взрывной структуры [1].

Современная гидротермальная система кальдеры Узон пространственно делится на четыре поля: Западное, Северное, Восточное (Центральное) и район оз. Фумарольное. Термальные поля представляют собой участки аномального прогрева пород с развитием всевозможных форм газовой гидротермальной деятельности. Термальные поля локализируются в протяженную зону, интерпретируемую как разлом глубинного заложения, поскольку на него трассируются вулканы Кихпиньч, Узон, Тауншиц [1].

Несмотря на достаточно хорошую геологическую и гидрогеологическую изученность, в кальдере Узон не проводились работы по измерению потока почвенного газа CO₂. В то же время, изучение динамики эмиссии этого газа предоставляет большие возможности и является достаточно распространенным методом исследования вулканических и гидротермальных областей, включая современные гидротермальные системы.

Как правило, результаты полевых измерений почвенной эмиссии CO₂ обрабатываются на основе статистических и геостатистических методов, которые были предложены в [2, 4]. Газовый поток из почвы обычно измеряется в единицах граммов на м² в сутки (г/м²/д). Результаты обработки данных почвенной эмиссии газа часто выявляют наличие как минимум двух статистических популяций FCO₂. Они могут относиться как к выделению почвой биогенного CO₂, связанному с окислением почвенного органического вещества, так и к эмиссии CO₂ метаморфического, гидротермального и/или вулканического происхождения. В первом случае FCO₂ не превышает нескольких десятков г/м²/д, а во втором случае может достигать значений до десятков тысяч г/м²/д [7].

В данной публикации мы представляем результаты измерений диффузного потока CO₂, проведенные на I участке Восточного термального поля кальдеры Узон. Участок представляет собой серию термальных площадок, грязевых котлов, горячих озер. Также здесь расположено озеро Банное и гейзер Шаман. Работы проводились в сентябре 2023 г.

Методы исследования

Измерения эмиссии почвенного CO₂ проводились методом накопительной камеры PP Systems EGM-5 (США) в 100 точках (рис. 1) на I участке Восточного термального поля кальдеры Узон. Общая площадь, на которой проводились измерения, составляет 85 700 м². Прибор PP Systems EGM-5 состоит из накопительной камеры объемом 1 171 мл и инфракрасного газоанализатора CO₂ с диапазоном измерений

0-100 000 ppm). Почвенный газ циркулировал из камеры в анализатор и обратно через пластиковые трубки с помощью воздушного насоса. Поток измерялся в течение двухминутного цикла путем расчета скорости увеличения концентрации CO_2 внутри камеры. Температуру почвы измеряли на глубине 10 см отдельной термопарой. Измеренные значения FCO_2 были обработаны с использованием статистического метода GSA (Graphical Statistical Approach) в соответствии с процедурой [4], чтобы охарактеризовать статистическое распределение FCO_2 и сделать вывод об источнике диффузной дегазации.

Для построения ортофотоплана района проведения работ использовался квадрокоптер DJI Matrice 300 RTK с модулем ZENMUSE H20T, который состоит из цифровых камер – широкоугольной, зум-камеры и инфракрасной камеры.

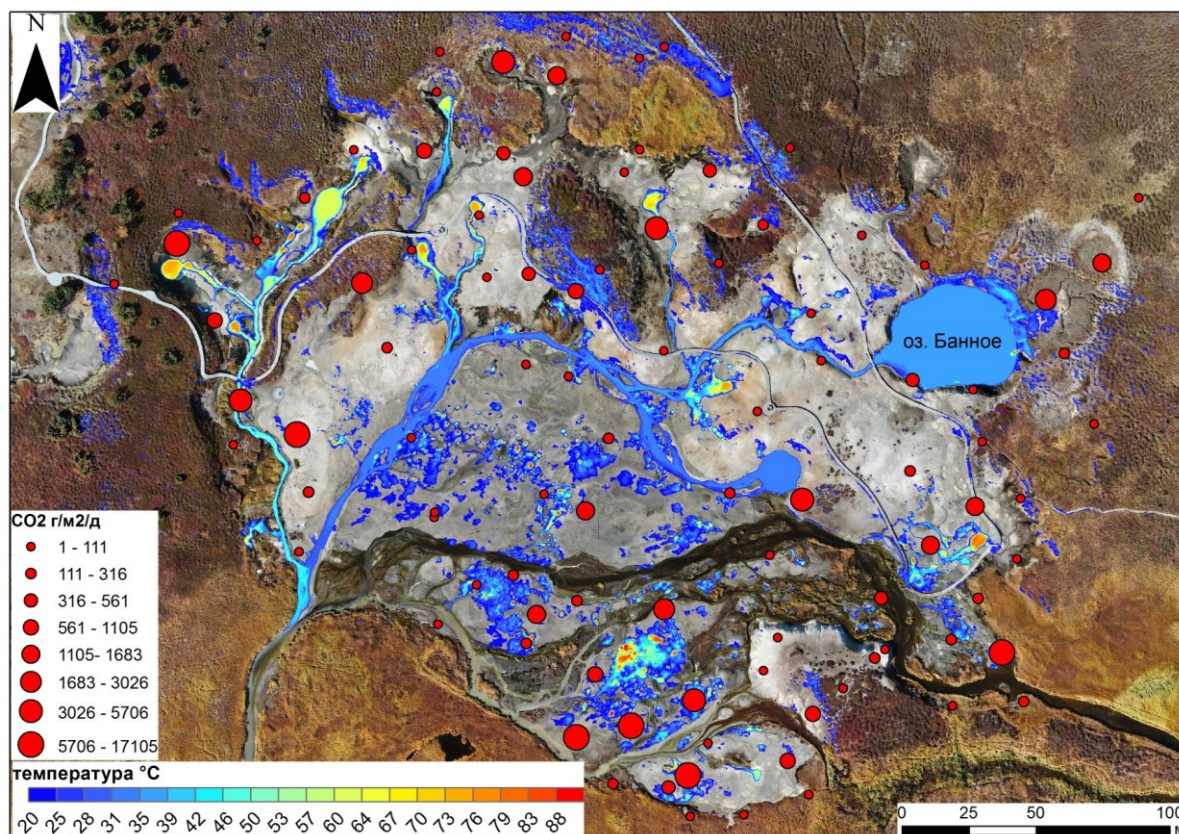


Рис. 1. Схема измерений почвенной эмиссии CO_2 . Красные кружки – поток CO_2 ($\text{г/м}^2/\text{д}$). Градиентом от синего к красному цвету показаны температуры поверхности по данным инфракрасной съемки, полученной с использованием квадрокоптера DJI Matrice 300 RTK.

Результаты исследования

Потоки почвенного CO_2 на I участке Восточного термального поля кальдеры Узон колеблются от $1 \text{ г/м}^2/\text{д}$ до $17\,105 \text{ г/м}^2/\text{д}$ со средним значением $1\,362 \text{ г/м}^2/\text{д}$. Полученные значения сопоставимы с эмиссией газа на других активных гидротермальных полях [7].

Гистограмма и логарифмически вероятный график FCO_2 показывают (рис. 2) статистическое распределение, близкое к одной логарифмически нормальной популяции. Высокое среднее значение FCO_2 указывает на то, что CO_2 , высвобождаемый при дегазации почвы, в основном, поступает из эндогенного источника.

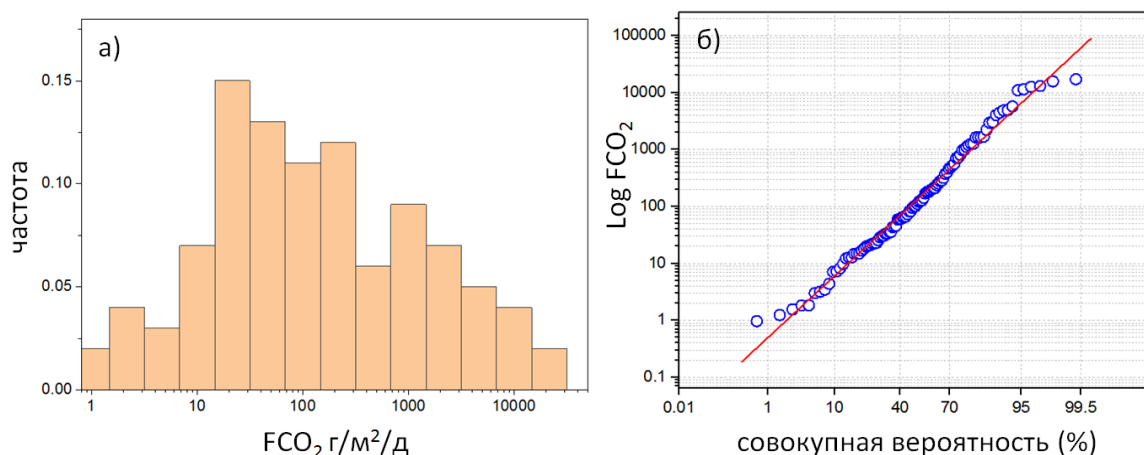


Рис. 2. а) гистограмма и б) вероятностный график измеренного FCO_2 . Красная линия показывает статистическое распределение логарифмически нормальной популяции со средним значением $\log(FCO_2) = 2.1$.

Результаты

Исследования, проведенные на I участке Восточного термального поля кальдеры Узон, показали высокие содержания почвенного углекислого газа. Измеренный средний поток CO_2 составляет $1\,362\text{ г/м}^2/\text{д}$, а максимальный измеренный поток составляет $17\,105\text{ г/м}^2/\text{д}$, что сопоставимо со средним и максимальным потоком CO_2 из почвы на других активных геотермальных полях с интенсивными фумарольными проявлениями (таблица) [7].

Таблица. Максимальное и среднее значение FCO_2 , измеренное на термальных полях. Для средних потоков показаны диапазоны по данным, полученным в разные даты съемок

Расположение	Макс. FCO_2 (г/м ² /д)	Средн. FCO_2 (г/м ² /д)	Термальные проявления	Источник данных
I участок Восточного термального поля кальдеры Узон	17 105	1 362	Да	Настоящая публикация
Долина Смерти	28 984	1 272	Нет	[7]
Solfatara of Pozzuoli	72 000	647-2556	Да	[3]
Tree-kill, Long Valley	8 670	190-1900	Нет	[5]
Nisyros	6 175	40	Да	[2]
El Chichón	14 100	806-1524	Да	[6]

Список литературы

1. Бычков А.Ю. Геохимическая модель современного рудообразования в кальдере Узон (Камчатка) // М.: ГЕОС. 2009. 124 с.
2. Cardellini C., Chiodini G., Frondini F. Application of stochastic simulation to CO_2 flux from soil: Mapping and quantification of gas release // Journal of Geophysical Research. 2003. V. 108 (B9). Art. 2425.
3. Cardellini C., Chiodini G., Frondini F. et al. Monitoring diffuse volcanic degassing during volcanic unrests: the case of Campi Flegrei (Italy) // Scientific Reports. 2017. V. 7. 6757.
4. Chiodini G., Cioni R., Guidi M. et al. Soil CO_2 flux measurements in volcanic and geothermal areas // Applied geochemistry. 1998. V. 13(5). P. 543-552.
5. Lewicki J.L., Hilley G.E., Tosha T. et al. Dynamic coupling of volcanic CO_2 flow and wind at the Horseshoe Lake tree kill, Mammoth Mountain, California // Geophysical Research Letters. 2007. V. 34. Art. L03401.
6. Mazot A., Taran Y. CO_2 flux from the volcanic lake of El Chichón (Mexico) // Geofisica Internacional. 2009. V. 48. P. 73-83.
7. Taran Y., Cardellini C., Tarasov K., Malik N. Diffusive emission of carbon dioxide and hydrogen sulfide from Valley of Death, Kamchatka, Russia // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2024. V. 447. Art. 108011.

Мониторинг притока неконденсирующихся газов в Мутновский продуктивный геотермальный резервуар в 2019-2023 гг.

Поляков А.Ю., Кирюхин А.В.

Analysis of non-condensable gas inflow to the Mutnovsky productive geothermal reservoir in 2019-2023

Polyakov A.Yu., Kiryukhin A.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: pol@kscnet.ru

С 2019 г. на конденсаторе Мутновской ГеоЭС проводятся наблюдения за изменением парциального давления неконденсированного газа (P_{NCG}) в геотермальном паре. За 4 года наблюдений зарегистрированы 34 аномалии P_{NCG} , из которых 19 синхронизированы с магматическими инъекциями.

Введение

Генерация электрической энергии на Мутновской ГеоЭС осуществляется посредством двух турбин по 25 МВт каждая, питание турбин осуществляют геотермальные скважины 24, А2, Geo-3, 029W, 016, ГК1, 042, 013, 017, 037, Geo-2 через два сепаратора [6].

Измерение парциального (P_{NCG}) давления неконденсированного газа (НКГ) на конденсаторе Мутновской ГеоЭС позволяет отслеживать притоки магматического газа, синхронизированного с инъекциями магмы в районе Мутновского вулкана [2-5]. С этой целью в 2019 г. было создано и апробировано оригинальное устройство, позволяющее обеспечить дистанционные наблюдения за изменением P_{NCG} в геотермальном паре в режиме реального времени [2]. Начиная с 2020 г. Филиалом «Возобновляемая энергия» ПАО Камчатскэнерго предоставляются исходные данные по технологическим измерениям на конденсаторе Мутновской ГеоЭС, обработка которых осуществляется по методике, описанной в патенте [2].

Результаты мониторинга 2019-2023 гг.

Пять сейсмических станций регистрируют сейсмичность в Мутновско-Гореловской вулканической зоне (MTV, GRL, ASA, RUS, PET). Выделение плоско-ориентированных кластеров выполнялось по каталогам микроземлетрясений (MEQ) КФ ФИЦ ЕГС РАН с использованием программы Fgas-Digger [1, 4-6] (критерий выборки: временной интервал $\delta_t=30$ дней, близость в горизонтальной плоскости $\delta_R=6$ км, близость к плоской ориентации (расстояние от события до плоскости $\delta_Z=1$ км).

С августа 2019 г. по декабрь 2023 г. в Мутновском геотермальном районе зарегистрировано 2892 землетрясения, 94 % из них составляют 82 плоско-ориентированных кластера, интерпретированных как магматические инъекции даек и силлов, внедряющихся преимущественно в северо-восточном секторе вулкана Мутновский на площади 2×10 км, на глубине от -4.0 до -2.0 км.

Полученные по методике [2] данные по вариациям P_{NCG} в конденсаторе турбины МГеоЭС, для сглаживания краткосрочных колебаний и выделения основных пиков, были обработаны методом скользящего среднего. В результате выявлено 34 аномалии P_{NCG} (таблица). На рис. 1 в качестве примера приведены основные пики аномалий P_{NCG} (P_a) в конденсаторе турбины Мутновской ГеоЭС, моменты начала инъекций даек и график выделения сейсмической энергии по эпизоду 01-07.2023 г. На рис. 2 показаны в 3D-изображении рои даек, продуктивные разломы Основной и Северо-Восточный и эксплуатационные скважины МГеоЭС по эпизоду 01-07.2023 г.

На рис. 3 показано обобщающее поле инъекций даек на отметке -3000 м за период 2019-2023 гг. и позиции эксплуатационных скважин, доставляющих магматический газ на конденсатор МГеоЭС.

Таблица. Рои даек под Мутновским вулканом, сопровождающиеся аномалиями P_{NCG} и выделением сейсмической энергии ΔE (10^9 Дж). Δt (сут.) – сдвиг по времени между аномалией НКГ и началом инъекции роя даек

Дата	Рой даек	№ аномалии НКГ	Δt (сут.)	ΔE (10^9 Дж)	Примечание
08.2019	98	19-1	20	0.1	
04.2020	100-101	20-1	15-20	0.2	
07.2020	108-109	20-2	3-20	0.03	
09.2020	112-115	20-3, 20-4, 20-5	5-22	0.15	
01-08.2021	117-122	Нет данных по P_{NCG}		0.15	Обвал ≈ 1 млн. м ³ в кратере Мутновского вулкана 18.08.2021
09-11.2021	Даек не выявлено	21-1, 21-2, 21-3, 21-4		0.2	
12.2021	123	21-5	25	0.07	
01.2022	124-125	22-1	12-14	0.03	
02.2022	126	22-2	3	0.1	
03-05.2022	Нет сейсмоданных	22-3, 22-4, 22-5, 22-6			
07.2022	128	22-7, 22-8	3	0.06	
08-12.2022	129-130	22-9, 22-10	23-25	0.07	
10-11.2022	131-132	22-12, 22-13, 22-14, 22-15	30-59	0.03	
03.2023	133-139	23-1	5-45	0.02	Фреатический взрыв у скв. 022
04.2023	144-146	23-2	3-10	0.01	
05.2023	147-150	23-3	5-27	0.02	
07.2023	156-160	23-4	3-18	0.02	
07.2023	162	23-5	8	0.02	
09.2023	172-174	23-6	2-6	0.01	Обвал в кратере Мутновского вулкана 15.09.2023
10.2023	175-181	23-7	9-11	0.02	
11.2023	182-184	23-8	17-20	0.02	

Выводы

Магматическая активность вулкана Мутновский, выявленная по сейсмическим данным в виде инъекций даек и силлов в северо-восточном секторе вулкана в период с 2019 г. по 2023 г., сопровождается притоком магматического газа в эксплуатируемый геотермальный резервуар (фиксируемого по изменениям парциального давления НКГ на конденсаторе МГеоЭС). Это доказывается синхронизацией магматических инъекций (со сдвигом по времени на 1-2 мес.) с аномалиями парциального давления НКГ. Фреатический взрыв у скв. 022 синхронизирован с инъекцией даек #134-139 в феврале-марте 2023 г.

Авторы выражают признательность директору филиала ПАО Камчатскэнерго «Возобновляемая энергетика» А.А. Любину, начальнику Мутновских ГеоЭС М.Л. Безотечество и ведущему инженеру О.В. Колесникову за предоставление данных по давлению и температуре в конденсаторе Мутновской ГеоЭС.

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>).

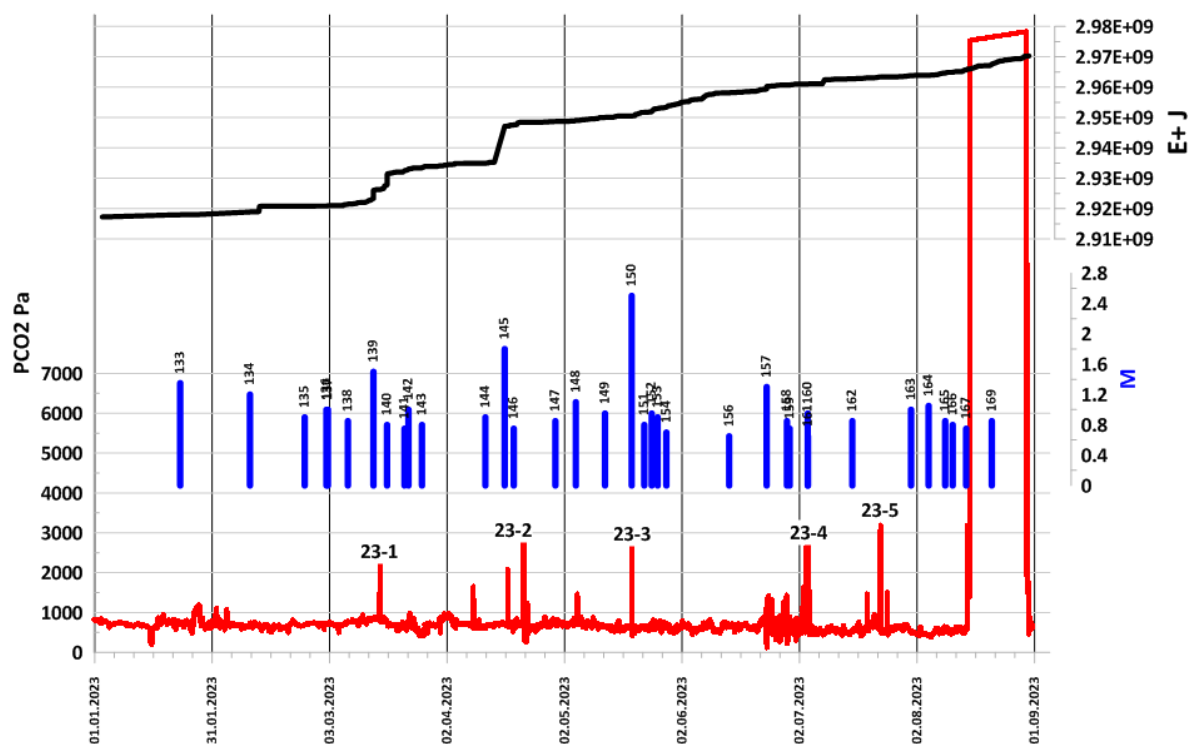


Рис. 1. Вариации P_{NCG} (Pa) в конденсаторе турбины Мутновской ГеоЭС (01.01-01.09.2023 гг.) и рои даек, выявленных по сейсмоданным. М – максимальная магнитуда при инъекции даек, E+J – выделенная сейсмическая энергия.

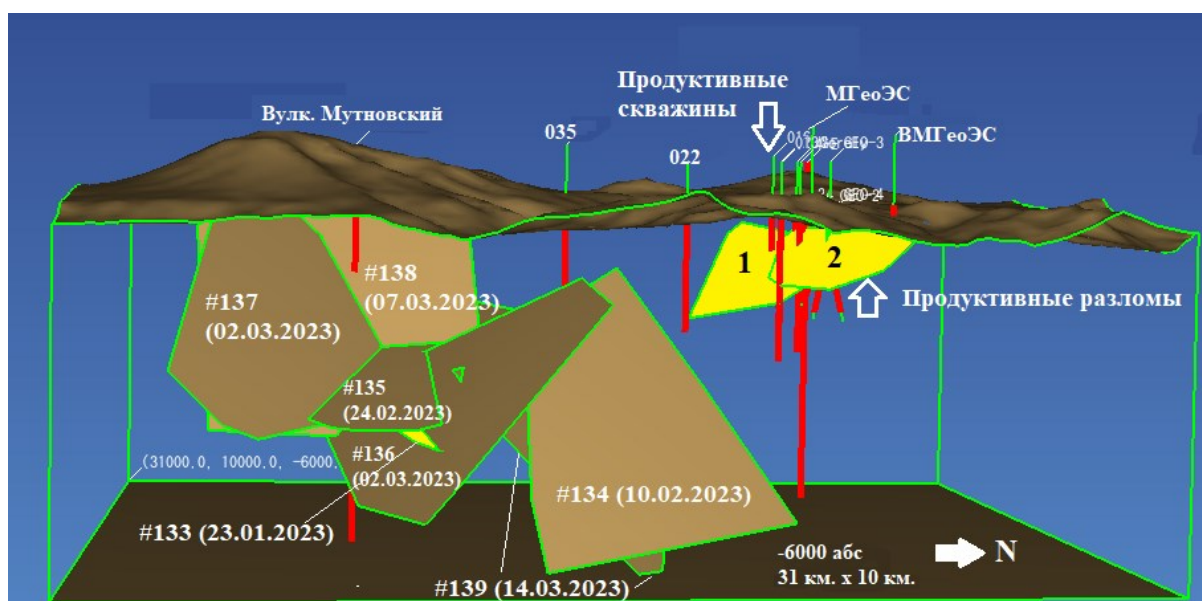


Рис. 2. Геометрия инъекций магмы в районе Мутновского вулкана по сейсмическим данным КФ ФИЦ ЕГС РАН за 01-03.2023 г., предшествующих аномалиям P_{NCG} , цифрами указаны номера даек (таблица, рис. 3). На рисунке показаны также эксплуатационные (016, 013, 029W, 1, 26, 4-E, Geo-1, Geo-2, Geo-3, Geo-4) и фонтанирующие скважины (022, 035) и продуктивные разломы «Основной» и «Северо-Восточный» (1, 2).

Новые данные о геологическом строении Южно-Камбального Дальнего термального поля (Камчатка)

Рычагов С.Н., Бойкова И.А., Нуждаев И.А., Феофилактов С.О.

New data on the geological structure of the South-Kambalny Central Thermal Field (Kamchatka)

Rychagov S.N., Boikova I.A., Nuzhdaev I.A., Feofilaktov S.O.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: rychn@kscnet.ru

На основании проведения аэрофотосъемки, измерения температур грунтов и детальных геологических исследований составлена крупномасштабная схематическая геологическая карта района Южно-Камбального Дальнего термального поля, впервые для геотермальных проявлений Камбального вулканического хребта.

Введение

Вулканический хребет Камбальный является крупной тектоно-магматической структурой и одной из наиболее мощных геотермальных систем Камчатки [1, 3]. Вдоль осевой зоны хребта разгружаются парогидротермы, объединенные в три группы термальных полей – Северную, Центральную и Южную [6]. Несмотря на большой интерес исследователей к этой структуре, геологические данные получены, в основном, еще в 1970-80 гг., носят региональный характер и весьма неоднозначны [1, 2, 4], а сколько-нибудь подробные геологические карты-схемы групп термальных полей отсутствуют. В связи с проведением структурно-геофизических, петрологических и минералого-геохимических исследований в районе южной группы термальных полей Камбального хребта [5, 7] назрела необходимость детального изучения геологической структуры района термопроявлений. В настоящем докладе приводятся первые комплексные данные о геологическом строении Южно-Камбального Дальнего термального поля (ЮКД).

Фактический материал исследований

ЮКД расположено в отрицательной морфоструктуре – крупной эрозионной котловине, вытянутой с юга на север вдоль ручья Дальний (рис. 1). Термопроявления приурочены непосредственно к ложу ручья, подчеркивая тектоническую природу зоны разгрузки парогидротерм, и образуют относительно изометричную область в средней части долины.

Характеристика термопроявлений приводится в других работах авторов доклада. Породы, слагающие морфоструктуру ЮКД (рис. 2), в основном, представлены базальтами и андезибазальтами (рис. 3а) средне-верхнечетвертичного возраста (по [2, 4]): мощные потоки массивных лав перемежаются с агломератовыми лавами и лавобрекчиями. Породы имеют порфиоровую и микропорфиоровую структуру, вкрапленники составляют 20-55 %. Преобладает плагиоклаз андезин – лабрадор № 32-60. Таблитчатые фенокристаллы часто образуют крестообразные сростки. У зональных кристаллов центральная часть резорбирована и выполнена стеклом. Клинопироксен – авгит. Ромбический пироксен (гиперстен?) полностью замещен хлорит-сметитом. Основная масса пород состоит из микролитов плагиоклаза, мелких ксеноморфных зерен пироксена, вулканического стекла и тонкой вкрапленности рудной сыпи. По трещинам развивается лимонит, затрагивая основную массу и фенокристаллы.

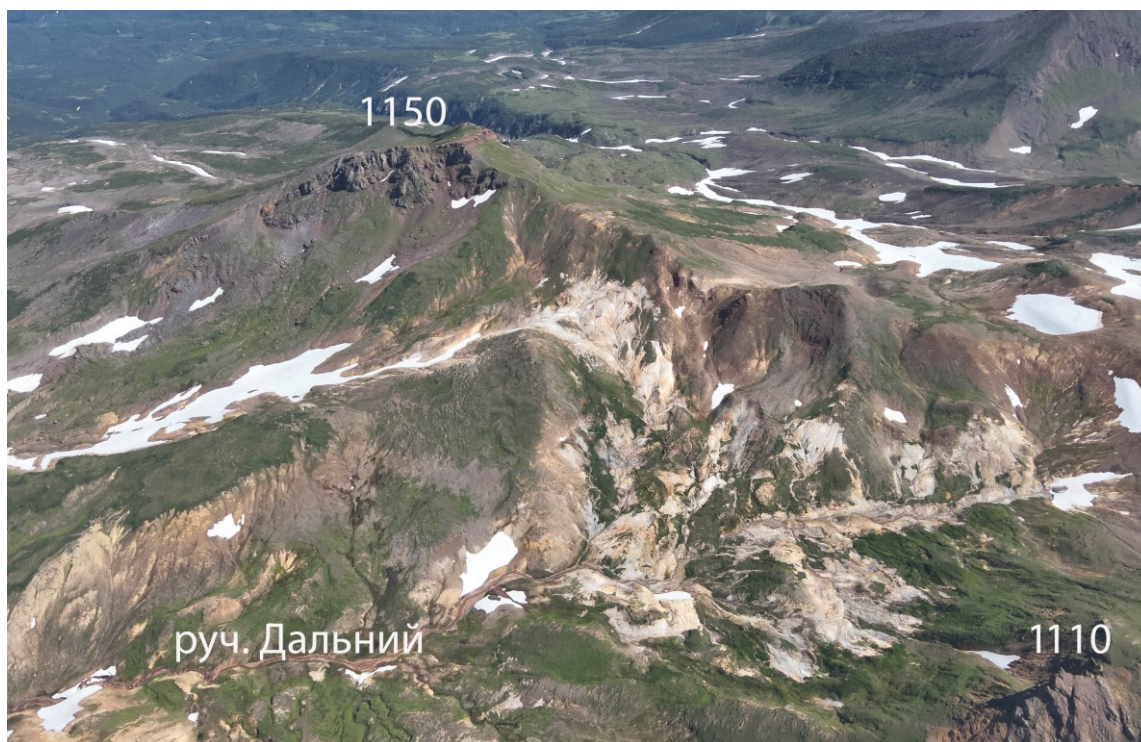


Рис. 1. Перспективный снимок ЮКД: цифры на фото – абсолютные отметки высот. Фото И.А. Нуждаева с квадрокоптера.

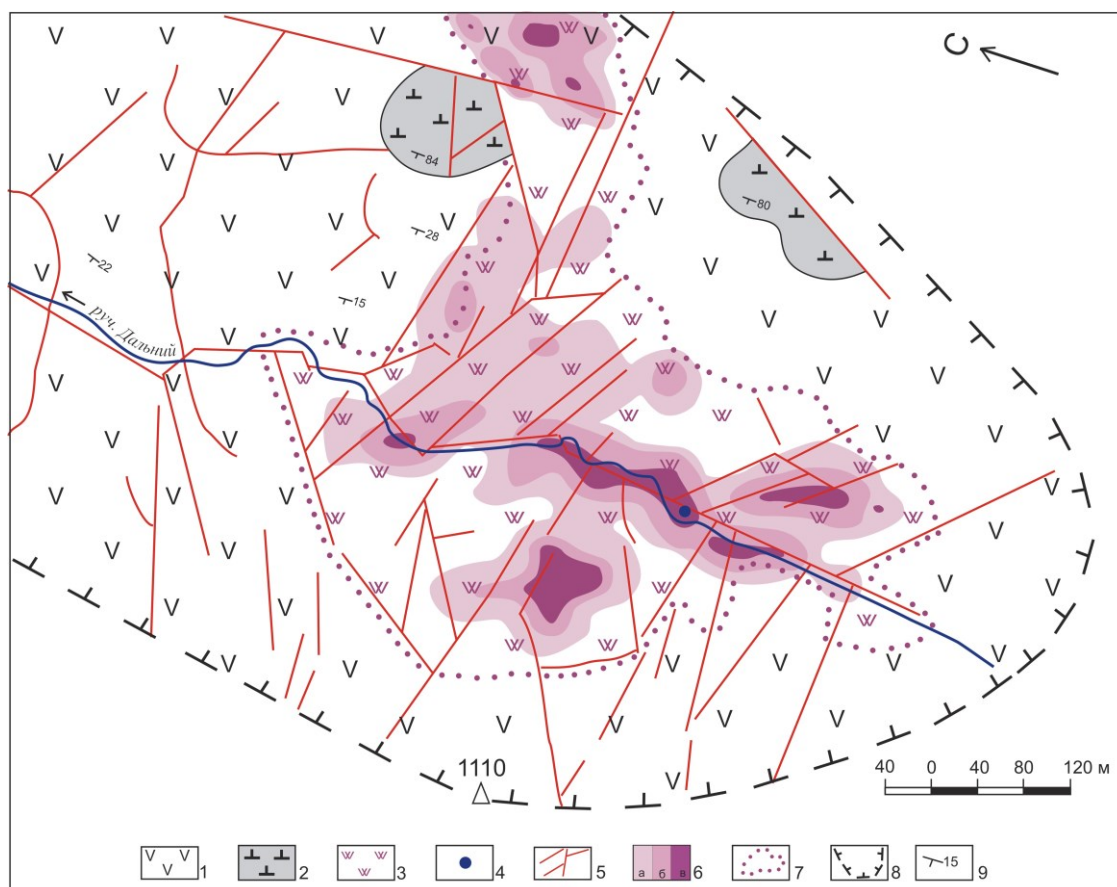


Рис. 2. Геологическая карта-схема района ЮКД: 1 – базальты и андезибазальты; 2 – интрузивные породы; 3 – вторичные кварциты-опалиты; 4 – центральный газо-водный пульсирующий котел; 5 – линейменты, выделенные на основе дешифрирования ортофотоплана; 6 – прогретые участки грунтов с интервалами температур (°С), а – 20-50, б – 50-80, в – более 80; 7 – границы поля вторичных кварцитов-опалитов; 8 – границы морфоструктуры ЮКД; 9 – элементы залегания пород.

В восточной части структуры (правом борту руч. Дальний) обнаружены выходы интрузивных пород. Габбро-долериты слагают небольшие тела темно-серого цвета, отчетливо выделяющиеся на фоне андезибазальтовых лав (рис. 3б).

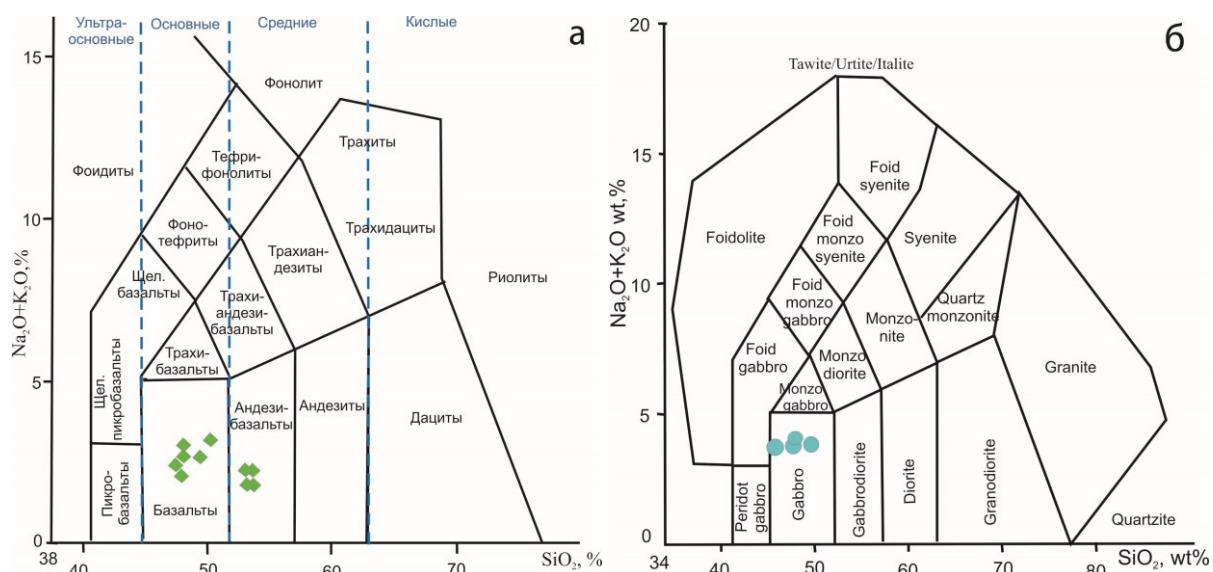


Рис. 3. Классификация пород ЮКД по химическому составу: а – эффузивных, б – интрузивных.

Габбро является среднезернистой полнокристаллической породой с гипидиоморфнозернистой структурой и массивной текстурой (рис. 4а). Минеральный состав включает (%): плагиоклаз – 50-60, клинопироксен – 40-50, рудный минерал – 5, вторичные минералы – 3; калиевый полевой шпат и кварц образуют единичные зерна. Идиоморфные кристаллы плагиоклаза от андезина № 42 до битовнита № 77 не зональные. Клинопироксен представлен авгитом, реже пижонитом. Некоторые фенокристаллы авгита замещаются хлорит-сметтитом бурого цвета. Из аксессуарных минералов развивается апатит, из рудных – титаномагнетит, сфалерит, халькопирит.

Долерит – полнокристаллическая порода порфировой структуры массивной текстуры (рис. 4б). Фенокристаллы представлены плагиоклазом (не зональным широкопластинчатым битовнитом № 70-77) и клинопироксеном (авгитом). Основная масса сложена преимущественно шестоватым лабрадором № 63 с полисинтетическими двойниками, а также ксеноморфными зернами клинопироксена. Авгит плеохроирует в желтых и бежевых тонах, угол погасания составляет 41°. Аксессуарные минералы в виде рудной сыпи включают титаномагнетит и ильменит.

В центральной части морфоструктуры базальты и андезибазальты полностью изменены во вторичные кварциты-опалиты, границы которых хорошо выделяются на ортофотоплане местности (ортофотоплан, составленный И.А. Нуждаевым, использован как основа для дешифрирования основных элементов геологического строения ЮКД). Поле гидротермально измененных пород выделяется также густой сетью линеаментов, представленных, в основном, разрывными тектоническими нарушениями (значительная часть нарушений заверена в геологических маршрутах). Долина ручья Дальний трассируется разломом, который контролирует основные разгрузки парогидротерм и, в целом, температурное поле ЮКД, что отчетливо видно на геологической схеме (см. рис. 2). Отдельные прогретые участки приурочены к системе оперяющих трещин и, видимо, к контактовым зонам интрузивных тел (в частности, к массиву, сложенному габбро). Таким образом, температурное поле, гидротермально измененные породы и система проницаемых для теплового потока разрывных тектонических нарушений являются сингенетическими образованиями, определяющими современный этап развития геологической структуры ЮКД.

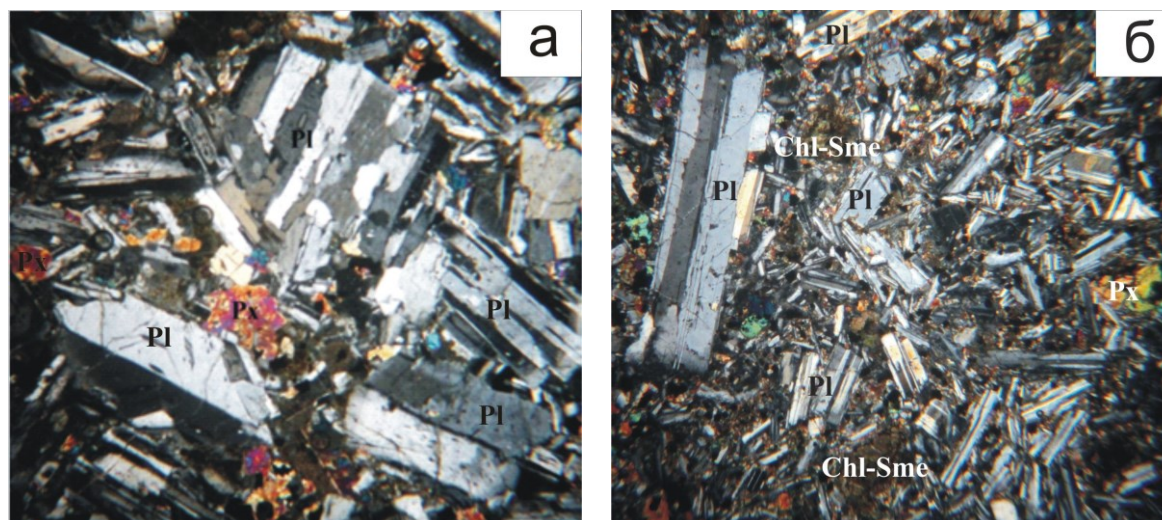


Рис. 4. Структуры интрузивных пород ЮКД – фото шлифов в скрещенных николях, 20х: а – гипидиоморфнозернистая структура габбро; б – порфировая структура долерита. Pl – плагиоклаз, Px – пироксен, Chl-Sme – хлорит-сметтит.

Заключение

Южно-Камбальное Дальнее термальное поле локализовано в отрицательной морфоструктуре овальной формы средним размером 500 м в поперечном сечении, вытянутой в направлении с юга на север вдоль ручья Дальний (истоки реки Хакыцин). Вмещающими породами являются базальты и андезибазальты, по-видимому, средне-верхнечетвертичного возраста. В геологических маршрутах обнаружены выходы интрузивных тел основного состава (габбро и долериты), вероятно, входящих в единый магматический комплекс с эффузивами. Термопроявления контролируются открытыми для теплового потока тектоническими нарушениями и локализуются в поле вторичных кварцитов-опалитов, что свидетельствует о совместном и близодновременном образовании системы трещин, гидротермально измененных пород и температурного поля – в рамках современного структурообразующего геотермального процесса.

Список литературы

1. Белоусов В.И. Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 176 с.
2. Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200 000. Западно-Камчатская серия / Ред. Н.Ф. Данилеско. Л.: ВСЕГЕИ, 1984.
3. Долгоживущий центр эндогенной активности Южной Камчатки. М.: Наука, 1980. 172 с.
4. Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 105 с.
5. Нурдаев И.А., Рычагов С.Н., Феофилактов С.О., Денисов Д.К. Особенности магнитного поля геотермальных систем Паужетского района (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2023. № 2. С. 33-51. DOI: 10.31857/S02003030622060049
6. Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.
7. Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С. и др. Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) // Инженерная геология. 2020. Т. XV. № 1. С. 36-51. DOI: 10.25296/1993-5056-2020-15-1-36-51

Реконструкция строения толщи гидротермальных глин и кровли коренных пород Южно-Камбального Центрального термального поля на основании бурения скважин и вертикального электрического зондирования

Рычагов С.Н.¹, Кравченко О.В.¹, Феофилактов С.О.¹, Чернов М.С.², Ермолинский А.Б.²

Reconstruction of the structure of hydrothermal clays and rocks roofing of the Southern Kamalny Central Thermal Field on the basis of well-drilling and vertical electric sounding

Rychagov S.N., Kravchenko O.V., Feofilaktov S.O., Chernov M.S., Ermolinskyi A.B.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: rychn@kscnet.ru*

² *Геологический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва;
e-mail: chernov@geol.msu.ru*

На основании сопоставления данных изучения толщи гидротермальных глин и подстилающих ее коренных пород с помощью бурения скважин с результатами детального вертикального электрического зондирования выделены основные структурные элементы аргиллизитов горячего участка Южно-Камбального Центрального термального поля.

Введение

Гидротермальные глины и аргиллизированные породы широко распространены в областях современного вулканизма и играют большую роль в геотермальных процессах [1-3]. В последние годы показано, что минералообразование в толще гидротермальных глин может служить индикатором взаимодействия глубинного металлоносного флюида с зоной разгрузки парогидротерм [5]. Этот фундаментальный научный результат определяет всесторонний интерес авторского коллектива к Южно-Камбальному Центральному термальному полю (ЮКЦ), которое характеризуется разгрузкой восходящих щелочных термальных вод и образованием минерализации сложного состава [4]. Одним из вопросов, имеющих ключевое значение для понимания условий формирования и эволюции ЮКЦ, является реконструкция строения толщи гидротермальных глин и ее основания.

Строение толщи гидротермальных глин ЮКЦ по данным бурения скважин

Термальное поле, в основном, сложено склоновыми образованиями, полностью переработанными гидротермально-метасоматическими процессами в гидротермальные глины. Рельеф термального поля имеет бугристую поверхность. Относительно ровной поверхностью выделяется долина руч. Кратерный, вдоль которого происходит основная разгрузка термальных вод в виде пульсирующих газо-водных источников. Бугры центральной части поля интенсивно пропарены, температура на глубине ≥ 0.8 м может достигать 105-107 °С. Основанием толщи гидротермальных глин служит кровля коренных пород (андезибазальтов), слагающих предположительно эродированный кратер моногенного андезитового вулкана. На ЮКЦ пройдено 8 скважин колонкового бурения (рис. 1) с полным отбором керна. Четыре скважины вскрыли коренные породы (1/20 – предположительно), остальные не достигли основания толщи вследствие критических условий бурения (высоких температур и большого давления пара на забое), либо повышенной мощности толщи глин, превышающей технические возможности буровой установки КМБ2-10 (ОАО «СКБ Геотехника», Россия).

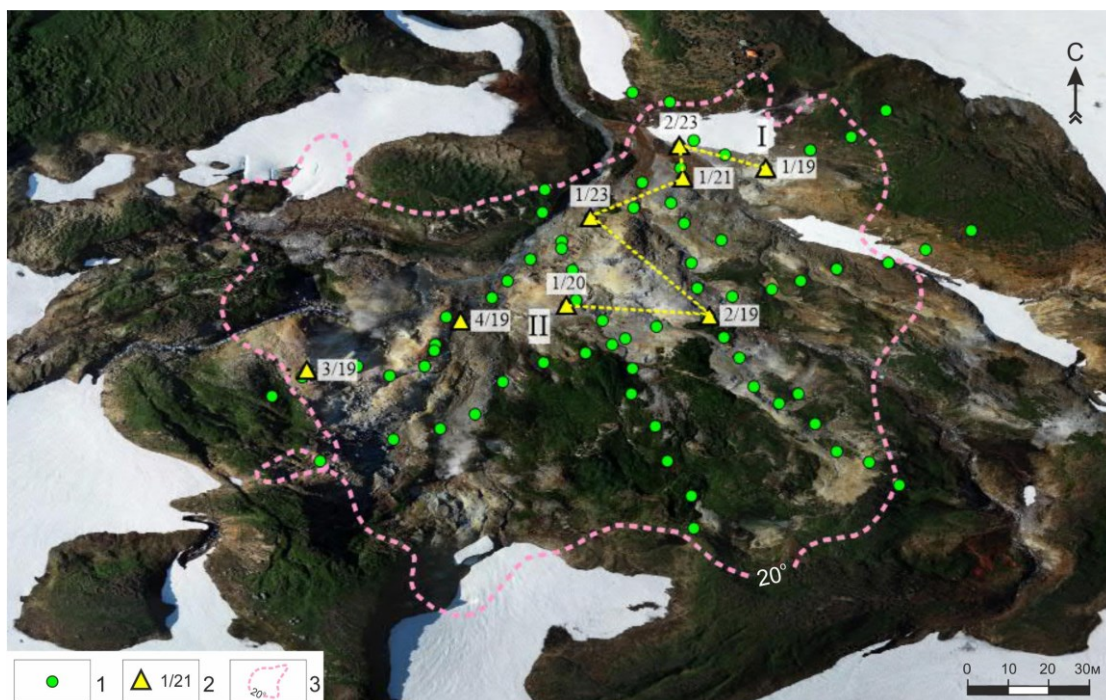


Рис. 1. Ортофотоплан ЮКЦ: 1 – точки вертикального электрического зондирования; 2 – номера и расположение скважин; 3 – граница термального поля по 20-градусной изотерме. Римскими цифрами обозначен геологический разрез по скважинам (см. ниже рис. 2).

Толща гидротермальных глин, в целом, имеет зональное строение (рис. 2). Описание выделенных горизонтов дано в подписи к рис. 2. Бугры на термальном поле характеризуются полным набором последовательно выделяемых слоев (скважины 1/20, 2/19). В колонках скважин, пробуренных вдоль руч. Кратерный (1/23, 1/21) и у основания крупного бугра, вытянутого вдоль ручья и его правого притока (возможно – приподнятого тектонического блока), скважины 2/23 и 1/19, некоторые слои отсутствуют, а мощность других резко возрастает. Кровля интенсивно аргиллизированных коренных пород находится на разной глубине: выделяются ступени (провалы, промоины?), которые имеют эндогенную (тектоническую) или экзогенную (эрозионную) природу. Верхний уровень проявления карбонатизации отложений также интенсивно варьирует по глубине, что, вероятно, зависит от степени проницаемости коренных пород и толщи гидротермальных глин для восходящих щелочных термальных вод и, следовательно, во многом определяется тектонической структурой термального поля. С целью решения обозначенных вопросов и реконструкции строения аргиллизитов не только горячего участка, но и всего термального поля выполнены детальные вертикальные электрические зондирования.

Вертикальные электрические зондирования на площади ЮКЦ выполнены симметричной четырехэлектродной расстановкой Шлюмберже. Техническое оснащение состояло из измерителя МЭРИ-24 (ООО «Северо-Запад», Россия), электроразведочного генератора АСТРА-100 (ООО «Северо-Запад», Россия), комплекта латунных и стальных электродов с проводами и катушками. Параметры расстановки включали измерения на разносах от 0.8 до 300 м с коэффициентом 1.4, использовались три приемные линии длиной 0.25, 1 и 10 м.

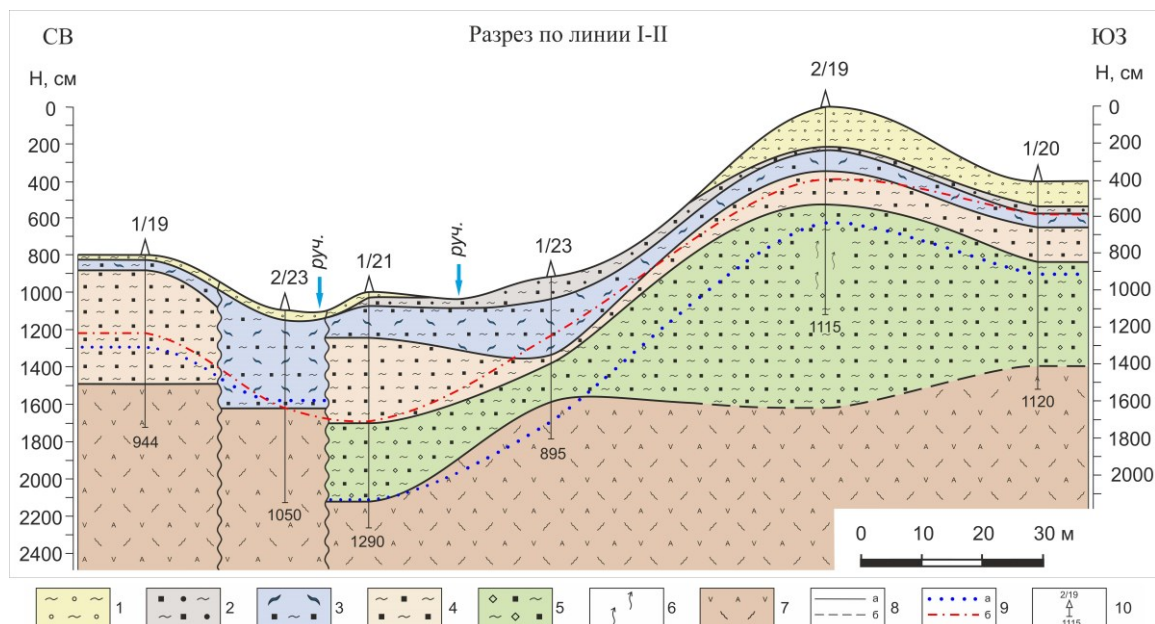


Рис. 2. Геологический разрез ЮКЦ по данным бурения скважин: 1 – охристые глины зоны сернокислотного выщелачивания; 2 – черно-серая супесь пиритизированная; 3 – глины пластичные голубовато-серого цвета; 4 – глины темно-серые сухие пиритизированные; 5 – глины светло-серые сухие с обломками аргиллизированных коренных пород и фрагментами опалитов; 6 – область разуплотненных глин, насыщенная паро-газовой смесью (скрытый газоводный котел?); 7 – аргиллизированные и карбонатизированные коренные горные породы (андезибазальты), подстилающие толщу гидротермальных глин; 8 – границы: а – литологическая установленная, б – то же, предполагаемая; 9 – верхний уровень распространения карбонатизации отложений (а) и изотерма 75 °С (б); 10 – скважины (вверху – номер, внизу – глубина забоя в см). Вертикальными извилистыми линиями обозначен фрагмент разреза, требующий дополнительных исследований.

Зондирования выполнены в 80 точках по четырем профилям с привязкой к структурным скважинам (см. рис. 1), на которых проводились параметрические измерения в двух направлениях (северо-западном и северо-восточном) для оценки степени анизотропии разреза. Расстояние между зондированиями по профилю составили 10 м на высокотемпературном участке и 20 м – за его пределами. Полученные кривые зондирований обрабатывались в специализированном программном пакете IPI2win (ООО «Геотех», Москва). Геоэлектрический разрез относится к типу НК и представлен следующим слоями, сверху вниз (рис. 3):

1 – приповерхностный горизонт пород с повышенными значениями удельного электрического сопротивления (у.э.с.) 30-100 Ом·м мощностью 20-80 см, соответствующий водонасыщенным глинам зоны сернокислотного выщелачивания;

2 – горизонт пород с у.э.с. 1.3-5 Ом·м мощностью от 0.7 до 6 м, включает слои глин с относительно высоким водонасыщением (пластичных, пиритизированных);

3 – горизонт с у.э.с. 2-2.5 Ом·м соответствует относительно сухим глинам с большим количеством аргиллизированных обломков андезибазальтов и опалитов, его мощность меняется от 2-5 до 10 м;

4 – горизонт с минимальными значениями и узким интервалом у.э.с. (0.9-1.2 Ом·м) соответствует коренным породам: интенсивно аргиллизированным, карбонатизированным и водонасыщенным андезибазальтам; горизонт имеет большую мощность (от 10 до 25 м) и, по-видимому, служит проводником для щелочных гидротерм;

5 – основание разреза со значениями у.э.с. 2-5 Ом·м, соответствующее, вероятно, менее пористым и (или) менее измененным горным породам.

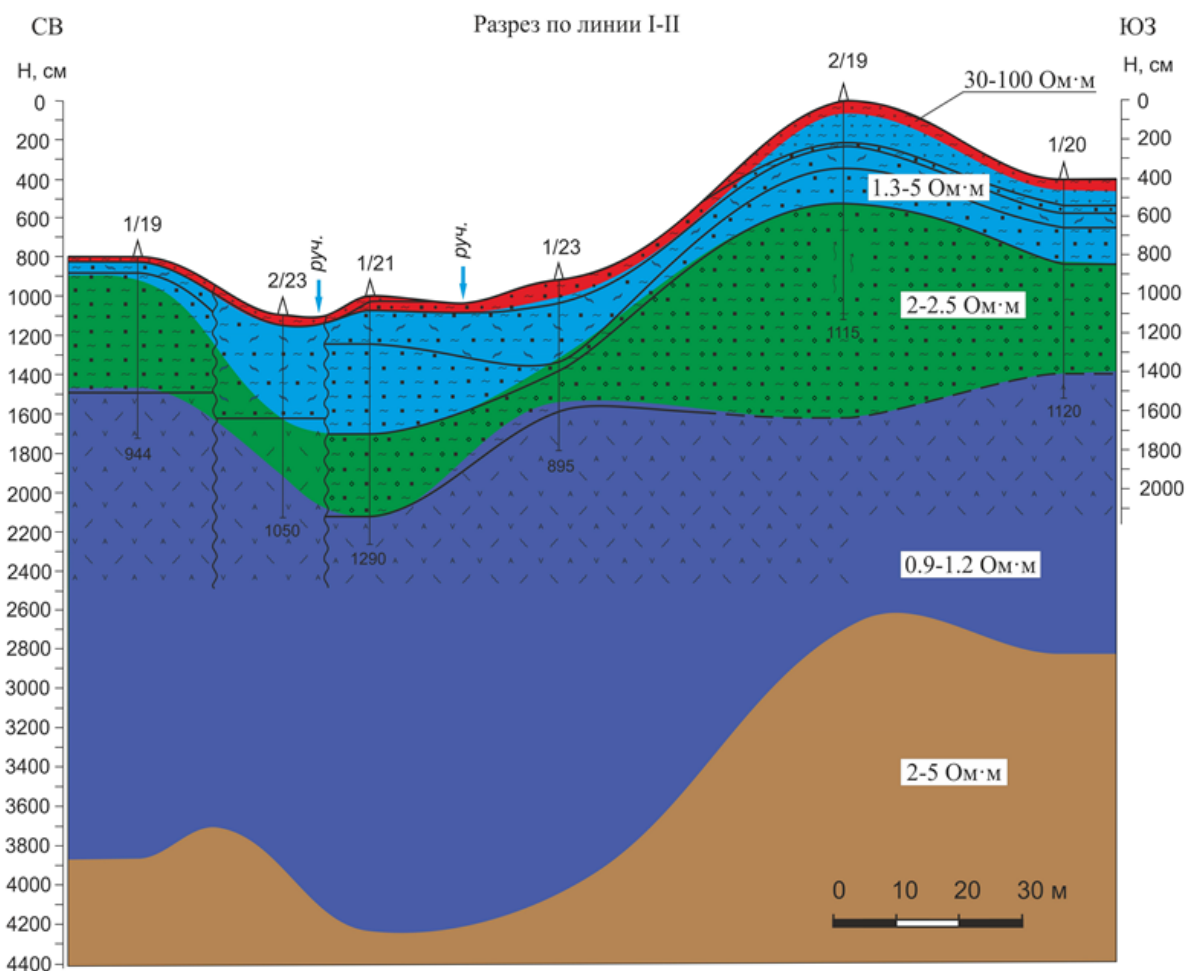


Рис. 3. Геоэлектрический разрез ЮКЦ: на литологическую основу наложены горизонты с различным у.э.с. (цифры в белых прямоугольниках).

Заклучение

Изучено строение толщи гидротермальных глин и пород ее основания горячего участка Южно-Камбального Центрального термального поля. Границы основных литологических и метасоматических горизонтов, выделенные на основании бурения скважин, с высокой точностью подтверждены вертикальным электрическим зондированием. Такая согласованность результатов позволит построить объемную модель структуры аргиллизированных и карбонатизированных пород термального поля в целом.

Список литературы

1. Коржинский Д.С. Теория метасоматической зональности. М.: Наука, 1982. 104 с.
2. Коробов А.Д. Гидротермальный литогенез в областях наземного вулканизма. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2019. 120 с.
3. Набоко С.И. Металлоносность современных гидротерм в областях тектоно-магматической активности. М.: Наука, 1980. 198 с.
4. Рычагов С.Н., Сандмирова Е.И., Чернов М.С. и др. Состав, строение и происхождение карбонатных конкреций Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 4. С. 45-60. DOI: 10.31857/S0203030621040052
5. Рычагов С.Н., Соколов В.Н., Чернов М.С. Гидротермальные глины геотермальных полей Южной Камчатки: новый подход и результаты исследований // Геохимия. 2012. № 4. С. 378-392.

Микроконкреции Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка)

Рычагов С.Н.¹, Сандимирова Е.И.¹, Чернов М.С.², Философова Т.М.¹

Microconcretions of the South-Kambalny Central Thermal Field (Kamchatka)

Rychagov S.N., Sandimirova E.I., Chernov M.S., Filosofova T.M.

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

e-mail: rychn@kscnet.ru

² *МГУ имени М.В. Ломоносова, Геологический факультет, г. Москва;*

e-mail: chernov@geol.msu.ru

Из водного «пиритового котла» Южно-Камбального Центрального термального поля выделены минеральные образования круглой формы диаметром до 10-12 мм, названные микроконкрециями согласно механизму их формирования. Они имеют сложные химический и минеральный составы, отражающие влияние глубинных щелочных гидротерм на метеорные воды и пароконденсат.

Введение

Южно-Камбальное Центральное термальное поле (ЮКЦ) привлекает большое внимание исследователей в связи с аномальными геофизическими характеристиками, локализацией мощной разгрузки парогидротерм в ярко выраженной кольцевой морфоструктуре, контрастным составом термальных вод, широким разнообразием минералов, образующихся на дневной поверхности и в зоне аргиллизации горных пород; высоким содержанием редких элементов в растворах и минеральных новообразованиях [1-3, 5, 6]. В частности, в арагонитовых конкрециях, образующихся под толщей гидротермальных глин в зоне разгрузки глубинных щелочных термальных вод, установлены оксиды, сульфаты, сульфиды и карбонаты ряда металлов, кремнисто-железо-марганцевые выделения, соединения азота, фосфаты кальция и редкоземельных элементов [4]. Помимо этих крупных конкреций, в центральной части поля образуются не менее сложные по составу, но не изученные ранее, мелкие округлые агрегаты, названные нами микроконкрециями в связи с определенным механизмом их формирования. В настоящем сообщении рассмотрены составы, строение и условия образования этих интересных минеральных форм.

Место образования и общая характеристика микроконкреций

Микроконкреции выделены с помощью шлихового анализа из «пиритового котла», расположенного в центральной части термального поля (рис. 1). Имеют почти идеальную круглую форму, бугристую матовую поверхность черного цвета; размеры достигают 10-12 мм. «Пиритовые котлы», названные так вследствие содержания в воде густой взвеси тонкодисперсного пирита (марказита) и черной окраски окружающего пространства, характеризуются высокой температурой растворов, интенсивным барботированием, щелочной или слабощелочной реакцией воды (табл. 1). Из анионов преобладает сульфат, но присутствует гидрокарбонат; в составе катионов – повышенные содержания аммония и кальция. Несмотря на постоянный приток метеорной воды, минерализация растворов достаточно высокая. Содержание многих микрокомпонентов (мкг/л) также более высокое, чем в щелочных или нейтральных разгрузках ЮКЦ с чистой водой: Li – 1.73, В – 680.6, Sc – 12.3, Mn – 596.7, Fe – 392.5, Ge – 0.45, As – 0.12; и др. Таким образом, характеристики термальной воды свидетельствуют о влиянии поступающих из глубины щелочных гидротерм, разгрузка которых на ЮКЦ была установлена ранее [4], на формирование растворов «пиритового котла».

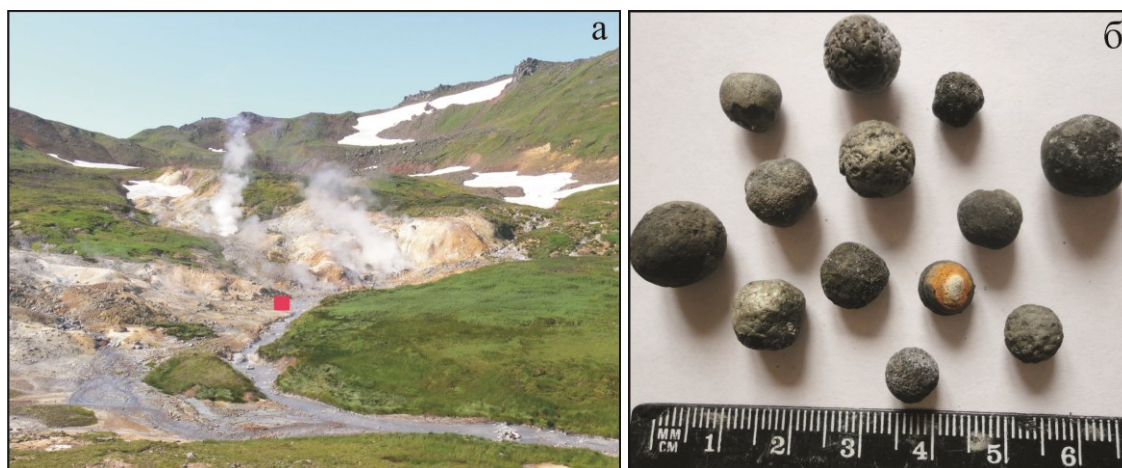


Рис. 1. Основная часть разгрузки парогидротерм на ЮКЦ (а) и место расположения «пиритового котла», обозначенное красным квадратом; на снимке справа (б) – микроконкреции. Фото С.Н. Рычагова.

Таблица 1. Состав термальной воды «пиритового котла», в котором образуются микроконкреции

№ пробы	Т, °С	рН	Еh	Макрокомпонентный состав, мг/л							
				HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁺	Na ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	NH ₄ ⁺	Минерализация
ЮКЦ-2/20	96	7.6	-10	56.1	451.5	11.6	3.5	93.0	14.4	98.9	729.0

Примечание. Определения выполнены в АЦ ИВиС ДВО РАН, аналитики Л.Н. Гарцева, О.В. Белоус, Е.А. Якимова, А.А. Кузьмина, С.В. Сергеева. Гидрогеохимическое опробование котла проводилось ежегодно с 2017 по 2023 гг.

Строение и минеральный состав микроконкреций

В полированных шлифах видно, что минеральные образования имеют концентрически-зональное строение за счет облекания полосами различного состава обломков пород (рис. 2а-в), либо агрегатов кристаллов пирита (рис. 2г). Вероятно, состав включений («затравок») может быть весьма разнообразным, но в большинстве случаев преобладают андезибазальты, почти полностью измененные гидротермально-метасоматическими процессами (табл. 2). Данный факт подтверждает сделанный ранее вывод о формировании термального поля в структуре постройки андезитового вулкана [6]. В состав зон входит более 20 минералов: сульфиды ряда металлов, гидроксиды железа и алюминия, алюмосиликаты, минералы кремнезема, фосфаты иттрия, карбонаты, сульфаты бария и кальция, и др. (см. табл. 2). Матрица полос в отдельных «шариках» почти полностью состоит из смектитов, хлорит-смектитов и гидроксидов железа и алюминия (см. рис. 2а, б); внутри и по периферии таких агрегатов отмечаются тонкие зоны, сложенные пиритом (марказитом) и другими минералами (в основном, сульфидами). Помимо концентрических полос выделяются радиальные зоны, выполненные опалом и др. минералами. В других микроконкрециях преобладают пирит-марказитовые слои, образующие четкую концентрическую структуру за счет чередования сульфидных зон с алюмосиликатными сложного состава (см. рис. 2в, г). Подробно данные о составе и взаимоотношениях минералов в зонах приводятся в таблице 2.

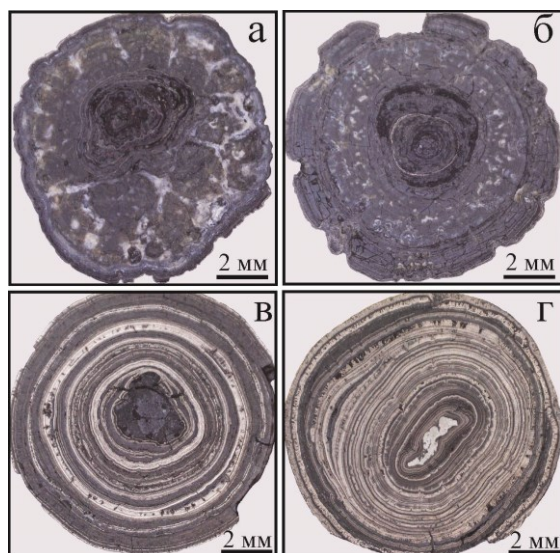


Рис. 2. Микроконкреции в полированных шлифах: а, б – существенно алюмосиликатного и/или гидроксидного состава (см. текст); в, г – минеральные образования, состав зон которых преимущественно сульфидный с примесью других минералов (см. текст).

Таблица 2. Минеральный состав микроконкреций ЮКЦ

Минералы	Условия нахождения в микроконкрециях
1	2
<i>Магматические, слагающие обломки пород (андезибазальтов)</i>	
Титаномагнетит	Рассеянная вкрапленность кристаллов в основной массе; порфиоровые сростки с авгитом и анортитом; кристаллы с решетчатыми структурами распада ильменита в титаномагнетите
Ильменит	Решетчатые структуры распада в титаномагнетите
Моноклинные пироксены (авгит, пижонит)	Микролиты в основной массе; порфиоровые сростки с лабрадором и титаномагнетитом
Плагиоклазы (анортит, лабрадор, меньше андезин, редко альбит-анортотлаз)	Микролиты в основной массе; анортит – порфиоровые вкрапленники размером до 0.7 мм
Калиевый полевой шпат	Немногочисленные зерна в основной массе
<i>Гидротермальные, достоверно определенные</i>	
Сфалерит	Мелкие зерна, приуроченные к порам в алюмосиликатной массе; сростки с марказитом
Галенит	Редкие зерна в сростании с марказитом
Киноварь	Мелкие включения в марказите вдоль слоев марказита
Пирит	Микрокристаллические агрегаты, образующие мономинеральные зоны или кристаллы в обломках андезибазальтов; часто замещает титаномагнетит; наиболее раскристаллизованные участки в марказите
Марказит	Колломорфно-полосчатые агрегаты, ажурные образования, формы типа розеток и др. Слагает отдельные слои конкреций
Гидроксиды Fe и Al с примесью Si	Зоны между слоями пирита-марказита; основная матрица во многих конкрециях
Смектит	Основная матрица алюмосиликатных зон, тонкодисперсная водосодержащая масса; замещение плагиоклазов в породах
Хлориты и хлорит-смектиты ди-дитриоктаэдрические	Тонкодисперсные водосодержащие агрегаты, заполняющие свободные пространства в измененных андезибазальтах; присутствуют в зонах между слоями из пирита-марказита
Опал, кварц	Зерна в полостях между слоями пирита-марказита
Фосфат Y	Мелкие единичные образования в ассоциации с баритом и марказитом

Таблица 2. Продолжение

1	2
Карбонат	Отдельные зерна в алюмосиликатных слоях
Барит	Мелкие пластинчатые кристаллы, выполняющие поры и микротрещины в измененных обломках андезибазальтов и в слоистых отложениях микроконкреций
Гипс	Мелкие кристаллы и неправильной формы отложения в полостях
Сульфаты (?) Fe и Al с примесью Si	Зоны между слоями пирита-марказита; основная матрица во многих конкрециях
Гидротермальные, предполагаемые	
Интерметаллические соединения Pb, Sn, Cd, Cu, Ni; присутствует F	Единичные мелкие зерна, приуроченные к порам
Соединения углерода	Участки неправильной формы
Соединения азота	То же
Сульфид Cu	Единичные мелкие зерна, приуроченные к порам
Цеолиты	То же

Примечание. Определения выполнены в ИВиС ДВО РАН на СЭМ VEGA 3, оснащенном ЭДС X-MAX 80 (операторы Т.М. Философова, Е.И. Сандимирова) и на Геологическом факультете МГУ с помощью СЭМ LEO 1450VP, оснащенном ЭДС INCA 300 (оператор М.С. Чернов).

Заключение

Микроконкреции Южно-Камбального Центрального термального поля имеют гидротермальное происхождение, сложный химический и минеральный составы и концентрически-зональное строение. Чередование зон существенно сульфидных и преимущественно алюмосиликатного и/или гидрооксидного состава свидетельствует о частой смене восстановительных условий минералообразования на окислительные, что, вероятно, обусловлено пульсационным характером поступления в зону разгрузки парогидротерм щелочных, насыщенных газом термальных вод, а также периодическим изменением притока метеорных вод и кислого пароконденсата.

Список литературы

1. Карпов Г.А. Псевдошаровые агрегаты арагонита на современном термальном поле Камбального хребта (Камчатка) // Минералогия гидротермальных систем Камчатки и Курильских островов. М.: Наука, 1970. С. 157-165.
2. Нуждаев И.А., Рычагов С.Н., Феофилактов С.О., Денисов Д.К. Особенности магнитного поля геотермальных систем Паужетского района (Южная Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2023. № 2. С. 33-51. DOI: 10.31857/S02003030622060049
3. Огородова А.С. Особенности гидротермального процесса в зоне кислотного выщелачивания // Гидротермальные минералообразующие растворы областей активного вулканизма. Новосибирск: Наука, 1974. С. 173-184.
4. Рычагов С.Н., Сандимирова Е.И., Чернов М.С. и др. Состав, строение и происхождение карбонатных конкреций Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка) // Вулканология и сейсмология. 2021. № 4. С. 45-60. DOI: 10.31857/S0203030621040052
5. Структура гидротермальной системы. М.: Наука, 1993. 298 с.
6. Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С. и др. Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) // Инженерная геология. 2020. Т. XV. № 1. С. 36-51. DOI: 10.25296/1993-5056-2020-15-1-36-51

Хлоритовые минералы в гидротермально-измененных андезибазальтах Южно-Камбального Центрального термального поля (Камчатка)

Сандиминова Е.И., Рычагов С.Н., Филоsofova Т.М.

Chlorite minerals in hydrothermally altered andesibasalts of South Kambalniy Central Thermal Field (Kamchatka)

Sandimirova E.I., Rychagov S.N., Filosofova T.M.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: sand@kscnet.ru

С помощью электронно-зондового микроанализа определен химический состав хлоритовых минералов в гидротермально-измененных обломках андезибазальтов на одном из термальных полей Камбального вулканического хребта. Минералы относятся к группе ди- и дитриоктаэдрических Al-хлоритов, представлены судоитом и донбасситом.

Введение

В областях современного вулканизма, в зонах разгрузки термальных вод, породы подвергаются интенсивному гидротермально-метасоматическому изменению, формируются определенные парагенетические минеральные ассоциации [3]. Для низкотемпературных метасоматитов (аргиллизитов) характерно широкое развитие глинистых минералов, в том числе хлоритовых. Химический состав хлоритовых минералов чувствителен к физико-химическим параметрам среды минералообразования, что позволяет рассматривать эти минералы в качестве индикаторов определенных геологических сред, использовать их как геотермометр и поисковый признак на различные полезные ископаемые [1-3, 6-8 и др.].

В пределах термальных полей Камбального вулканического хребта аргиллизация пород происходит в условиях мощной разгрузки парогидротерм в виде водных и грязеводных котлов, пульсирующих источников, парогазовых струй и парящих площадок при температуре около 100 °С на дневной поверхности. Термопроявления характеризуются контрастными физико-химическими параметрами [4, 5]. Предполагается, что на полях разгружается поток глубинных восходящих минерализованных растворов щелочного типа, при смешении которых с метеорными водами и конденсатом пара формируются кислые термальные воды также с повышенной минерализацией [4].

Несмотря на широкое распространение хлоритовых минералов в гидротермально-измененных породах Камбального вулканического хребта, информации о химическом составе этих минералов практически нет. В настоящей работе впервые приводятся данные по химическому составу хлоритовых минералов из гидротермально-измененных андезибазальтов Южно-Камбального Центрального термального поля, которые, на наш взгляд, представляют несомненный интерес для решения ряда петрологических задач.

Методика исследований

Образцы пород подвергались полировке и напылению углеродом, а затем изучались с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA3, оснащенного аналитической приставкой OXFORD instruments X-MAX80 с фирменным программным обеспечением AZtec, при соблюдении всех стандартных условий (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, аналитик Т.М. Филоsofova, оператор Е.И. Сандиминова).

Характеристика гидротермально-измененных пород

Обломки пород размером от 5 мм до 3 см были отобраны в одном из кипящих котлов Южно-Камбального Центрального термального поля. Воды в котле имеют щелочной (рН 7.6), гидрокарбонатно-сульфатный аммониевый (кальций-аммониевый)

состав, насыщены углекислым и сернистыми газами, с минерализацией ≥ 700.0 мг/л. Породы представлены порфировыми андезибазальтами. Порфировые вкрапленники размером до 0.7 мм состоят из сростков анортита (An_{89-92}), авгита и титаномагнетита. Основная масса сложена микролитами плагиоклазов, достигающих состава андезина, моноклинными пироксенами (авгитом, пижонитом) и титаномагнетитом с решетчатыми структурами распада ильменита в титаномагнетите. Микроструктура основной массы пилотакситовая. Обломки по краям выщелоченные, пористые. Породы пиритизированы, пирит отлагается по микротрещинам и замещает, в первую очередь, титаномагнетит и темноцветные минералы. В ассоциации с пиритом в порах и микротрещинах присутствуют агрегаты пластинчатого барита размером до 25 мкм.

Морфология и химический состав хлоритовых минералов

Хлоритовые минералы встречаются в основной массе андезибазальтов в виде пластинчатых и колломорфных образований угловатых или округлых форм; развиваются по трещинам и краям порфировых сростков (рис. 1).

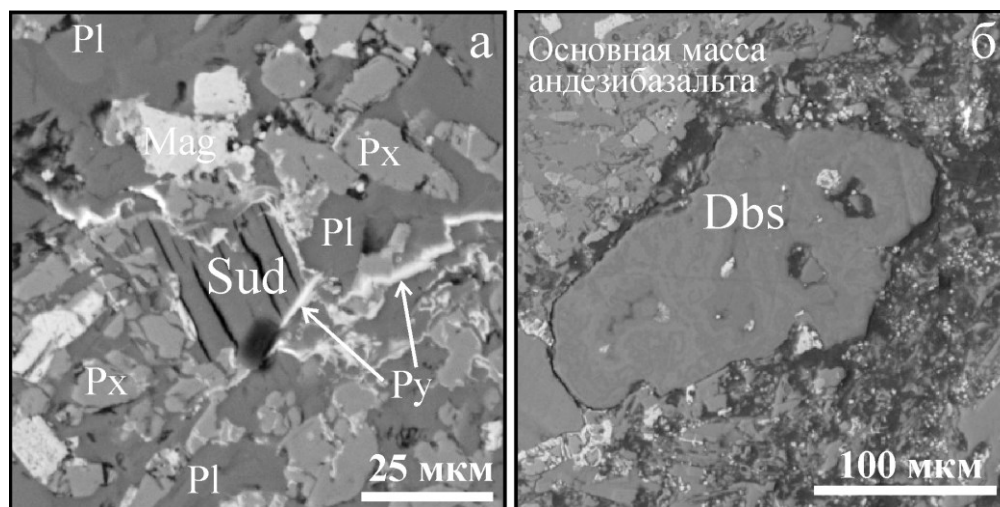


Рис. 1. Пластинчатый sudoит в основной массе андезибазальта (а); колломорфный донбассит в краевой части обломка выщелоченного андезибазальта (б). Dbs – донбассит; Mag – титаномагнетит; Pl – плагиоклаз (An_{50-70}); Px – пироксен (авгит); Py – пирит; Sud – sudoит.

Согласно классификации [12], хлоритовые минералы представлены ди- и дитриоктаэдрическими Al-хлоритами II типа – sudoитом и донбасситом (рис. 2, табл.). Подобные минералы широко распространены в Японии в толщах зеленых туфов, в том числе в приуроченных к этим туфам сульфидных полиметаллических месторождениях типа куроко [9]. Магнезиально-железистый sudoит, вероятно, можно отнести к более ранним образованиям. Он отлагается в виде пластинчатых агрегатов в основной массе слабо измененного андезибазальта в центральной части обломков. Маложелезистые колломорфные агрегаты донбассита являются более поздними образованиями. Они отлагаются большей частью в краевых частях обломков, где также встречаются колломорфные агрегаты sudoит-донбасситового состава. Донбассит частично замещается смектитом, который практически не содержит магния и железа. В ассоциации со смектитом донбассит также выполняет трещины в порфировых кристаллах анортита и замещает анортит по краям. В некоторых случаях анортит и плагиоклазы основной массы замещаются колломорфным донбасситом почти полностью. Таким образом, наблюдается последовательное отложение глинистых минералов с уменьшением в них магния и железа – sudoит \rightarrow донбассит \rightarrow смектит. В колломорфных агрегатах донбассита по трещинам усыхания отлагаются пирит-марказитовые агрегаты в срастании с мелкими зернами сфалерита, т.е. сульфиды отлагаются позже хлоритовых минералов. Необходимо также уточнить, что, вероятнее

всего, sudoит и донбассит представляют собой смешанослойные образования со смектитом. Кроме того, состав донбассита имеет сходство с составом смешанослойных каолинит-монтмориллонитов, поэтому для точного определения минералов требуются дополнительные рентгеноструктурные исследования.

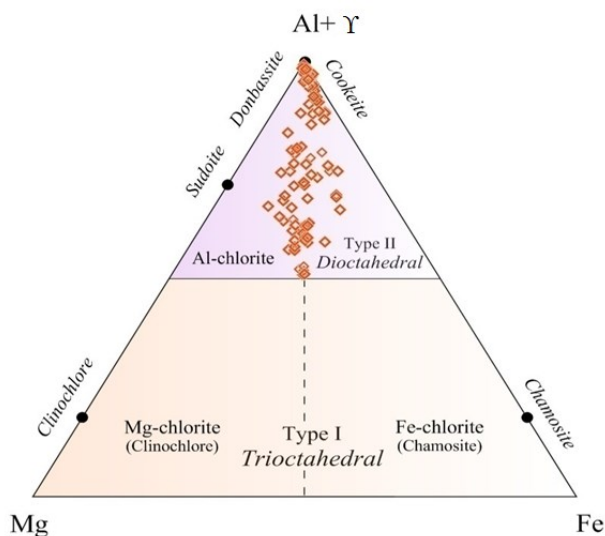


Рис. 2. Распределение составов хлоритовых минералов из обломков аргиллизированных андезибазальтов Южно-Камбального Центрального термального поля на диаграмме Mg – Fe_{общ.} – Al+Y [12], где: Mg, Fe_{общ.} и Al – количество атомов в октаэдрической позиции; Y – количество вакантных мест в октаэдрической позиции.

Таблица. Химический состав ди- и дитриоктаэдрических хлоритов (масс. %) с их структурными формулами (apfu) и классификациями по данным энергодисперсионной спектроскопии

1	2	3	4	5
	1	2	3	4
SiO ₂	41.73	42.98	45.59	46.08
Al ₂ O ₃	18.35	14.40	36.14	37.36
FeO	13.65	17.07	2.42	2.49
MnO	0.19	0.00	0.04	0.00
MgO	10.06	9.61	0.68	0.00
CaO	0.19	0.25	0.17	0.00
Na ₂ O	0.11	0.20	0.08	0.16
K ₂ O	0.05	0.15	0.22	0.00
Total (wt %)	84.33	84.66	85.34	86.09
H ₂ O(c) (wt %)	12.23	12.06	13.61	13.74
Si	4.09	4.28	4.02	4.02
Al	2.12	1.69	3.76	3.84
Fe(2+)	1.12	1.42	0.18	0.18
Mn	0.02	0.00	0.00	0.00
Mg	1.47	1.43	0.09	0.00
Ca	0.02	0.03	0.02	0.00
Na	0.02	0.04	0.01	0.03
K	0.01	0.02	0.02	0.00
OH	8.00	8.00	8.00	8.00
Total (apfu)	16.86	16.90	16.11	16.07
[Si	4.09	4.28	4.03	4.02
Al(IV)	0.00	0.00	0.00	0.00
Total (apfu)] Tetrahedral	4.09	4.28	4.03	4.02
[Al(VI)	2.12	1.69	3.76	3.84
Fe(2+)	1.12	1.42	0.18	0.18
Mn	0.02	0.00	0.00	0.00
Mg	1.47	1.43	0.09	0.00
Total (apfu)] Octahedral	4.73	4.54	4.04	4.02
Octahedral vacant	1.28	1.46	1.97	1.98

Таблица. Продолжение

1	2	3	4	5
Ca	0.02	0.03	0.02	0.00
Na	0.02	0.04	0.01	0.03
K	0.01	0.02	0.02	0.00
Total Interlayer	0.05	0.08	0.05	0.03
Subgroup (R) [12]	di-tri, tri-di	di-tri, tri-di	di-di	di-di
Subgroup (Vacancy) [12]	di-tri, tri-di	di-tri, tri-di	di-di	di-di
Type [12]	Type-II	Type-II	Type-II	Type-II
Species [12]	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite	Al chlorite
Species [10]	Sudoite	Sudoite	Donbassite	Donbassite
Species (This study)	Sudoite	Sudoite	Donbassite	Donbassite

Примечание. Анализы выполнены с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA3, оснащенного аналитической приставкой OXFORD instruments X-MAX80 с фирменным программным обеспечением AZtec (Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский, аналитик Т.М. Философова, оператор Е.И. Сандмирова), и рассчитаны с помощью программы WinCсac [11]. H₂O(c) – рассчитанное содержание H₂O на основе стехиометрии.

Заключение

Хлоритовые минералы в обломках андезибазальтов из кипящего котла Южно-Камбального Центрального термального поля формируются при относительно низкой температуре (менее 100 °С) в щелочной среде. Химический состав хлоритовых минералов зависит от исходного состава породы и отражает изменения физико-химических параметров среды минералообразования. Смена магнезиально-железистого sudoита на маложелезистый донбассит, а затем смектит, и последующее отложение пирита-марказита, свидетельствует о снижении щелочности среды и возрастании окислительного потенциала растворов.

Список литературы

1. Дриц В.А., Коссовская А.Г. Глинистые минералы: слюды, хлориты. М: Наука. 1991. 176 с.
2. Минералы. М.: Наука. 1992. Т. IV. Вып. 2. 662 с.
3. Русинов В.Л. Метасоматические процессы в вулканических толщах. М.: Наука. 1989. 214 с.
4. Рычагов С.Н., Кравченко О.В., Нурдаев А.А. и др. Южно-Камбальное Центральное термальное поле: структурное положение, гидрогеохимические и литологические характеристики // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы XXIII научной конференции, посвященной Дню вулканолога. Петропавловск-Камчатский, 2020. С. 198-201.
5. Фролова Ю.В., Рычагов С.Н., Чернов М.С. и др. Инженерно-геологические аспекты изменения вулканогенных пород в зоне кислотного выщелачивания Южно-Камбальных термальных полей (Южная Камчатка) // Инженерная геология. 2020. Т. XV. № 1. С. 36-51. DOI: 10.25296/1993-5056-2020-15-1-36-51
6. De Caritat P., Hutcheon I., Walshe J.L. Chlorite geothermometry: a review // Clays and Clay Minerals. 1993. V. 41. № 2. P. 219-239.
7. Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. Layered Silicates Excluding Micas and Clay Minerals / Volume 3B: The Geological Society of London. 2009. 314 p.
8. Kranidiotis P., MacLean W. Systematic of chlorite alteration the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec // Economic Geology. 1987. V. 82. P. 1898-1911.
9. Sudo T., Shimora S. Clays and Clay Minerals of Japan / Developments in sedimentology. 1978. V. 26. Kadasha LTD. Tokyo. 326 p.
10. Wiewióra A., Weiss Z. Crystallochemical classifications of phyllosilicates based on the unified system of projection of chemical composition: II. The chlorite group // Clay Minerals. 1990. № 25. P. 83-92.
11. Yavuz F., Kumral M., Karakaya N. et al. A Windows program for chlorite calculation and classification // Computers & Geosciences. 2015. № 81. P. 101-113.
12. Zane A., Weiss Z. A procedure for classifying rock-forming chlorites based on microprobe data // Rendiconti Lincei Scienze Fisiche e Naturali. 1998. Serie 9. P. 51-56.

Минеральный состав пепловых котлов пирокластического потока извержения вулкана Молодой Шивелуч 11 апреля 2023 г.

Сергеева А.В., Фролов В.И., Назарова М.А., Кузьмина А.А., Карташева Е.В.

Mineralogy of the rootless fumaroles associated with the 2023 eruptive deposits of the Shiveluch volcano

Sergeeva A.V., Frolov V.I., Nazarova M.A., Kuzmina A.A., Kartasheva E.V.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: anastavalers@gmail.com*

Исследованы минеральные ассоциации, сформировавшиеся на бортах пепловых котлов, которые образовались в результате схода пирокластического потока со склонов вулкана Шивелуч во время извержения в апреле 2023 года. Минеральный состав определяется температурой, влажностью, поступлением и концентрированием растворимых солей, сопряженных с пирокластическим материалом.

Введение

10-13 апреля 2023 г. произошло сильнейшее за 60 лет извержение вулкана Шивелуч [1]. В результате извержения от купола Молодой Шивелуч в южном и юго-восточном направлении сошел крупный пирокластический поток, который разделился на несколько рукавов. Под тридцатиметровой толщей пирокластических отложений оказалась часть долины реки Кабеку, к юго-востоку от вулкана Шивелуч. Фронт этого рукава, по данным спутниковых снимков, находится приблизительно в 20 км от купола, при ширине рукава до первых километров. В результате постэруптивной природной деятельности, в первые месяцы после извержения на поверхности пирокластических отложений сформировались структуры, которые для простоты описания можно охарактеризовать как «пепловые котлы» (рис. 1, 2а, г). Они формируются в результате деятельности так называемых «бескорневых фумарол» [2]. Взрывное испарение метеорной воды, которая в ходе фильтрации сквозь толщу пирокластических отложений достигает захороненных дегазирующихся глыб с температурами до нескольких сотен градусов, приводит к образованию котлов диаметром от десятков сантиметров до 1.5-2 метров на поверхности пирокластической толщи. При этом в приповерхностном слое и на поверхности вокруг котлов наблюдается фонтанирование пеплов и большое количество вторичных минералов разнообразного состава.



Рис. 1. Пепловый котел на пирокластическом потоке вулкана Молодой Шивелуч. Сентябрь 2023 г.

В ходе полевых работ в сентябре и ноябре 2023 года в центральной части пирокластического потока выполнен отбор образцов вторичных минералов, образовавшихся в результате деятельности пепловых котлов, как на поверхности пирокластических отложений, так и в приповерхностной части. На момент отбора образцов, по данным измерений с использованием термопары, температуры в приповерхностной части (менее 1 м) толщи пирокластических отложений составляли до 360 и до 300 °С в сентябре и ноябре, соответственно (рис. 2б, в). В ходе полевых работ в апреле-августе 2023 года были отобраны образцы пепла вулкана Шивелуч, изучены растворимые соли пепла. На основании солевого состава пепловых образцов можно спрогнозировать состав минеральных ассоциаций, которые могли бы образоваться в ходе предполагаемой фумарольной активности.



Рис. 2. Пирокластический поток извержения вулкана Молодой Шивелуч 11 апреля 2023 г.: а – пример пеплового котла с диаметром на поверхности приблизительно 1.5 м; б – измерение температуры в котле в середине сентября 2023 г., показания термопары – 358 °С; в – измерение температуры в котле в начале ноября 2023 г., показания термопары – 295 °С; г – пример пеплового котла с масштабом в районе долины реки Кабеку, 1 ноября 2023 г.

Материалы и методы

Методами рентгеновской дифрактометрии и инфракрасной спектроскопии были исследованы минеральные ассоциации, сформировавшиеся на бортах пепловых котлов. Инфракрасные спектры были записаны с помощью инфракрасного спектрофотометра с преобразованием Фурье, IRAffinity-1 (Shimadzu), в диапазоне волновых чисел 400-4000 см^{-1} , с разрешением 4 см^{-1} , число сканов 100. Образцы для исследования были растерты в агатовой ступке с бромидом калия и спрессованы в таблетки. Дифрактограммы записаны с помощью рентгеновского дифрактометра XRD MAX 7000 (Shimadzu), в диапазоне 6-65 2θ , с шагом 0.1 2θ , скорость сканирования 2 град/мин, при вращении образца.

Результаты и обсуждение

Исследование водорастворимых солей пепла вулкана Шивелуч от извержения 10-13 апреля 2023 г. показало, что основными солями являются сульфат кальция, хлорид натрия, в меньших количествах присутствуют сульфаты и хлориды магния, алюминия, аммония, калия. Предварительный прогноз макроминерального состава, каким бы он был в случае фумарольной/парогазовой активности на продуктах извержения Шивелуча, в том числе на пеплах и пирокластических потоках, привел к заключению, что доминировать будут сульфаты кальция различной степени гидратации – ангидрит, бассанит, гипс, минералы группы ярозита, алунита, кислые сульфаты типа летовичита или иных гидросульфатов. Микроминеральный состав должен быть намного богаче, он определяется многофакторными условиями фильтрации вод сквозь толщу и взаимодействием «вода-порода», а также локальными условиями.

Исследование минерального состава ассоциаций, образованных в пепловых котлах, подтвердило предварительные прогнозы, показало доминирование сульфата кальция различной степени гидратированности – гипса, бассанита, ангидрита, минералов группы алунита и ярозита, встречается хлорид натрия – галит. Также присутствуют летовичит и его аналоги, условно обозначенные как $\text{Na}_3\text{H}(\text{SO}_4)_2$. Сульфат трехвалентного железа встречается в виде двойных солей типа сабейита и твердых растворов на его основе (рис. 3). Водорастворимые соли пеплов и пирокластических потоков послужили основой для формирования минералов на бортах пепловых котлов, которые формируются в результате взрывного испарения метеорных вод, достигших погребенных под толщей раскаленных глыб.

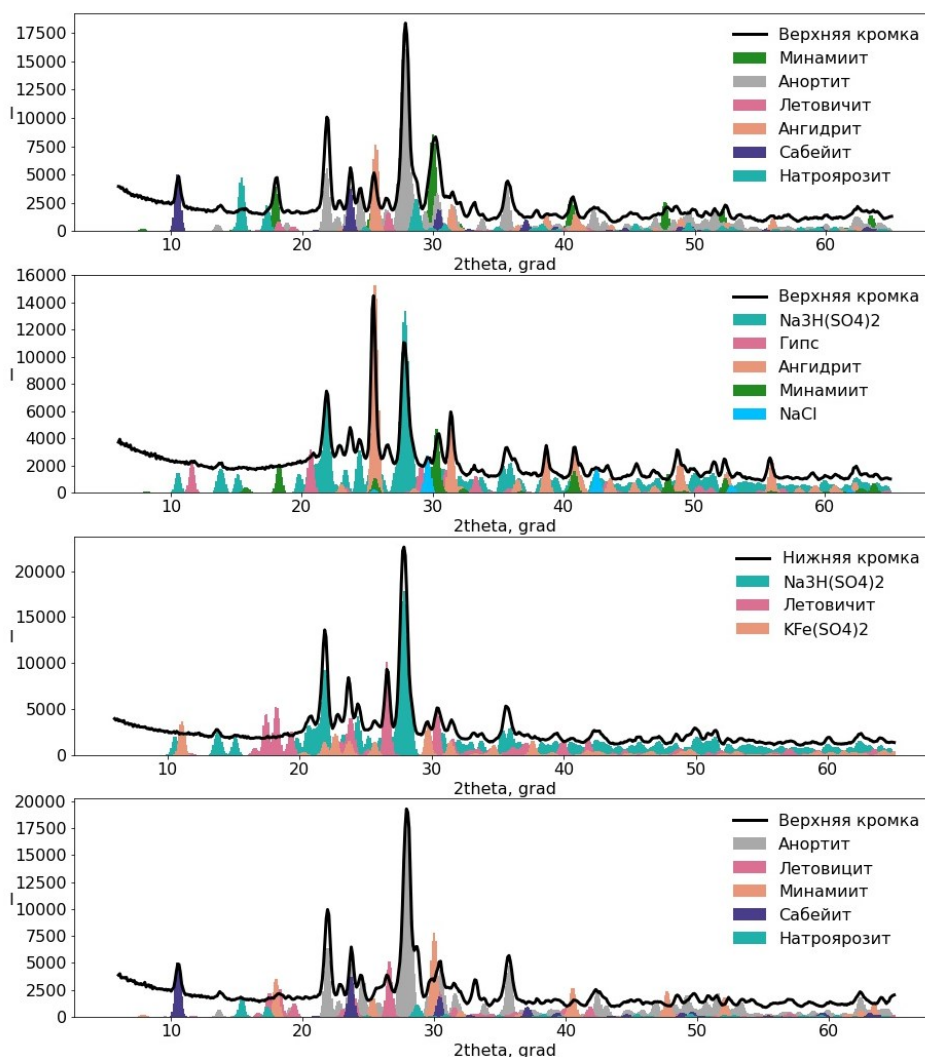


Рис. 3. Дифрактограммы различных участков с бортов пепловых котлов.

Заключение

В ходе извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 г. с купола Молодой Шивелуч сошел крупный пирокластический поток, под многометровой толщей пирокластических отложений оказались погребены медленно остывающие раскаленные дегазирующиеся глыбы. Метеорные воды, фильтрующиеся сквозь отложения, достигают этих глыб и нагреваются до нескольких сотен градусов, вплоть до закритических температур, переходя в пар и образуя парогазовую смесь, выход которой на поверхность проявляется в виде фонтанирующих пепловых котлов, с температурой на выходе ~300-350 °С. Минеральный состав котлов определяется растворимыми солями изверженного материала, на бортах доминируют сульфаты кальция, минералы группы алунита и ярозита, двойные и кислые сульфаты.

Список литературы

1. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291.
2. *Гирина О.А., Нуждаев А.А.* О некоторых особенностях извержения вулкана Молодой Шивелуч, Камчатка, 22 сентября 2005 г. // Вулканология и сейсмология. 2014. № 4. С. 20-30.

Ультракислые и ультращелочные воды Курило-Камчатского региона. Формирование и смежные проблемы

Таран Ю.А., Калачева Е.Г.

Ultra-acidic and ultra-alkaline waters of the Kuril-Kamchatka region. Formation and related issues

Taran Yu.A., Kalacheva E.G.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

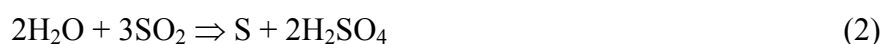
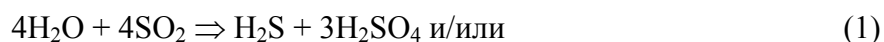
e-mail: keg@kscnet.ru

Обсуждаются проблемы формирования двух «экстремальных» типов природных вод: ультракислых с $\text{pH} < 3$ и ультращелочных с $\text{pH} > 11$, встречаемых на Камчатке и Курильских островах. Также затрагиваются вопросы, связанные с формированием и поведением этих вод.

Введение

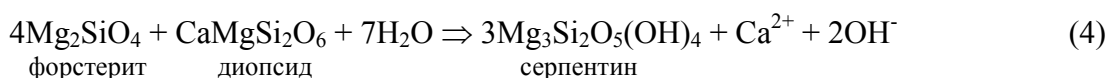
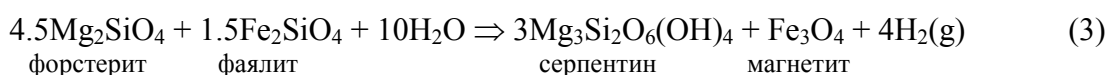
На Земле встречаются два «экстремальных» типа природных вод: ультракислые с $\text{pH} < 3$ и ультращелочные с $\text{pH} > 11$. Ультракислые воды ассоциируются с современным вулканизмом и являются результатом растворения магматических газов в грунтовой воде. Ультращелочные воды на поверхности Земли связаны с массивами ультраосновных магматических пород, часто достаточно древних, и образуются за счет современной серпентинизации этих пород под действием грунтовых вод. На Курилах ультракислые воды известны на нескольких островах, от о. Парамушир на севере до о. Кунашир на юге. На Камчатке ультракислые воды представлены кратерным озером вулкана Малый Семячик и котлами в кратере вулкана Мутновский. Ультращелочные воды известны только на Камчатке, на п-ве Камчатский Мыс.

Определим понятие ультракислые воды. В данной работе мы принимаем, что это воды хлоридно-сульфатного или сульфатно-хлоридного состава (в зависимости от мольного отношения SO_4/Cl) с $\text{pH} < 3$. Они формируются в вулканических постройках в результате растворения в приповерхностных водах магматического HCl и рекомбинации в воде магматического SO_2 по следующим реакциям:



В результате образуется смесь соляной и серной кислот. Эти воды встречаются в виде источников/кратерных озер и, как правило, имеют достаточно высокую минерализацию. В некоторых кратерных озерах, за счет комплекса процессов, в том числе испарения с поверхности воды, минерализация может достигать 100 г/л и более. При этом pH иногда достигает отрицательных значений. Источники с ультракислой водой $\text{SO}_4\text{-Cl}$ (Cl-SO_4) типа чаще всего характеризуются высокими расходами, десятки литров в секунду.

Напротив, ультращелочные воды почти всегда очень мало минерализованы, и источники таких вод имеют очень низкие расходы, иногда это просачивания в несколько мл/сек. Серпентинизация, приводящая к образованию таких вод, может быть формализована в виде двух уравнений:



Первое уравнение отвечает окислению оливина с образованием водорода (восстановительной обстановки), а второе показывает гидролиз пироксена с образованием гидроксил-иона, т.е. щелочной среды.

Оба типа вод географически широко распространены, но достаточно редки. Их распространение показано на карте (рис. 1). Положение ультракислых источников представлено согласно [8], а щелочных вод офиолитовых комплексов – согласно [6]. В обоих случаях показаны не все проявления, а только достаточно подробно представленные в литературе. Заметим также, что ультращелочные источники на территории России впервые найдены на Камчатке, в пределах офиолитового комплекса горы Солдатской на п-ве Камчатский Мыс [3, 4].

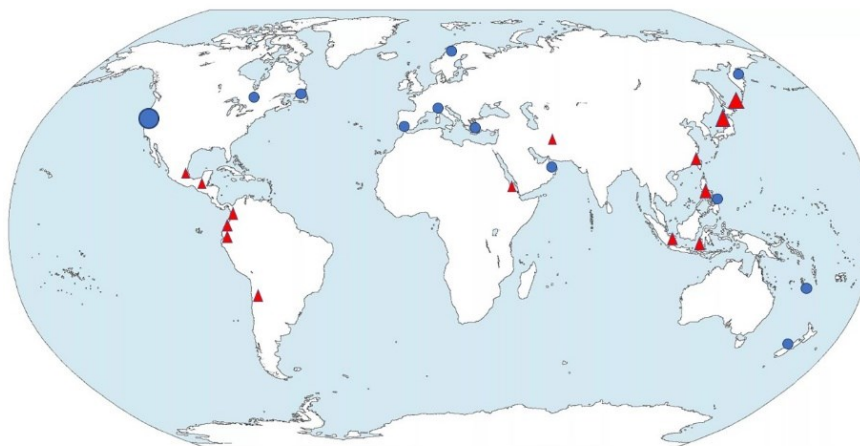


Рис. 1. Распространение ультракислых (треугольники) и ультращелочных (кружки) вод. Крупные символы означают, что в этих регионах имеется несколько (больше двух) проявлений.

Ультракислые воды Курильских островов и полуострова Камчатка

На островах Курильской дуги существуют 12 вулcano-гидротермальных систем, характеризующихся наличием горизонтов ультракислых $\text{SO}_4\text{-Cl}$ (Cl-SO_4) типов вод [1]. Наиболее мощные разгрузки приурочены к вулканам Эбеко (о. Парамушир), Синарка (о. Шиашкотан), Баранского (о. Итуруп), Менделеева и Головнина (о. Кунашир). В таблице 1 показаны составы наиболее минерализованных источников в этих группах.

Таблица 1. Химический (мг/л) состав кислых ASC-вод Курильских островов [1, 8] и кратерного озера вулкана Малый Семячик (Камчатка) [2]

№	Вулкан	Источники	t °C	pH	SO_4^{2-}	Cl^-	F^-	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Al	Fe
1	Эбеко	Верхне-Юрьевские	89.0	1.4	8880	3192	84	225	113	381	161	505	251
2	Синарка	ЦЭК, площадка № 1	51.0	2.7	1538	2538	0.2	385	29.8	545	501	49.1	106
3	Баранского	Голубые озера	95.1	1.2	4865	1838	31	112	44.6	147	38	165	47
4	Менделеева	Нижне-Менделеевские	84.0	2.0	1157	1135	1.3	393	40	128	55.3	30.9	179
5	Головнина	оз. Кипящее (сток)	35.0	2.4	475	756	2.1	279	37.6	108	47.4	12.1	12.8
6	Малый Семячик	оз. Зеленое	8.0	0.86	13682	3410	279	182	53.7	531	182	638	453

Основные гидрохимические особенности этих вод рассматриваются в обзоре [8] и кратко сводятся к следующему:

– Состав ультракислых вод зависит от состояния вулкана-хозяина и меняется во времени. Кроме обычных для всех типов вод сезонных изменений, наблюдаются долговременные изменения отношений концентраций (например, SO_4/Cl), общей минерализации и расхода.

– Основными макрокомпонентами вод становятся ионы алюминия и железа. Сумма их концентраций тем выше, чем ниже pH.

– Относительные концентрации катионов часто ложатся в область составов вмещающих пород. Если это не так, то, например, относительное увеличение Na может свидетельствовать о смешении с более глубинными хлоридно-натриевыми водами.

– Изотопный состав воды соответствует смеси магматического пара и метеорной воды: чем выше концентрация хлорид-иона, тем выше доля магматической компоненты.

– В отличие от кратерных озер, источники по-разному откликаются на вулканическую активность. Время отклика зависит от времени водообмена, расстояния до активного кратера и других параметров вулcano-гидротермальной системы.

Солдатские источники – ультращелочные воды п-ва Камчатский мыс

Эти источники были открыты в 2012 г., и первая информация о них была представлена ровно 10 лет назад на конференции, посвященной Дню вулканолога, в 2014 г. [3]. В 2022 г. было проведено первое комплексное изучение этих источников, включающее отбор проб воды, измерения концентраций растворенного водорода в источниках, отбор травертинов [4]. В 2023 г. работы были продолжены, найдена еще одна группа холодных (2-3 °С) щелочных источников, а к комплексу анализов добавлены анализы изотопных отношений и содержания стронция в травертинах (табл. 2).

Таблица 2. Химический состав (мг/л) щелочных источников г. Солдатской п-ва Камчатский Мыс и изотопный состав их травертинов ($\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$, ‰ V-PDB) [4]. Концентрация растворенного водорода в ммоль/л

Источник	pH	t °C	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ^{-*}	$\delta^{13}\text{C}$	$\delta^{18}\text{O}$	H ₂ (aq)
Б3	10.9	6.2	15	1.5	14	4	10	1.4	93	-12.4	-9.2	
Б7	11.5	4.2	47	1.9	2	0.7	32	0.6	116	-10.7	-9.5	0.047
Б10	12.3	6.6	172	3.3	3	0.3	162	0.4	245	-17.7	-17	0.77
Б44	12.3	3.2	269	5.2	1.4	0.15	222	0.2	152	-13.0	-12.3	
Б11, р. Белая	8.8	4.3	2.8	0.2	9	8	2.4	1.3	58	-6.2**	-14.7**	

Примечание. *) Общая щелочность (OH⁻+HCO₃⁻+CO₃²⁻); **) Травертин из аллювия р. Белой.

Ультращелочным водам в литературе посвящено много работ [6, и ссылки в ней]. Однако, на территории России это первая и пока единственная находка. Солдатские источники во многом похожи на другие источники, разгружающиеся в пределах ультраосновных массивов: невысокая минерализация, pH доходит до 12 и выше; низкие температуры; растворенный водород; травертин с атмосферным углеродом (проба Б10 показала современный ¹⁴C возраст); изотопный состав углерода и кислорода травертинов с большим интервалом значений. Однако есть и особенности. Во-первых, это самые низкие температуры (до этого, 10 °С было измерено в источниках о. Ньюфаундленд, Канада, [7]). Кроме того, тренд $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ для Солдатских травертинов отличается от известного тренда для других систем [5]. И, наконец, наиболее щелочные воды Солдатских источников относятся к хлоридно-натриевому типу, и их щелочность не Ca-OH типа, как в большинстве известных примеров, а Na-OH типа (табл. 2).

Заключение

На рис. 2 показаны концептуальные модели формирования ультракислых и ультращелочных вод, которые оказываются весьма схожими, несмотря на абсолютно противоположные, «экстремальные» pH. Оба типа вод формируются в постройках (вулкан/массив) выше регионального уровня подземных вод. Область питания для обоих типов вод находится гипсометрически выше, чем область разгрузки. В каждом из рассмотренных случаев формирование вод происходит вблизи поверхности без длительного взаимодействия с вмещающими породами. Именно в «проточной» системе

с коротким временем водообмена возможно формирование «экстремальных» типов вод с крайне высоким или крайне низким значением pH. Однако в первом случае соотношение вода/порода значительно меньше единицы, а во втором – значительно больше единицы. Кроме того, ультракислые воды формируются только в андезитовых/андезито-базальтовых постройках активных вулканов при участии магматических газов и последующего взаимодействия вода-порода, тогда как наземные ультращелочные воды являются результатом современной серпентинизации гипербазитовых пород древних массивов.

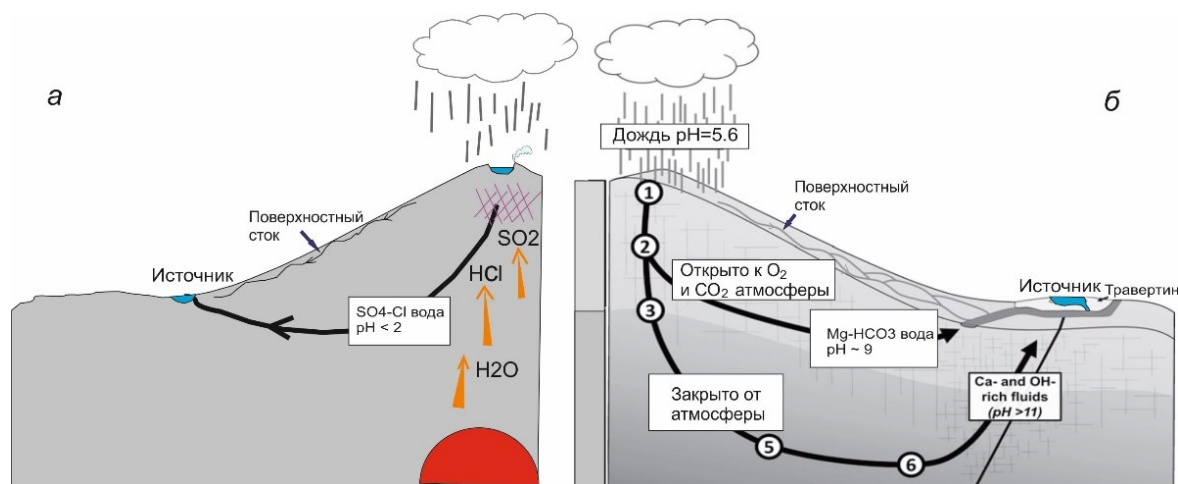


Рис. 2. Модели образования ультракислых (а) и ультращелочных (б) вод.

Список литературы

1. Калачева Е.Г. Химический состав и условия формирования ультракислых термальных вулканических вод Курильской островной дуги // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 97-103.
2. Калачева Е.Г., Мельников Д.В., Волошина Е.В., Карнов Г.А. Геохимия вод кратерного озера вулкана Малый Семячик // Вулканология и сейсмология. 2022. № 3. С. 28-42. <http://doi.org/10.31857/S0203030622030026>
3. Новаков Р.М., Савельев Д.П., Белова Т.П., Паламарь С.В. Травертины Камчатского Мыса // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27-28 марта 2014 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 97-103.
4. Таран Ю.А., Савельев Д.П., Пальянова Г.А., Покровский Б.Г. Щелочные воды ультраосновного массива г. Солдатской (Камчатка) // Доклады РАН. Науки о Земле. 2023. Т. 510. № 1. С. 30-37. <https://doi.org/10.31857/S2686739722602897>
5. Christensen J.N., Watkins J.M., Devriendt L.S. et al. Isotopic fractionation accompanying CO₂ hydroxylation and carbonate precipitation from high-pH waters // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2021. V. 301. № 15. P. 91-115. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.01.003>
6. Leong J.A.M., Shock E.L. Thermodynamic constraints on the geochemistry of low-temperature continental serpentinization-generated fluids // *American Journal of Science*. 2020. V. 320. № 3. P. 185-235. <https://doi.org/10.2475/03.2020.01>
7. Morrill P.L., Brazelton W.J., Kohl L. et al. Investigations of potential microbial methanogenic and carbon monoxide utilization pathways in ultra-basic reducing springs associated with present-day continental serpentinization: The Tablelands, NL, CAN // *Frontiers in Microbiology*. 2014. V. 5. Art. 613. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2014.00613>
8. Taran Y., Kalacheva E. Acid sulfate-chloride volcanic waters. Formation and potential for monitoring of volcanic activity // *Journal of Volcanology and Geothermal Recourse*. 2020. V. 405. Art. 107036. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2020.107036>

Диффузионный поток CO_2 в Долине смерти, вулкан Кихпинич, Камчатка

Тарасов К.В., Таран Ю.А.

The CO_2 flux in Death Valley of Kikhpinych volcano, Kamchatka

Tarasov K.V., Taran Yu.A.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: belfast@kscnet.ru

В работе представлены результаты измерений диффузного потока CO_2 в Долине смерти, полученных методом накопительной камеры. Измерения проведены во время полевых работ в августе 2023 г.

Введение

В самых верховьях реки Гейзерная, на западном склоне вулкана Кихпинич, на высоте около 900 м находится Долина смерти [2, 3] (рис. 1). Эта долина, открытая в 1975 г. В.Л. Леоновым, известна тем, что время от времени в нижней ее части находят трупы животных, погибших от скопления CO_2 в понижениях рельефа. В составе свободного газа, отобранного в 1979 г. из выхода в ручье, протекающем по Долине [1], преобладал CO_2 (96 %) с примесью сероводорода (0.2 %). Однако измерений потока и общего расхода этого газа с поверхности Долины смерти не проводилось.



Рис. 1. Географическое положение Долины смерти и общий вид в августе 2023 г.

Измерение потока CO_2 (FCO_2) из почвы в вулканических районах стало рутинной процедурой после начала использования метода накопительной камеры [6]. Появилось достаточно много работ по измерениям диффузного потока CO_2 (FCO_2) со склонов и кратеров вулканов, гидротермальных полей, тектонически подвижных районов [8]. Процедура обработки результатов площадных измерений, основанная на геостатистических методах, разработана [6] и [5].

Диффузный поток газа из почвы обычно измеряют в единицах $\text{г/м}^2/\text{сутки}$. Максимальные потоки, насколько нам известно, были измерены в кратере Сольфатары (Флегрейские Поля, Италия) и составляли до $72\,000\ \text{г/м}^2/\text{с}^{-1}$ [4, 5]. Как правило,

обработка данных, полученных в вулканических районах, показывает, что имеются по крайней мере две так называемые популяции в общем потоке CO_2 : почвенный (биогенный) CO_2 , связанный с окислением органического вещества почвы, и CO_2 метаморфической, гидротермальной и/или вулканической природы. В первом случае FCO_2 не превышает нескольких десятков $\text{г/м}^2/\text{с}^{-1}$, во втором – до десятков тысяч $\text{г/м}^2/\text{с}^{-1}$.

Методы

Измерения FCO_2 проводились методом накопительной камеры PP Systems EGM-5 (США) в 100 случайных точках нижней части Долины смерти на площади примерно 0.6 га (рис. 2). Прибор состоит из накопительной камеры объемом 1171 мл и инфракрасного газоанализатора CO_2 с диапазоном измерений 0-100000 ppm (здесь и далее имеются в виду объемные концентрации, ppmV). Камера плотно устанавливается на пластиковое кольцо, погруженное в почву, чтобы исключить поступление атмосферного газа. Грунтовый газ циркулирует из камеры в анализатор и обратно через пластиковые трубки с помощью воздушного насоса. Поток измеряется в течение двухминутного цикла расчетом разницы концентрации CO_2 в камере в начале и в конце измерения. Обработка результатов проводилась геостатистическими методами, следуя рекомендациям [6] и [5]. Одновременно измерялась температура почвы на глубине 10 см. Измерения производились в сухих и стабильных метеорологических условиях.

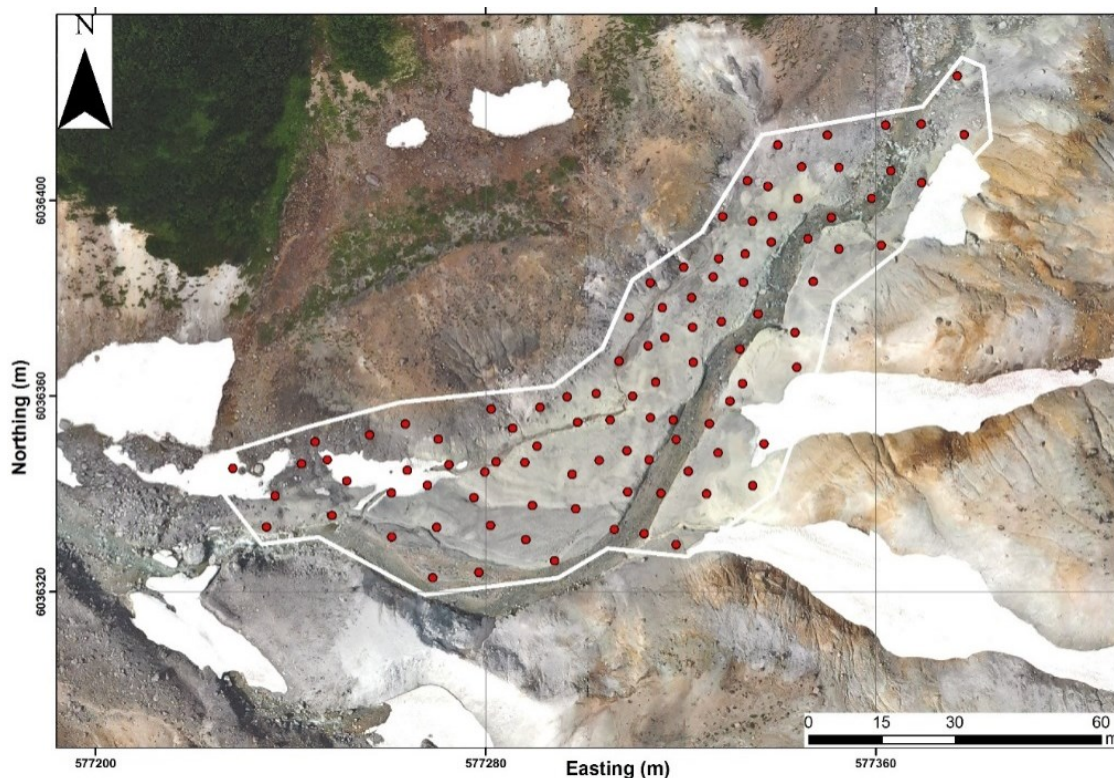


Рис. 2. Точки в Долине смерти, в которых проводились замеры FCO_2 . Ортофотоплан Д.В. Мельникова.

Результаты и обсуждение

Измеренные потоки CO_2 варьируют от 0 до 28 980 $\text{г/м}^2/\text{с}^{-1}$. Максимальная величина сравнима со значениями, полученными на активных сольфатарных полях, например, на Сольфатаре (Флегрейские поля, Италия). На рис. 3 приведена гистограмма значений FCO_2 , показывающая распределение, близкое к логнормальному, а также соответствующий вероятностный график, близкий к линейному в этих координатах.

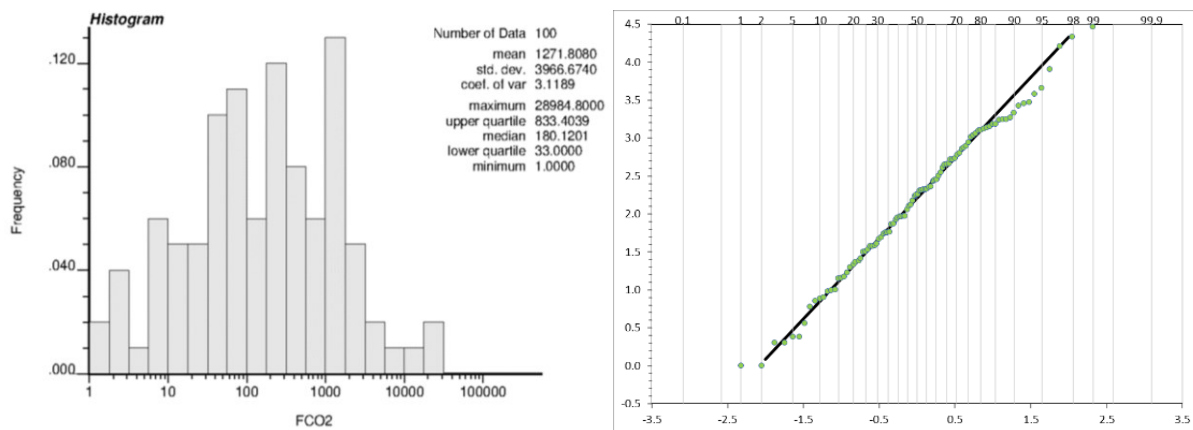


Рис. 3. Гистограмма и график распределения значений FCO_2 .

Это означает, что имеется лишь одна популяция значений FCO_2 , и что вклад почвенного CO_2 – продукта окисления почвенной органики – незаметен: CO_2 имеет гидротермальную природу.

В пределах Долины смерти и вверх по склону вулкана нигде не были обнаружены выходы свободных газов. В нескольких точках, с высоким, средним и низким измеренным потоком CO_2 , был отобран почвенный газ. Для этого выкапывался небольшой шурф, примерно $30 \times 30 \times 30 \text{ см}^3$, и газ отбирался в вакутейнеры объемом 10 мл через воронку, подкопанную в дно шурфа. Участки с различными потоками CO_2 отличались проницаемостью почвы: вода, залитая в шурфы в точках с высокими FCO_2 , сразу же исчезала, просачивалась через дно, задерживалась на некоторое время в точках со средним потоком и оставалась неопределенно долго там, где поток был низкий.

Карта распределения FCO_2 по площади (рис. 4), построенная методом гауссовой симуляции (sGs – sequential Gaussian simulation – [5, 7]), показывает, что максимальные значения образуют некую зону проницаемости северо-восточного простирания, возможно, связанную с локальной тектоникой. Общий поток CO_2 с площади измерений (0.65 га) рассчитан тем же методом и составил 7.9 т/сутки при среднем потоке $1272 \text{ г/м}^2/\text{с}^{-1}$.

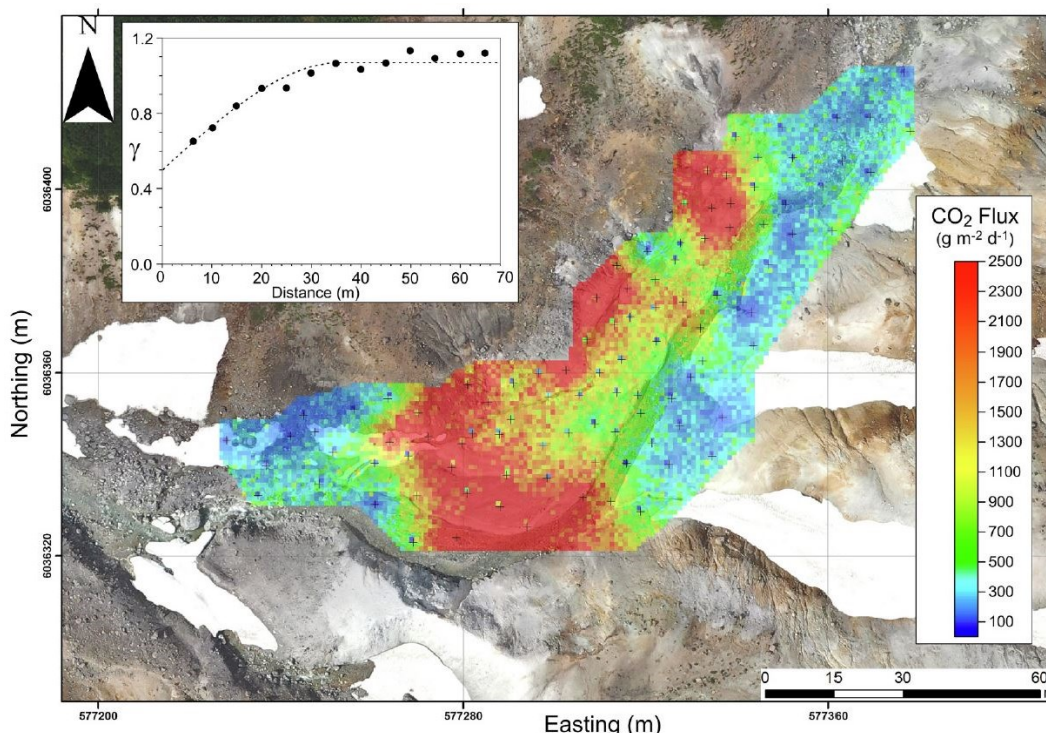


Рис. 4. Карта потока CO_2 и вариограмма, дающая параметры усреднения для метода sGs.

Температура почвы нигде не превышала 18 °С и не коррелировала с потоком CO₂, а в основном отражала погодные условия: в солнечное время была выше и наоборот.

Площадь дегазации в Долине смерти оказалась весьма ограниченной. Были проведены контрольные измерения вокруг главной площади, которые показали низкие FCO₂, ниже 3 г/м²/с⁻¹. Согласно [5], поток CO₂ кратера Сольфатара на Флегрейских полях измерялся с площади 140 га. При этом самые высокие потоки в точках отмечались на Сольфатаре, до 30 000 г/м²/с⁻¹ в 1998 г. и до 72 000 г/м²/с⁻¹ в период активизации в 2015-2016 гг. Однако на Сольфатаре точки с высокими потоками всегда показывали высокую температуру, вплоть до 96 °С [4]. При этом в пределах Сольфатары разгружаются мощные паровые струи с температурой до 160 °С, т.е. источником CO₂ служит геотермальный перегретый пар с содержанием CO₂ 20-30 вес. %. Средний поток с поверхности Сольфатары за все время наблюдений с 1998 по 2016 гг. оценивается в 1 210 г/м²/с⁻¹ [4]. Таким образом, средний поток с дегазирующей поверхности Долины смерти, 1 270 г/м²/с⁻¹, сравним с диффузионным потоком CO₂, производимым одним из самых активных термальных полей мира.

Заключение

Долина смерти на Камчатке отличается высоким диффузионно-адвекционным потоком диоксида углерода с небольшой площади (0.65 га). Измеренный средний поток составляет 1 272 г/м²/с⁻¹, а максимально измеренный поток – около 30 000 г/м²/с⁻¹, что сравнимо со средним и максимальными потоками почвенного CO₂ активных термальных полей с интенсивной сольфатарной деятельностью. Общий расход CO₂ около 8 тонн/сутки с дегазирующей поверхности соответствует конденсации более 3 кг/с геотермального пара на глубине, под непроницаемой толщей измененных пород.

Список литературы

1. Карпов Г.А., Заварзин Г.А., Миллер Ю.М. Состав воздуха и спонтанных газов в Долине смерти на Камчатке // Вулканология и Сейсмология. 1983. № 5. С. 107-110.
2. Леонов В.Л. Как была «открыта» Долина смерти на Камчатке. Труды Кроноцкого государственного природного биосферного заповедника. Выпуск 4. / отв. ред. Е.Г. Лобков. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2015. 180 с.
3. Andrews R.G. The History and Mystery of Russia's 'Valley of Death'. 2019. (<https://www.atlasobscura.com/articles/russian-valley-of-death>)
4. Cardellini C., Chiodini G., Frondini F. et al. Monitoring diffuse volcanic degassing during volcanic unrests: the case of Campi Flegrei (Italy) // Scientific Reports. 2017. № 7. Art. 6757. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06941-2>
5. Cardellini C., Chiodini G., Frondini F. Application of stochastic simulation to CO₂ flux from soil: Mapping and quantification of gas release // Journal of Geophysical Research. 2003. V. 108. № B9. Art. 2425. <https://doi.org/10.1029/2002JB002165>
6. Chiodini G., Cioni R., Guidi M. et al. Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas // Appl. Geochem. 1998. № 13. P. 543-552.
7. Deutsch C.V., Journel A.G. GSLIB: Geostatistical Software Library and Users Guide. Oxford University Press, 1998. V. 136.
8. Werner C., Fischer T., Aiuppa A. et al. Carbon Dioxide emission from subaerial volcanic regions. Two decades in review. In: Deep Carbon. Past to Present. Cambridge University Press, 2019. P. 188-236.

Разрывные нарушения и гидротермально-магматические системы центральной части о. Итуруп

Хубаева О.Р., Сергеева А.В.

Fracture faults and hydrothermal-magmatic systems in the central part of Iturup Island Khubaeva O.R., Sergeeva A.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: grifon03@yandex.ru

Построены 3D модель тектонической раздробленности пород, модели гидротермально-магматических систем, расположенных в районе центральной части о. Итуруп. Выделяется несколько гидротермально-магматических систем, которые тяготеют к современным вулканическим аппаратам или остывающим субвулканическим интрузиям древних вулканических центров, служащих источниками термальных вод и эндогенного тепла.

Гидротермальные проявления центральной части о. Итуруп приурочены, в основном, к вулканическому хребту Грозный и вулканам Богдан Хмельницкий и Чирип. Хребет Грозный протягивается примерно на 45 км от перешейка Ветровой до Куйбышевского перешейка. Термальные воды хребта Грозный выходят в пределах вулканов Баранского, Тебенькова, Мачеха, Иван Грозный, а также на южной периферии в районе с. Горячие Ключи. К гидротермам центральной части острова также можно отнести скважину № 13к в районе г. Курильск, источники вулканов Чирип и Богдан Хмельницкий на полуострове Чирип, Рейдовские термальные источники в районе с. Рейдово [1].

На рисунке показаны катионный и анионный составы природных вод термальных источников и скважин о. Итуруп. Наиболее минерализованные хлоридно-сульфатные и хлоридные натриевые воды. Гидрокарбонатные воды скважин пресные, медианное содержание гидрокарбонат-иона 67 мг/л, содержание сульфата и хлорид-ионов 26 и 80 мг/л, соответственно. Медианное значение суммы натрия и калия 72.5 мг/л, кальция 24 мг/л, магния 9 мг/л. Разнообразие типов вод о. Итуруп связано со сложными условиями смешения и фильтрации поверхностных, ювенильных, термальных и, вероятно, морских вод, что определено геоморфологическими факторами острова. Циркуляция подземных вод во многом зависит от степени тектонической трещиноватости. Зоны с высокой плотностью трещин служат индикаторами разломных зон и крупных разрывных нарушений. Тектонические нарушения определяют структуру исследуемой площади, могут распространяться на большие глубины, образуя пути для восходящих потоков нагретых вод глубокой циркуляции к поверхности Земли.

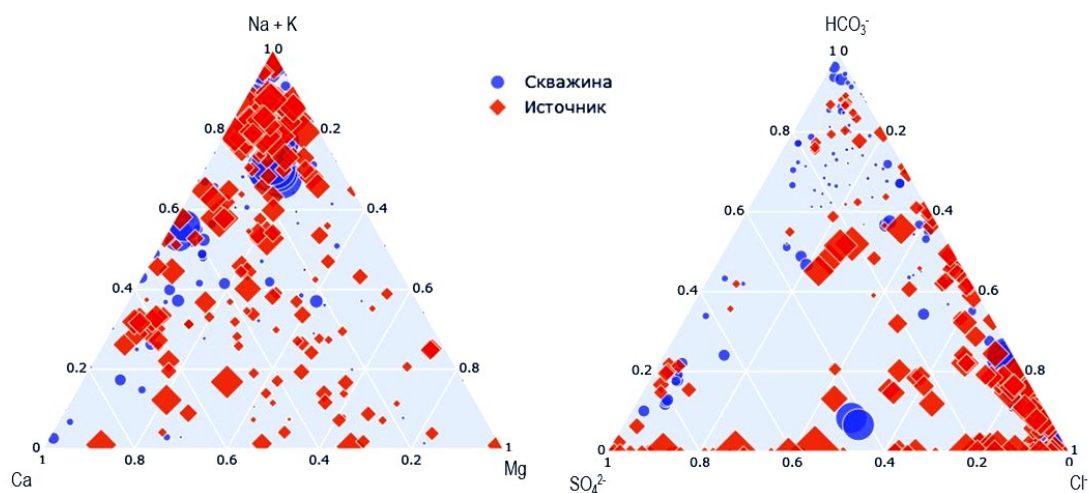


Рисунок. Ионный состав вод термальных источников и скважин о. Итуруп, размер значка пропорционален минерализации воды [1].

Для центральной части о. Итуруп была построена 3D модель тектонической раздробленности с целью уточнения проницаемых зон верхней части земной коры. В разное время в этом районе исследователями [7] выделялась серия крупных разрывных нарушений СВ простирания, которые также прослеживаются на 3D модели тектонической раздробленности в виде зон с высокой тектонической деструкцией. Высокая плотность трещин в вулканических районах часто наблюдается над внедренными магматическими телами. На границах таких зон нередко существуют области перехода участков питания метеорных и ювенильных вод и, как следствие, на поверхности наблюдаются термальные проявления.

На горизонтальных срезах трехмерной модели тектонической раздробленности блока пород для центральной части о. Итуруп видно, что зоны с наибольшей степенью деструкции распространены в центре исследуемого района и вытянуты в СВ и СЗ направлениях. При этом СЗ направление выражено лучше, чем СВ. Это связано с тем, что на о. Итуруп наиболее древние глубинные и протяженные дислокации ориентированы в СВ направлении [5], они образуют широкие зоны за счет субпараллельных нарушений. Разрывные нарушения данной системы частично погребены под современными отложениями, поэтому слабо фиксируются на космоснимках, но проявляются на 3D модели тектонической раздробленности блока пород. Разломы этого направления на о. Итуруп контролируют распределение интрузивных образований, имеющих, по разным оценкам, палеоцен-миоценовый возраст [5]. Для разрывных нарушений этого направления характерна сложная сбросовая, реже сдвиго-сбросовая кинематика, которая устанавливается по фокальным механизмам очагов землетрясений и по морфологии Центрально-Кунаширского сброса [5].

В центральной части о. Итуруп расположено несколько палеовулканических центров. На о. Итуруп такие разрывные нарушения связаны с вулканической активностью. Здесь выделяются серии радиально-кольцевых разломов у построек одиночных вулканов. Среди кольцевых форм преобладают кальдеры. Такие разрывные нарушения нередко являются подводными каналами для циркуляции парогидротерм.

Южнее, в районе хр. Грозного, выделяется вулканоконтролирующее нарушение СВ направления. Вдоль этого разрывного нарушения расположено большинство действующих вулканов центральной части острова. Однако, по данным 3D модели тектонической раздробленности, зоны с высокой плотностью трещин часто прерываются. Это объясняется тем, что более древние разрывные нарушения СВ простирания перекрыты молодыми отложениями. Наиболее молодые тектонические нарушения имеют преимущественно СЗ направление и отчетливо проявлены на 3D модели тектонической деструкции. На геологических картах данные разрывные нарушения сопровождаются субвулканическими телами плиоценового возраста, что позволяет предположить их достаточно глубинное заложение и неогеновое время формирования. Такого рода глубинные долгоживущие разломы являются подводными каналами для металлоносных растворов, формирующих рудную минерализацию.

Состав термальных источников, приуроченных к палеовулканическим центрам, с высокой степенью тектонической раздробленности и незначительной мощностью современных отложений, зависит от закольматированности трещин вторичными минералами (зона самоизоляции).

Как известно, о. Итуруп характеризуется сложной гидрогеологической обстановкой. В центральной части острова можно наблюдать большое количество термальных источников, разных как по химическому составу, так и по физико-химическим свойствам. Термальные проявления в этом районе связаны с активным вулканизмом и остывающими субвулканическими интрузивными телами, а также обилием атмосферных осадков. По данным исследователей [1-4, 6], термальные источники, приуроченные к постройкам активных вулканов, характеризуются

преимущественно сульфатным или сульфатно-хлоридным составом. Источники, располагающиеся вдоль прибрежных зон, имеют хлоридно-натриевый состав.

По данным вертикального электрического зондирования были выявлены зоны низкоомного сопротивления, связанные с высокотемпературными гидротермально-магматическими системами. Такие участки выделяются в районе с. Рейдово и в прибрежной зоне г. Курильск (ист. Береговые). Наиболее крупный участок с низкоомным сопротивлением приурочен к хр. Грозный и расположен между активными вулканами Баранского и Тебенькова и распространяется в ЗЮЗ направлении в сторону с. Горячие Ключи.

Таким образом, в гидрогеологическом плане центральная часть о. Итуруп представляется как часть единой неоген-четвертичной водонапорной системы, осложненной субвулканическими интрузивными телами и современными вулканическими постройками. Основным источником питания подземных вод являются атмосферные осадки.

Выделяется два гидрогеологических массива: хр. Рубецкий и хр. Грозный, которые являются областями питания для расположенных в вулканотектонических и тектонических депрессиях артезианских бассейнов. Термальные воды, разгружающиеся в прибрежных зонах центральной части о. Итуруп, относятся к субнейтральным хлоридным хлоридно-гидрокарбонатным натриевым водам с минерализацией менее 10 г/л [1, 4]. Воды зон тектонических нарушений отличаются от остальных по температуре и химическому составу.

Очевидно, в центральной части острова Итуруп выделяется несколько гидротермально-магматических систем, каждая из которых тяготеет к современным вулканическим аппаратам или остывающим субвулканическим интрузиям древних вулканических центров, служащих источниками термальных вод и эндогенного тепла.

Список литературы

1. *Жарков Р.В.* Термальные источники Южных Курильских островов / Ред. О.В. Чудаев. Владивосток: Дальнаука, 2014. 378 с.
2. *Знаменский В.С.* Вулканогенные серные руды Курильских островов (геология, петрография, условия образования) // Геохимия и минералогия серы. М.: Наука, 1972. С. 185-212.
3. *Знаменский В.С., Никитина И.Б.* Гидротермы центральной части острова Итуруп (Курильские острова) // Вулканология и сейсмология. 1985. № 5. С. 44-64.
4. *Калачева Е.Г., Котенко Т.А., Волошина Е.В., Эрдниева Д.Ю.* Береговые термальные источники центральной части о. Итуруп: макро- и микроэлементный составы // Вестник КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2022. № 3. С. 31-44.
5. *Крикун Н.С.* Тектоно-магматическая эволюция и рудоносность южной группы островов Большой Курильской гряды (острова Кунашир и Итуруп). Дис. на соиск. уч. ст. канд. геол.-мин. наук. Санкт-Петербург, 2022. 148 с.
6. *Мархинин Е.К., Стратула Д.С.* Гидротермы Курильских островов. М.: Наука, 1977. 212 с.
7. *Таловина И.В., Крикун Н.С., Юрченко Ю.Ю., Агеев А.С.* Дистанционные методы исследования в изучении структурно-геологических особенностей строения о. Итуруп (Курильские острова) // Записки горного института. 2022. № 254. С. 158-172. <https://doi.org/10.31897/PMI.2022.45>

Березиты Талимской и Укурунрунской вулcano-тектонических структур северного сегмента Восточно-Буреинского вулcano-плутонического пояса (Тугурский полуостров, Хабаровский край, Дальний Восток)

Чернышов В.М., Шупилко Е.В., Юрченко Ю.Ю.

Berezites of the Talim and Ukurunru volcano-tectonic structures of the northern segment of the East Bureya volcano-plutonic belt (Tugur Peninsula, Khabarovsk Territory, Far East)

Chernyshov V.M., Shupilko E.V., Yurchenko Yu. Yu.

Всероссийский геологический научно-исследовательский институт им. А.П. Карпинского, г. Санкт-Петербург;

e-mail: Vladislav_Chernychov@vsegei.ru

Впервые для данной территории были изучены гидротермально метасоматические образования на современном уровне. Приведены данные о петрографо-геохимической характеристике, генезисе и площадном распространении березитов и березитизированных пород.

Список использованных сокращений: ser – серицит, qtz – кварц, fsp – калишпат, ab – альбит, chl – хлорит, cc – кальцит, tu – турмалин, py – пирит.

Введение

На сегодняшний день гидротермально-метасоматические образования восточного сегмента Восточно-Буреинского вулcano-плутонического пояса, относящегося к Амурской складчатой области, изучены не в полной мере. В данной работе авторами предпринята попытка исследования метасоматитов, приуроченных к двум вулcano-тектоническим структурам (ВТС): Талимской и Укурунрунской (рисунок), расположенных в районе месторождения «Кутын», относящегося к золото-кварцевой малосульфидной формации, и других установленных проявлений золота и серебра. Изучаемая площадь расположена на территории Тугурского полуострова, относящейся к Хабаровскому краю в рамках номенклатурных листов N-53-XXIII, N-53-XXIV масштаба 1:200 000.

Геологическое изучение Тугурского полуострова, по имеющимся данным, берет начало с середины XIX века. С 1840 по 1898 гг. на территории побывали А.Ф. Миддендорф, Н.Г. Меглицкий, К.И. Богданович [Красный Л.И., 1948 ф.; Авдеев М.И., 1956 ф.]. За всю историю исследования на территории проводились поисковые [Николаев В.Ф., 1980 ф.] и геологосъемочные работы по созданию ГГК-1000 и ГГК-200/1 [1, 4]. К сожалению, предшественникам не удалось связать процессы рудообразования с процессами метасоматоза, так как все возможные находки метасоматитов обозначались как «измененные породы» и не расчленялись по структурно-вещественным признакам.

На территории полуострова находятся две ВТС: Талимская и Укурунрунская, представленные коагматичными позднемеловыми породами совожского комплекса (андезиты, дациты) и ульбанского комплекса (габбро, диорит-порфириды, кварцевые диорит-порфириды, гранит-порфиры) [4].

С минерагенической позиции, территория Тугурского полуострова приурочена к Амурско-Охотской минерагенической провинции в пределах Ульбанской золото-серебряной и Удско-Шантарской марганцево-железородной минерагенических зон [4].

В рамках настоящей работы используются все имеющиеся ретроспективные данные [Николаев В.Ф., 1980 ф.; Авдеев М.И., 1956 ф.; Красный Л.И., 1948 ф.] в совокупности с более современными материалами [1, 4] и собственными данными.

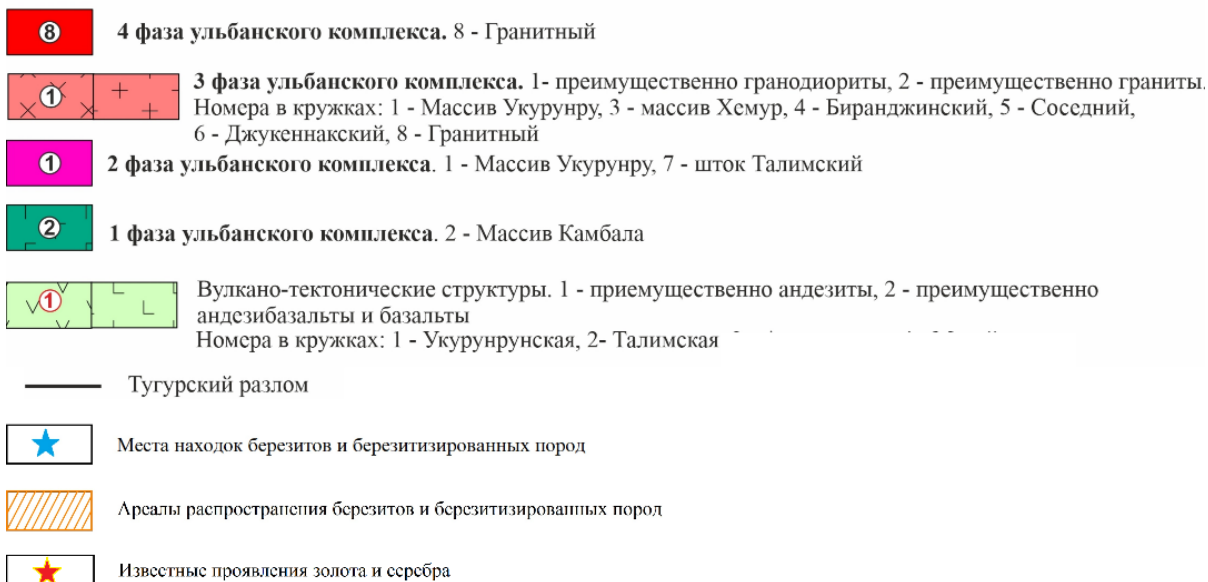
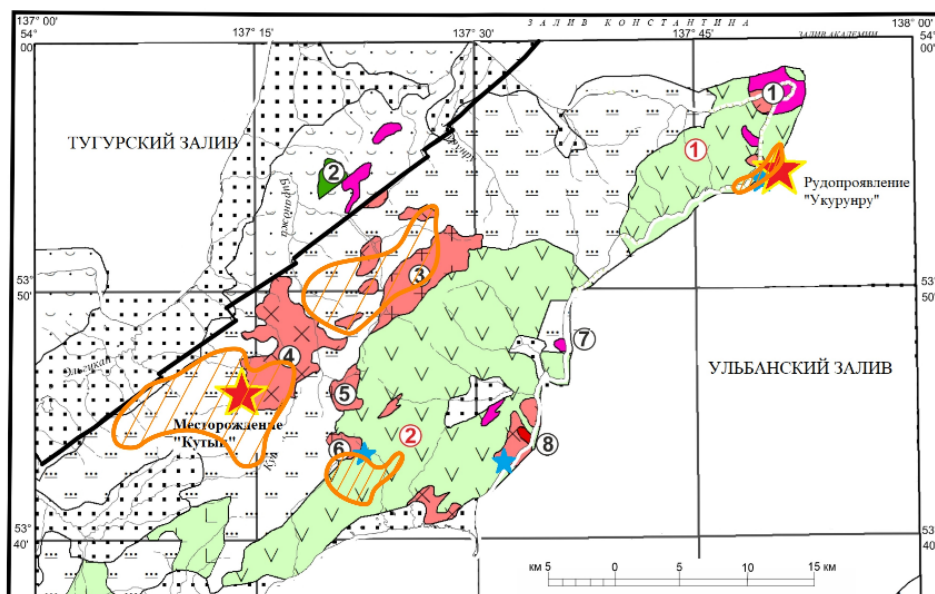


Рисунок. Геологическая схема Тугурского полуострова.

Петрография березитов

В основу расчленения метасоматитов были положены теоретические принципы геологической школы Е.В. Плющева и его коллег [2, 3]. В результате петрографических исследований на исследуемой территории можно выделить две фации березитов: серицит-кварцевая фация (B1) и кварц-серицит-хлорит-карбонатная фация (B2).

Березиты фации B1 приурочены к средним породам ульбанского комплекса (диорит-порфириды, кварцевые диорит-порфириды). Главными эпигенетическими минералами являются $ser+qtz\pm fsp\pm ab\pm chl\pm cc+py$. Содержание новообразованных минералов достигает 15-20 %.

Макроскопически березитизированные породы имеют светлую (желтоватую) окраску. Структура пород лепидогарнобластопорфировая, текстура массивная. Серицит и кварц в породе развивается за счет плагиоклазов (олигоклаз-андезин) и образует серицит тончешуйчатые агрегаты. Кварц образует мелкокристаллические агрегаты и прожилки. Минералы группы карбонатов и хлорит развиваются за счет фемических минералов протолита. Хлорит образует скрытокристаллические псевдоморфозы.

Березиты фации В2 связаны с образованием за счет средних-кислых пород ульбанского комплекса (гранодиорит-порфиры). Главными новообразованными минералами являются $qtz+ser+chl+cc+py\pm ab\pm fsp\pm tu$. Серицит и альбит развивается по полевым шпатам, хлорит и минералы группы карбонатов развиваются за счет фемических минералов в породе (амфиболы, слюды). Также во внешней зоне березитов фации В2 встречается турмалин. Нередко процессам березитизации сопутствует ранняя калишпатизация. Из рудных минералов встречаются пирит, арсенопирит, халькопирит, блеклые руды, галенит, сфалерит. Количество новообразований может превышать 80 % (табл. 1).

Таблица 1. Предполагаемая метасоматическая колонка для березитов фации В2 (кварц-серицит-карбонатная)

Номер зоны	Количество новообразований	Эпигенетическая минеральная ассоциация	Зона
0	0 %		Гранодиорит-порфир
1	5-10 %	$ser+qtz+fsp+cc+chl+ab+tu$	Слабо березитизированный гранодиорит-порфир
2	20-30 %	$qtz+ser+cc+tu$	Промежуточная зона кварц-серицит-карбонат-турмалинового состава
3	>80 %	$ser+qtz$	Внутренняя зона серицит-кварцевого состава

Геохимическая специализация березитов

Результаты расчетов средневзвешенных коэффициентов привноса-выноса вещества указывают на то, что обе выделенные фации березитов являются благоприятными для накопления полезного компонента. В связи с воздействием достаточно агрессивного раствора на диориты и их производные, наблюдается привнос металлов. Содержание таких элементов, как As, Вi превосходит протолит (эталон) в тысячи раз (табл. 2). В то же время в березитизированных породах происходит миграция литофилов, урана и редкоземельных элементов. Данная концепция привноса-выноса вещества указывает на прямую связь березитов и березитизированных пород с объектами серебро-полиметаллической (золото-серебряной?) рудной формации.

Таблица 2. Содержание металлов в березитах, относительно протолита (по собственным данным)

Химический элемент	Среднее содержание в неизменном гранодиорит-порфире, ppm	Минимальное и максимальное содержание в березитах, ppm
W	0.6	0.5-69.1
Mo	0.8	1.4-19.0
Sn	2.3	3.2-200.0
Cu	3.3	3.8-4200.0
Ag	0.1	0.3-207.0
Sb	5.0	5.0-7220.0
Bi	0.1	0.4-3980.0
Pb	21.2	16.3-15600.0
As	4.3	5.3-220200.0

Площадное распространение березитов и их генезис

На основе данных предшественников и собственных полевых наблюдений удалось выяснить, что березиты и березитизированные породы имеют локальное распространение и связаны с поздне меловым этапом тектоно-магматической активизацией. Березиты имеют непосредственное отношение к меловым вулканитам совоякского андезитового, и ульбанского габбро-диорит-гранитового комплексам.

Так, например, полнопроявленные разности березитов зафиксированы в рамках Укурунрунской ВТС (рисунок), в зоне рудоконтролирующего разлома СЗ простирания. Данный дизъюнктив, предположительно, повлиял на распространение флюида во внешнюю зону вмещающих андезитов с образованием безрудных пропилитов, после чего, насытившийся элементами-примесями раствор вступил в реакцию с диорит-гранодиорит-порфирами, образовав внутреннюю зону полнопроявленных березитов с гидротермальными рудными жилами, с которыми связаны проявления серебра и полиметаллов мыса Укурунру. В рамках описываемой структуры образования березитов авторы относят к пропилит-березитовой гидротермально-метасоматической формации [5].

Благодаря результатам наших исследований и результатов предшественников была создана схема распространения ареалов березитизации на территории Тугурского полуострова по методике, предложенной Е.В. Плющевым [2] (рисунок).

Работа выполнена в рамках геологического доизучения площади масштаба 1:200 000 листа N-53-XXIV по Государственному заданию Федерального агентства по недропользованию № 049-00016-21-00 от 14.01.2021 г.

Список литературы

1. *Забродин В.Ю., Бородин А.М., Гурьянов В.А. и др.* Государственная геологическая карта Российской Федерации (третье поколение). Дальневосточная серия, масштаб 1:1 000 000. Лист N-53 (Шантарские острова). Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2007. 553 с.
2. *Плющев Е.В., Ушаков О.П., Шатов В.В., Беляев Г.М.* Методика изучения гидротермально-метасоматических образований. Ленинград: Недра, 1981. 262 с.
3. *Плющев Е.В., Шатов В.В., Кашин С.В.* Металлогения гидротермально-метасоматических образований. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2012. 560 с.
4. *Харитонычев Г.И., Вихлянцев В.В.* Государственная геологическая карта СССР (первое поколение). Удская серия, масштаб 1:200 000. Лист N-53-XXIV. Москва: Аэрогеология, 1978. 65 с.
5. *Шатов В.В., Петров О.В., Кашин С.В. и др.* Практическое пособие по прогнозу оруденения на основе картирования гидротермально измененных пород при производстве ГСР-200 (ГСР-50). Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2023. 104 с.

Геохимическая зональность рудопоявления Тутхливаям (Камчатский край)

Швейгерт П.Е., Буханова Д.С.

Geochemical zoning of Tutkhlivayam ore occurrence (Kamchatka krai)

Schweigert P.E., Bukhanova D.S.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: schweigertpe@gmail.com

Изучен химический состав руд рудопоявления Тутхливаям (Камчатский край). Определены фоновые содержания, выделены геохимические ассоциации элементов, показана геохимическая специализация оруденения на различных уровнях эрозионного среза. Сделаны выводы о представительности имеющихся данных и направлении дальнейших работ.

Рудопоявление Тутхливаям расположено в северной части Центрально-Камчатского вулканического пояса, на границе Тигильского и Карагинского районов Камчатского края в 73 км на запад от п. Оссора. С позиций металлогении занимает центральную часть одноименного рудного поля в составе Эруваямского рудного узла Оссорского рудного района Центрально-Камчатской металлогенической провинции [1].

Геологическая характеристика

В геологическом строении Тутхливаямского рудного поля выделяются два структурных яруса, представленные эффузивно-пирокластическими отложениями вулканических комплексов, характерных для неогена Камчатского перешейка. Первый структурный ярус соответствует андезитовому умуваямскому вулканическому комплексу (N_{1um}), туфы и эффузивы которого несогласно перекрыты продуктами трахиандезит-дацит-андезитового толятоваямского вулканического комплекса (N_{1-2tl}), выделяемыми во второй структурный ярус. Дизъюнктивная тектоника представлена наложением систем сбросов и сбросо-сдвигов северо-восточного и северо-западного простираний, с которыми связаны дайки, субвулканические тела, зоны дробления и гидротермальные жилы. Около 15 % площади рудного поля находится в пределах распространения гидротермально измененных пород: пропилитов, аргиллизитов, вторичных кварцитов, окварцованных и пиритизированных пород, околожильных метасоматитов. Рудопоявление Тутхливаям приурочено к субширотной зоне повышенной проницаемости в южной части рудного поля. Ручей Тутхливаям протекает в направлении с юго-запада на северо-восток, разделяя рудопоявление на западный и восточный фланги, в пределах которых выделяются рудные тела западного и восточного флангов^{3,4}.

Геохимическая изученность

Геохимические работы на территории рудопоявления проводились при геологической съемке масштаба 1:200 000⁵ и 1:50 000³, а также на первом этапе поисковых работ⁴. По результатам комплекса работ был выделен рудный фактор, описывающий закономерности совместного привноса Li, Au, Ag, As и Mo, интерпретированный предшественниками как отражение золоторудного процесса. В пределах рудопоявления Тутхливаям по результатам автоматизированного картирования рудного фактора методом скользящего окна выделены три аномалии уровня «рудное тело»: аномалия I картирует рудное тело восточного фланга, аномалия

³ Боровцов А.К., Ким А.Г. и др. Отчет о результатах групповой геологической съемки масштаба 1:50 000, проведенной Эруваямской партией в 1974-1980 г.г. в бассейнах рек Эруваям, Дранка, Лесной (листы О-57-24-Г; О-57-35-Г; О-57-36-А,Б,В,Г; О-57-47-А,Б; О-57-48-А,Б; О-58-13-В; О-58-25-А; О-58-37-А). 1980 г.

⁴ Козлов А.П. и др. Отчет о результатах поисковых работ, проведенных в пределах Тутхливаямского рудного поля в 1988-1991 г.г. Эруваямским отрядом. 1991 г.

⁵ Боровцов А.К., Ким А.Г. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые бассейнов рек Лев. Лесной и Дранки. (Окончательный отчет о геологической съемке масштаба 1:200 000, проведенной Лесновской партией в 1967-1970г.г.). 1971 г.

III – рудное тело западного фланга, аномалия II занимает промежуточное положение и расположена на левом берегу ручья Тутхливаям в пределах субширотной зоны повышенной проницаемости. Для оценки эрозионного среза выделенных аномалий уровня «рудное тело» предшественниками использованы мультипликативный показатель $Li \cdot Ag$ и отношение Au/Ag . На основании картирования этих коэффициентов аномалия III (рудное тело западного фланга) интерпретирована как наименее эродированный участок, уровень эрозионного среза – верхнерудный, наиболее эродирован участок аномалии I (рудное тело восточного фланга), уровень эрозионного среза – рудный-нижнерудный. Аномалия II характеризуется промежуточными значениями показателей и интерпретирована предшественниками как слепое рудное тело, аналог установленному в пределах аномалии I.

Фактический материал и методы исследования

В работе представлены результаты обработки массива данных, составленного по результатам анализа химического состава штучных проб, отобранных на рудопроявлении Тутхливаям в ходе рекогносцировочных работ. Пробы отобраны из обнажений жил и жильно-прожилковых зон профилями вкрест простирания с выходом во вмещающие породы методом пунктирной борозды при средней удельной массе пробы 3 кг/м. Анализ химического состава выполнен методами: ME-ICP41 (царсководочная диссоциация навески 0.5 г с последующей атомно-эмиссионной спектроскопией с индуктивно-связанной плазмой (ICP-AES); элементы: Ag, Al, As, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ga, Hg, K, La, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Sr, Th, Ti, Tl, U, V, W, Zn) и Au-AA26 (пробирное обогащение навески 30 г с атомно-абсорбционным окончанием). Предел обнаружения составляет 0.01 г/т для Au; 0.2 г/т для Ag; 0.5 г/т для Be и Cd; 1 г/т для Co, Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, Sc, Sr, V; 2 г/т для As, Bi, Pb, Sb, Zn; 5 г/т для Mn; 10 г/т для B, Ba, Ga, La, Li, P, Tl, U, W; 20 г/т для Th; 0.01 % для Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, S, Ti. Результаты анализа предоставлены ООО «Оссорская ГГК».

В ходе первичной обработки из массива данных были исключены элементы, распределенные в интервале чувствительности метода непредставительно, и пробы богатых руд, содержащие концентрации Ag, Cu, Pb и Zn, превышающие верхний предел обнаружения (больше 1500 г/т Ag, 10 000 г/т Cu, Pb и Zn). Единичные концентрации ниже предела обнаружения заменены на половину предела обнаружения соответствующего элемента. Полученный массив содержит 667 строк, соответствующих отдельным пробам, и 25 столбцов, соответствующих химическим элементам, показавшим представительное распределение содержаний в интервале чувствительности метода (Au, Ag, Al, As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Sr, V, Zn). Концентрации всех элементов в массиве данных имеют логарифмически нормальное распределение. Данные обработаны при помощи программных комплексов Statistica и Surfer, определены фоновые содержания, выделены геохимические ассоциации, пространственная организация проб проанализирована на предмет возможности выделения элементарных горизонтов для исследования геохимической зональности рудопроявления.

В начале исследования массив данных был разделен на две выборки, отвечающие флангам рудопроявления. Выборка для восточного фланга составила 221 пробу, для западного – 446 проб. Методом кластерного анализа для каждой из выборок были построены корреляционные дендрограммы, позволившие выделить основные рудные элементы: Au, Ag, Cu, Pb, Zn. В целях повышения информативности за фоновое содержание Au принят предел обнаружения, для остальных рудных элементов фоновые содержания определены исходя из структуры распределения частот концентраций. Фоновые содержания для элементов, не вошедших в список основных рудных, определены как среднее геометрическое значение по массиву, полученные значения ниже предела обнаружения округлены до предела обнаружения или его половины в зависимости от структуры распределения соответствующего элемента (табл. 1).

Таблица 1. Фоновые содержания элементов

Au, ppm	0.01	Ca, %	1.4	Fe, %	0.4	Mo, ppm	1.7	Sb, ppm	1
Ag, ppm	0.5	Cd, ppm	0.25	Hg, ppm	0.5	Ni, ppm	1.4	Sc, ppm	1
Al, %	0.14	Co, ppm	1	K, %	0.02	P, ppm	54	Sr, ppm	20
As, ppm	3	Cr, ppm	6	Mg, %	0.06	Pb, ppm	5	V, ppm	5
Ba, ppm	8	Cu, ppm	6	Mn, ppm	150	S, %	0.02	Zn, ppm	6

Результаты исследования

Для выделения геохимических ассоциаций по формуле (1) были вычислены коэффициенты концентрации элементов в частных выборках.

$$K_c = C_{\text{сп. геом.}} / C_{\text{ф}} \quad (1)$$

В состав ассоциаций включены элементы с $K_c \geq 3$, ассоциации представлены в формате E_{K_c} , элементы ранжированы в порядке убывания K_c (табл. 2).

Таблица 2. Геохимические ассоциации в частных выборках

Фланг рудопроявления	Выборка	Кол-во проб	Геохимическая ассоциация
Восточный	полная	221	$Au_{16}Ag_{13}Cu_{12}Zn_{12}Pb_{10}Cd_9K_4Mg_4P_4Al_3Fe_3V_3$
	$Au \geq 0.25$ г/т	93	$Ag_{255}Au_{213}Pb_{112}Cd_{60}Cu_{50}Zn_{44}S_5Mg_4Mo_4K_3Al_3$
	$Au < 0.25$ г/т	128	$Zn_5K_4P_4Cu_4V_4Al_4Mg_4Fe_4$
	$Au \geq 1$ г/т	63	$Ag_{521}Au_{434}Pb_{235}Cd_{132}Cu_{92}Zn_{83}S_7Mg_5Mo_3Al_3Fe_3$
	$Au < 1$ г/т	158	$Zn_5Cu_5K_4Au_4P_4V_4Al_3Mg_3Fe_3Cd_3Ag_3$
Западный	полная	446	$Au_{15}Ag_3$
	$Au \geq 0.25$ г/т	151	$Au_{152}Ag_9$
	$Au < 0.25$ г/т	295	Au_4Mg_3
	$Au \geq 1$ г/т	82	$Au_{464}Ag_{11}$
	$Au < 1$ г/т	364	Au_7

Для оценки информативности имеющегося массива данных при изучении вертикальной геохимической зональности рудопроявления были проанализированы гипсометрические отметки точек отбора проб и сформированы погоризонтные выборки. Для погоризонтных выборок так же вычислены коэффициенты концентрации и выделены геохимические ассоциации (табл. 3).

Таблица 3. Геохимические ассоциации в погоризонтных выборках

Фланг	Выборка	Горизонт, м	Кол-во проб	Геохимическая ассоциация
Восточный	$Au \geq 0.25$ г/т	550-650	51	$Ag_{309}Au_{276}Cd_{177}Pb_{146}Zn_{98}Cu_{87}S_7Mg_4Mo_4Co_4Al_3K_3Fe_3$
		650-750	41	$Ag_{210}Au_{161}Pb_{84}Cu_{26}Zn_{18}Cd_{18}Mg_4Mo_4S_3$
650-750		6	$Au_{67}Ag_{14}Cu_{12}Pb_{11}Zn_5Cd_4Cr_4Mo_3$	
850-950		46	$Au_{135}Ag_8$	
950-1050		74	$Au_{221}Ag_8Mg_4$	
1050-1300		25	$Au_{101}Ag_{11}Sr_4Ca_4$	
Восточный	$Au \geq 1$ г/т	550-650	36	$Ag_{661}Au_{549}Cd_{467}Pb_{347}Zn_{202}Cu_{191}S_9Mg_5Co_4Al_3Mo_3Fe_3$
		650-750	27	$Ag_{380}Au_{317}Pb_{140}Cu_{34}Zn_{26}Cd_{25}Mg_5S_4Mo_4Al_3Fe_3V_3$
650-750		2	$Au_{158}Ag_{12}Cu_9Pb_6Zn_6Cd_4Cr_4Mg_4V_3$	
850-950		23	$Au_{384}Ag_{10}$	
950-1050		44	$Au_{666}Ag_{11}Mg_4Zn_3$	
1050-1300		13	$Au_{224}Ag_{11}Sr_4Ca_3$	

Интерпретация результатов

В геохимических ассоциациях выборок, характеризующихся пониженными концентрациями золота, коэффициенты концентрации полиметаллов (Cu, Pb, Zn) снижаются до уровня элементов, характерных для вмещающих пород (Al, Mg, P, V), при этом в обогащенных золотом группах проб коэффициенты концентрации полиметаллов повышены (табл. 2). Это позволяет в контексте выделения геохимической зональности рассматривать золотое и полиметаллическое оруденение как единый процесс. Исходя из геохимической специализации погоризонтных выборок (табл. 3), оруденение восточного фланга можно охарактеризовать как комплексное, серебро-золото-полиметаллическое. Для западного фланга, главным образом опробованного на верхних горизонтах (>850 м, табл. 3), в целом характерно собственно золотое оруденение, что проявляется в существенном снижении коэффициентов концентрации серебра относительно золота, однако, на нижних горизонтах (650-750 м, табл. 3) сохраняются аномальные коэффициенты концентрации полиметаллов, что свидетельствует о наличии вертикальной зональности оруденения. На самом верхнем горизонте опробования (1050-1300 м, табл. 3) выделяются повышенные коэффициенты концентрации кальция и стронция, что интерпретируется нами как относительное преобладание карбонатной минерализации, характерной для надрудного эрозионного среза.

Имеющиеся данные достаточно представительного характеризуют геохимическую специализацию оруденения на нескольких уровнях эрозионного среза. Это делает целесообразным изучение вертикальной геохимической зональности рудопроявления по методике А.П. Соловова [2], что и будет предпринято в качестве следующего этапа исследований.

Список литературы

1. *Литвинов А.С., Марковский Б.А., Патока М.Г.* Карта полезных ископаемых Камчатской области. Камчатприродресурс, 1999 г.
2. *Соловов А.П., Архипов А.Я., Бугров В.А. и др.* Справочник по геохимическим поискам полезных ископаемых / по ред. А.П. Соловова. М.: Недра, 1990. 335 с.

Формирование химического состава р. Камчатка под влиянием вулканических процессов

Калачева Е.Г., Волошина Е.В., Долгая А.А., Мельников Д.В.

Formation of the chemical composition of the Kamchatka River under the influence of volcanic processes

Kalacheva E.G., Voloshina E.V., Dolgaya A.A., Melnikov D.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: keg@kscnet.ru

Рассмотрен общий химический состав р. Камчатка на разных участках. Оценен вклад продуктов вулканической деятельности в формирование гидрохимии реки. Дается количественная оценка выноса растворенного вещества из р. Камчатка в Камчатский залив Тихого океана.

Река Камчатка – главная водная артерия Камчатского полуострова (рис. 1). Ее протяженность составляет 758 км, площадь водосбора оценивается в 55 900 км², средний многолетний расход в устье – 924 м³/с. [3]. Она формируется двумя истоками на восточном склоне Срединного хребта и предгорьях Восточного вулканического пояса. В среднем течении река огибает с западной и северной стороны Ключевскую группу вулканов, принимая воды всех постоянных и временных (сухих) рек, дренирующих склоны самых активных вулканов полуострова, а затем впадает в Камчатский залив Тихого океана в 2 км ниже пгт. Усть-Камчатск.

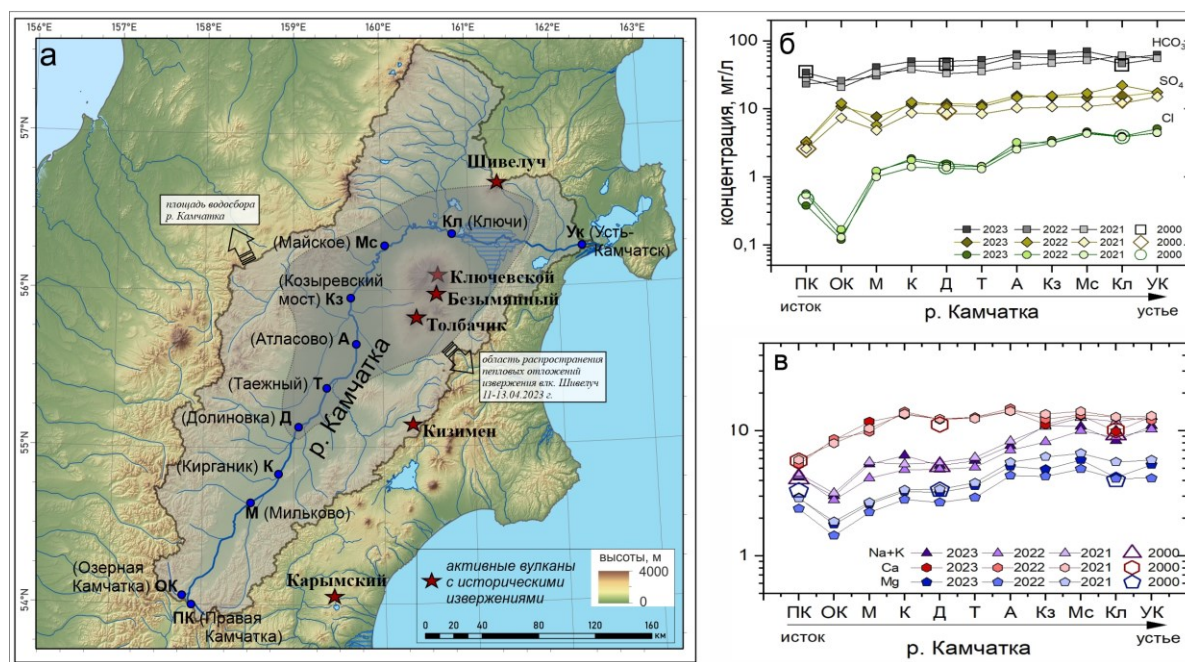


Рис. 1. Долина р. Камчатка с точками отбора водных проб (а). Изменение химического состава вдоль русла от истоков до устья: б) анионы, в) катионы.

Макрокомпонентный состав. Химический состав реки Камчатка изучается на протяжении 70 лет на нескольких гидропостах Камчатского УГМС от истока (р. Озерная Камчатка) до пос. Ключи. Опубликованные данные касаются преимущественно 1960-х гг. [1, 3]. В ходе экспедиционных работ 2021-2023 гг. нами опробована р. Камчатка от истоков до устья на ключевых участках, определяющих основные факторы формирования химического состава реки (рис. 1). Трехгодичные наблюдения в межень показали, что во всех точках опробования ее воды являются пресными, с минерализацией менее 150 мг/л и содержанием диоксида кремния 20-25 мг/л. На всем протяжении вода реки имеет близнейтральный

pH (6.4-7.5), относится к гидрокарбонатному кальциевому типу. В верхнем течении река Камчатка характеризуется низкой минерализацией, не превышающей 80 мг/л (р. Правая Камчатка) и 60 мг/л (р. Озерная Камчатка). Ниже с. Мильково, за счет впадения левых притоков (р. Кирганик и р. Большая Кимитина), минерализация увеличивается до 100 мг/л и (на фоне постепенного повышения расхода) остается достаточно постоянной до с. Таежный. После поступления с правой стороны вод р. Шапина, дренирующей очаги разгрузки одноименной крупной гидротермальной системы, а также рек Толбачик и Студенка, формирующихся на склонах активных вулканов Ключевской группы, количество растворенных солей увеличивается до 140-145 мг/л (по измерениям в с. Майское). После впадения самого крупного притока р. Еловка, характеризующейся крайне низким количеством растворенных солей, а также ряда других рек Срединного хребта, минерализация снижается. В районе пос. Ключи эта величина в водах р. Камчатка в среднем составляет 120 мг/л. В нижнем течении наблюдается некоторый рост минерализации, поставщиком минеральной компоненты служит преимущественно р. Большая Хапица, основной сток которой формируется на восточном склоне Ключевской группы вулканов.

По данным трехлетнего опробования, поэлементное распределение содержания макрокомпонентов в воде реки от истока до устья показывает хорошую сходимость (рис. 1). На графики дополнительно вынесены данные опробования в отдельных пунктах по литературным данным [4]. Эти точки также ложатся на полученные кривые, подтверждая постоянство химического состава воды реки на отдельных участках. Минимальными концентрациями ионов хлора, натрия и магния отличается один из истоков реки – р. Озерная Камчатка. Вместе с тем, в этом водотоке определены достаточно высокие концентрации SO_4^{2-} и Ca^{2+} , что может указывать на наличие выходов сульфатных подземных вод в верховьях реки. После слияния истоков в воде реки наблюдается плавный рост содержания гидрокарбонат- и сульфат-ионов. Более резкий рост выявляется в отношении Cl^- : если в верхнем течении концентрация этого элемента держалась на уровне 1 мг/л, то к устью она возрастает в 5-6 раз. На фоне многократного увеличения расхода можно говорить о значительном поступлении этого элемента в воду в среднем и нижнем течении. В катионной части наблюдается вариативность в распределении содержания отдельных элементов вдоль русла, связанная как с увеличением поступления породообразующих элементов с водотоками, дренирующими продукты современных извержений, так и с последующим разубоживанием более низкоминерализованными водами. В целом, прослеживается тренд к постоянному увеличению катионов, наиболее ярко всплеск проявляется в отношении щелочных элементов (Na+K) на участке, где река огибает Ключевскую группу вулканов.

Влияние извержения вулкана Шивелуч 11-13.04.2023 г. на гидрохимию реки. 11-13.04.2023 г. произошло эксплозивное извержение вулкана Шивелуч, в результате которого был разрушен лавовый купол вулкана [2]. Пепловая колонна поднялась до высоты 16-18 км над уровнем моря. Наиболее пострадавшими от пеплопадов оказались пос. Ключи, с. Майское, пос. Козыревск. В пос. Ключи мощность выпавшего пепла составила 8.5-11 см. Общая площадь территорий, подвергшихся пеплопаду, составляет 22 тыс. км². На карте полуострова (рис. 1) показаны границы распространения пепловых отложений, полученные на основе интерпретации спутниковых снимков.

Несмотря на масштабы произошедшего события, исходя из полученных данных по химическому составу р. Камчатка в разные годы, можно сделать вывод, что извержение вулкана Шивелуч не оказало какого-либо значимого влияния на химический состав главной водной артерии Камчатки. Содержания макрокомпонентов на всех участках реки, включая территории, подвергшиеся пеплопаду, находятся на среднестатистическом уровне. Значения остаются постоянными не только в период наших наблюдений (2021-2023 гг.), но и близки к данным опробования 2000 г. Это дает

возможность предположить, что извержения, произошедшие за этот период, также не сказались на геохимии реки. Вместе с тем, следует отметить, что свежевыпавший пепел содержит до 20 % водорастворимых комплексов. Водные вытяжки, полученные из пепла навеской 100 г, имеют сульфатно-хлоридный кальциевый состав с рН ~4 и минерализацией до 1.3 г/л. Переход основной массы компонентов в раствор при лабораторных исследованиях осуществляется в первые сутки. Натурные наблюдения выявили, что в пепловых отложениях спустя 4 месяца после извержения практически нет водорастворимых комплексов. Следовательно, учитывая выявленное обогащение рядом макрокомпонентов воды реки в районе Северной группы вулканов, наиболее вероятным сценарием воздействия продуктов извержения на состав речных вод является не прямое поступление пеплов в русло реки, а отсроченное влияние через подземные воды. Фильтрующиеся сквозь свежевыпавший пепел атмосферные осадки обогащаются минеральными компонентами и «заражают» подземные воды. В окрестностях пос. Ключи находится большое количество холодных ($T=4.7-5\text{ }^{\circ}\text{C}$) источников гидрокарбонатного натриевого состава с минерализацией до 400 мг/л и рН=7.3. Все они обогащены хлор- и сульфат-ионами (до 40 и 80 мг/л, соответственно) и по соотношениям макрокатионов близки к составу водных вытяжек и вод «сухих» рек, распространенных на склонах вулкана Шивелуч.

Сток растворенных веществ в Камчатский залив. На основании данных измерений 2022 г., включая гидрохимическое опробование и гидрометрические работы, был рассчитан годовой сток растворенного вещества с водосборной площади р. Камчатка.

Ежегодно в Камчатский залив Тихого океана с водами р. Камчатка выносятся около 4 мегатонн растворенного вещества (рис. 2). Практически 85 % от общего объема поступает в водоток с поверхностными и грунтовыми водами в районе Ключевской группы вулканов. Распределение по отдельным элементам носит поступательный характер, увеличиваясь от истоков к устью. Наиболее ярко это выражается в количественных оценках летучих и породообразующих элементов.

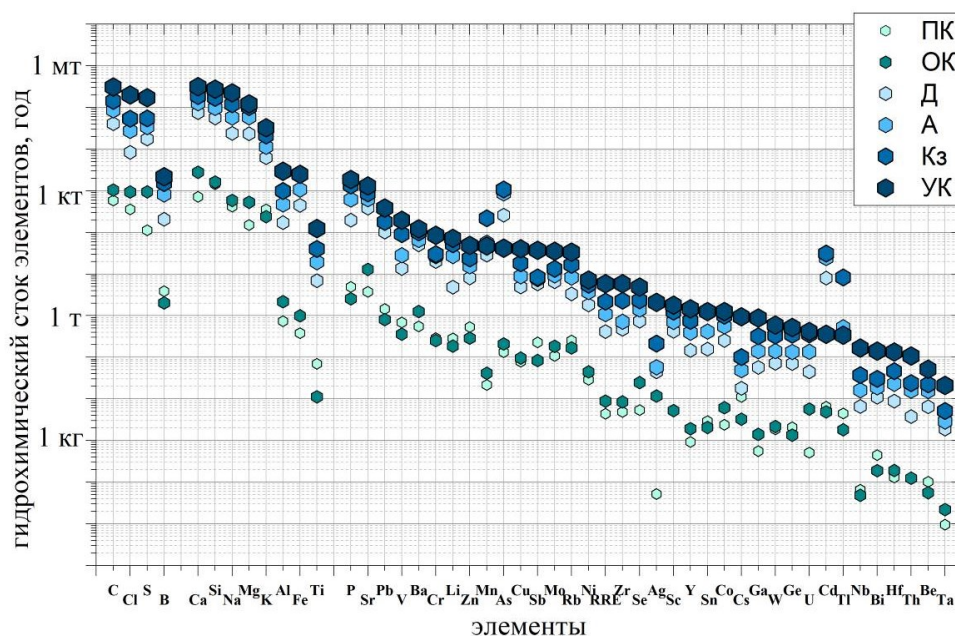


Рис. 2. Годовой элементный сток по руслу р. Камчатка на отдельных участках. Шифр проб – см. рис. 1.

Ежегодный объем основных анионогенных элементов (Cl, S и C), поступающих из р. Камчатка в Камчатский залив, составляет ~200, ~170 и ~310 Кт, соответственно. Количество бора на два порядка ниже – 2.2 Кт/год. Ежегодно в Камчатский залив

поступает ~1 Мт породообразующих элементов. Сравнение данных на разных участках показывает, что в верхнем и среднем течении катионами река Камчатка обогащается только на 20 % от общего объема выносимого растворенного вещества. Еще 40 % она набирает на участке Долиновка – Козыревский мост, остальные 40 % приходятся на нижнее течение. Индивидуальные потоки основных породообразующих элементов (Fe, Al, Na, Mg, Ca, K, Si) находятся в диапазоне от 32 Кт/год (K) до 315 Кт/год (Ca).

Количество выносимых рекой микроэлементов составляет ~4.3 Кт/год, из них 3.3 килотонны (75 % от общего объема) приобретает на Ключевском участке. Больше всего в Камчатский залив выносятся фосфора и стронция (1.9 и 1.3 Кт/год, соответственно). На участке Атласово – Козыревский мост в реке наблюдаются аномально высокие объемы мышьяка (1.3 Кт/год), тогда как сквозь створ в нижнем течении проходит только 40 т/год. Больше ста тонн свинца, ванадия и бария ежегодно поступает в Тихий океан с водами р. Камчатка, хрома и лития – по ~80 тонн, цинка, марганца, меди, молибдена – по ~40 тонн. Количество редкоземельных элементов, никеля, селена – от 4 до 7 тонн.

Заключение

Состав р. Камчатка остается неизменным уже более 70 лет. Вода ее пресная (минерализация менее 150 мг/л), относится к гидрокарбонатно-кальциевому типу. Ежегодно в Камчатский залив Тихого океана с водами р. Камчатка выносятся около 4 Мт растворенного вещества. Распределение по отдельным элементам носит поступательный характер, увеличиваясь от истоков к устью.

Быстрого отклика в гидрохимии р. Камчатка на происходящие вулканические события не наблюдается. Водосборная площадь реки многократно превышает площадь построек активных вулканов и территории, на которой происходит оседание пеплов. Однако высокие фильтрационные свойства слагающих долину пород способствуют фильтрации атмосферных осадков, обогащенных за счет взаимодействия со свежими продуктами извержений сульфатными и хлоридными комплексами. «Зараженные» подземные воды разгружаются вблизи реки и могут привносить дополнительные растворенные элементы в реку. Скорость фильтрации, объемы поступления таких вод, временной отклик на события пока остается сложным и нерешаемым вопросом. Северная группа вулканов – самая активная на Камчатке. Извержения вулканов Ключевской, Безымянный и Шивелуч происходят ежегодно, иногда одно за другим. Для получения маркеров, с помощью которых можно было бы определить отклик на то или иное событие, необходимы длительные ряды наблюдения за химическим составом воды в р. Камчатка, расширенная сеть наблюдений на ее притоках, режимные наблюдения на «сухих» реках и постоянный контроль качества подземных вод, разгружающихся в ее долине.

Список литературы

1. Агафонова К.Г. Гидрохимический режим рек Камчатки // Вопросы географии Камчатки. 1964. Вып. 2. С. 46-55.
2. Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др. Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
3. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20. Камчатка / Отв. ред. М.Г. Васьковский. Ленинград: Гидрометеиздат, 1973. 367 с.
4. Dessert C., Gaillardet J., Dupre B. et al. Fluxes of high-versus low-temperature water-rock interactions in aerial volcanic areas: Example from the Kamchatka Peninsula, Russia // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2009. V. 73. P. 148-169. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2008.09.012>

Возможности метода инверсионной вольтамперометрии для определения микроэлементов в природных средах

Кузьмина А.А., Карташева Е.В., Сергеева А.В., Назарова М.А., Позолотина Л.А., Мартыненко Д.О.

Stripping voltammetry method: application for determining the environmental microelements

Kuzmina A.A., Kartasheva E.V., Sergeeva A.V., Nazarova M.A., Pozolotina L.A., Martynenko D.O.

*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: anastavalers@gmail.com*

В работе представлены возможности вольтамперометрического анализатора TA-LAB, производства ООО «НПП «Томьаналит» (Россия), для измерения содержания микроэлементов As, Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Hg, Se, I, Ni, Co, Fe, Ag, Sb, Bi, Fe, Sn в водных и грунтовых пробах.

Введение

В ходе изучения структуры и строения крупных геотермальных систем, состава продуктов вулканических извержений, при исследовании процессов выноса летучих компонентов, транспорта ряда элементов, в том числе рудных, в ходе вулканических или гидротермальных процессов, и в решении других задач, возникает необходимость точного измерения малых концентраций ряда элементов. В настоящее время существуют различные прецизионные методы определения элементного состава, одним из них является инверсионная вольтамперометрия. В ходе измерения проводится фактически электролиз анализируемого раствора, при котором на электроде образуется пленка определяемого вещества, а затем она контролируемо растворяется, и по вольтамперной характеристике обратного процесса определяется содержание элемента в пробе. В настоящем докладе речь пойдет о российском вольтамперометрическом анализаторе TA-LAB производства ООО «НПП «Томьаналит» (рис. 1).



Рис. 1. Вольтамперометрический анализатор TA-LAB, российское производство, ООО «НПП «Томьаналит».

Вольтамперометрический анализатор TA-LAB российского производства предназначен для высокочувствительных измерений содержания неорганических микропримесей [4, 5], таких как As, Cd, Pb, Cu, Zn, Mn, Hg, Se, I, Ni, Co, Fe, Ag, Sb, Bi и др., в воде и почве, в горных породах, в пищевых продуктах и в составе биологических образцов, методом инверсионной вольтамперометрии. В настоящее время TA-LAB применяется в экологическом мониторинге [1, 2, 6], для анализа промышленных шламов [3], и в целом хорошо себя зарекомендовал как удобный инструмент для определения микроэлементов в различных средах. Диапазон концентраций для определяемых элементов в целом имеет порядок от 0.0007 до 1 мг/л, в пересчете на массу конечного раствора – от 0.0007 до 1 г/т (ppm) или от 0.7 до 1000 мг/т (ppb).

Пробоподготовка, методики

Для данного прибора разработаны методики определения элементов в водных и грунтовых пробах, а также в биологических объектах, и в газовых средах (таблица). Проба переводится в водный раствор, который и анализируется (рис. 2а), при этом есть возможность одновременного определения нескольких элементов (рис. 2б). Перед анализом, для устранения искажающего влияния фоновых примесей, производится минерализация пробы для удаления органических примесей и кислорода. Органические примеси удаляются потому, что связываются с определяемыми элементами в электрохимически неактивные формы. А кислород может сам восстанавливаться на катоде и маскировать сигнал от определяемого элемента. Аппаратура для пробоподготовки входила в комплект поставки.

Таблица. Методики для анализатора вольтамперометрического ТА-LAB

№ п/п	Методика выполнения измерений	Определяемые элементы	Нижняя граница определяемых содержаний мг/л; ppm, ppb/1000	Особенности методики
1	2	3	4	5
Вода природная, питьевая, термальная, конденсат, сточная				
1	МУ 31-03/04 ФР.1.31.2004.00987 ПНД Ф 14.1:2:4.222-06	Zn Cd, Pb Cu	0.00050 0.00020 0.00060	Одновременное определение Zn, Cd, Pb, Cu. Экспресс-подготовка проб, совмещенная с регистрацией аналитического сигнала
2	МУ 08-47/162 ФР.1.31.2005.01450	Hg	0.000040	Экспресс-подготовка проб; эффективный способ отмывки посуды и электрохимических ячеек
3	МУ 31-12/06 ФР.1.31.2006.02430 ПНД Ф 14.1:2:4.234-06	Ag	0.00050	Определение Ag на уровне $1 \cdot 10^{-4}$ мг/л без концентрирования проб. Подготовка проб в течение 1.5-2 часов
4	МУ 31-13/06 ФР.1.31.2006.02429 ПНД Ф 14.1:2:4.235-06	Se	0.00050	Применение УФО для увеличения чувствительности и точности анализа
5	МУ 31-14/06 ФР.1.31.2006.02431 ПНД Ф 14.1:2:4.233-06	Ni, Co	0.00050	Одновременное определение Co, Ni
6	МУ 31-08/04 ФР.1.31.2004.01165 ПНД Ф 14.1:2:4.224-06	Общий йод Иодиды Иодаты	0.00070 0.00010 0.00050	Экспресс-подготовка проб, совмещенная с регистрацией аналитического сигнала. Использование индикаторного электрода, не требующего применения металлической ртути и ее солей
7	МУ 31-09/04 ФР.1.31.2004.01324 ПНД Ф 14.1:2:4.223-06	Общий As As(III) As(V)	0.0020	Проведение анализа более 100 проб без регенерации поверхности индикаторного электрода. Подготовка проб в течение 2 часов

Таблица. Продолжение

1	2	3	4	5
8	МУ 31-10/04 ФР.1.31.2004.01322 ПНД Ф 14.1:2:4.217-06	Sb, Bi Mn	0.00010 0.0050	Определение Mn без предварительной подготовки проб и без применения инертного газа
9	МУ 31-17/06 ФР.1.31.2007.03300	Fe	0.030	Возможно определение концентраций на уровне 0.003-0.03 мг/л в случае концентрирования пробы путем упаривания
10	ГОСТ 31866-2012	Bi, Cd, Pb, Sb Mn Cu As Hg Zn	0.00010 0.020 0.0050 0.0010 0.000050 0.00050	Вода питьевая. Определение содержания элементов методом инверсионной вольтамперометрии
Грунт глинистый, изверженные породы, аргиллизированные, цеолитизированные, хлоритизированные и пр. породы, ил, донные отложения, мг/кг; ppm; ppb/1000				
11	МУ 31-11/05 ФР.1.31.2005.02119 ПНД Ф 16.1:2:2.2:3.48-06	Zn, Cu Cd, As, Hg Pb Mn	1.0 0.10 0.50 50	Определение водорастворимых, кислоторастворимых и подвижных форм элементов и валового содержания элементов
12	МУ 31-18/06 ФР.1.31.2007.03301	Ni, Co	0.10	Минерализация кислотных вытяжек не более 2 часов

Также есть возможность определения форм одного элемента в разных степенях окисления. Например, можно будет определить формы нахождения и переноса мышьяка в термальных водах, что актуально для геохимии современных геотермальных систем и для их эксплуатации, для исследования процессов фумарольного минералообразования, в ходе разработки месторождений полезных ископаемых и в других вопросах. Аналогично, селен, сурьма и висмут могут присутствовать в природных водах Камчатки в разных формах, поэтому использование ТА-LAB позволит получить новые актуальные результаты.

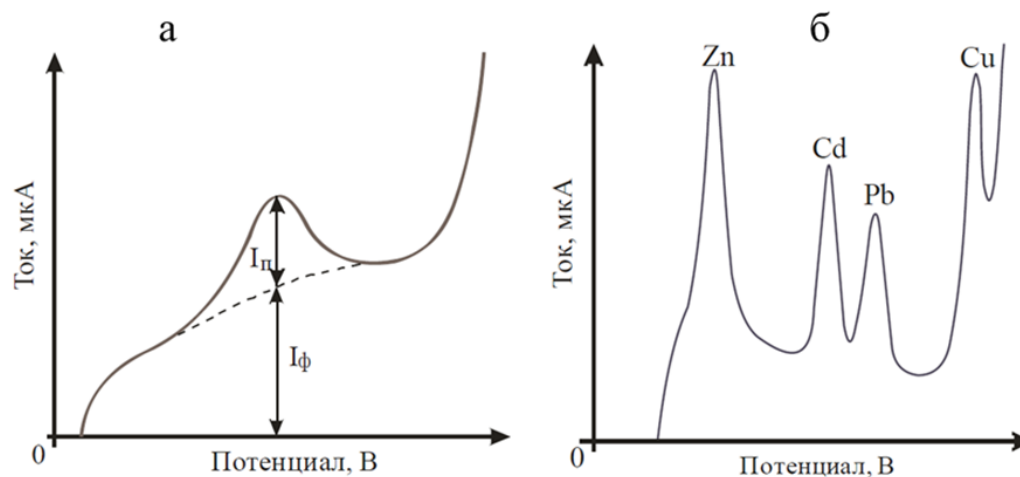


Рис. 2. Вид вольтамперограммы при определении одного элемента (а) и четырех элементов одновременно (б).

Получаемые результаты

Аналитическим сигналом может быть интенсивность тока восстановления или окисления – в зависимости от реакции на электродах (рис. 2а). Есть возможность определения нескольких элементов в ходе одного цикла измерений (рис. 2б).

Заключение

Вольтамперометрический анализатор ТА-LAB способен выполнять широкий спектр задач, связанный с исследованием геохимии вулканических процессов, геотермальных систем, формирования рудных месторождений. Также с помощью ТА-LAB возможен экологический мониторинг ряда содержания нормируемых элементов, включающий их попадание в биоту или пищевые продукты. Анализатор может быть использован для сопровождения работ по поиску и освоению месторождений при реализации экономически значимых проектов.

Список литературы

1. *Иванова Н.В., Яковлева С.Н., Булгакова О.Н., Исингалиева И.Б.* Особенности накопления тяжелых металлов в перьевом покрове птиц Кузбасса. // VII Международный Российско-Казахстанский симпозиум: сборник тезисов докладов 7-10 октября 2018 г. Кемерово: ФИЦ УУХ СО РАН, 2018. С. 39.
2. *Короткова Т.Г., Бушумов С.А., Доненко А.П. и др.* Определение содержания металлов в рисе-сырце сорта Регул // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского Государственного Аграрного Университета. 2017. № 132 (08). С. 208-217.
3. *Кутлимуротова Н.Х., Дадоматов А.Л.* Определение рения в свинцово-висмутовых шлаках инверсионной вольтамперометрией // *Universum: химия и биология*. 2022. № 5 (95). С. 15-19. DOI: 10.32743/UniChem.2022.95.5.13392
4. *Маруга А.А., Фунтиков В.А.* Индикаторные электроды на основе IVB и IVA элементов для инверсионных вольтамперометрических методов совместного определения Hg (I, II), Cd (II) и Zn (II) // *Инновации и инвестиции*. 2019. №. 12. С. 187-190.
5. Пособие по освоению метода инверсионной вольтамперометрии и работы на вольтамперометрическом анализаторе ТА-LAB // ООО «НПП «ТОМЬАНАЛИТ». 99 с.
6. *Старосельников А.Н., Маниковская Т.М.* Содержание мышьяка в почвах и технозомах с. Хапчераंगा // *Медицина завтрашнего дня: Материалы XVII межрегиональной научно-практической конференции студентов и молодых ученых, посвященной 65-летию Читинской государственной медицинской академии, 17-20 апреля 2018 года, г. Чита: РИЦ ЧГМА, 2018. С. 342-343.*

Проблемы охраны вулканических ландшафтов на юге криолитозоны в условиях развития стихийного туризма

Кузьмичев И.С.¹, Медведков А.А.^{1,2}

Problems of protection of volcanic landscapes in the south of the permafrost zone in the context of the development of spontaneous tourism

Kuzmichev I.S., Medvedkov A.A.

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва;

e-mail: pilot238@mail.ru, a-medvedkov@bk.ru

² Институт географии РАН, г. Москва

В условиях южной криолитозоны рассматриваются последствия влияния стихийного туризма на вулканические ландшафты природного парка «Вулканы Камчатки». Обсуждаются мероприятия по регулированию рекреационной нагрузки и восстановлению нарушенных ландшафтов.

Введение

Проблема охраны вулканических ландшафтов рассматривается на примере территорий двух кластеров природного парка «Вулканы Камчатки» – части серийного объекта Всемирного природного наследия с одноименным названием. Два упомянутых кластера – «Ключевской» и «Южно-Камчатский» входят в число главных аттракторов туризма на полуострове. Эти территории испытывают высокую рекреационную нагрузку, что является вызовом для охраны природы, требующим проведения мониторинговых исследований и изучения факторов, способствующих развитию неблагоприятных экодинамических процессов при механическом воздействии на почвогрунты. Учет нового знания требуется в принятии управленческих решений.

Переходя на уровень ключевых участков исследования, данная проблема будет рассматриваться, применительно к природным условиям Ушковского дола (Ключевской природный парк) и Пемзовых массивов (Южно-Камчатский природный парк) – наиболее уязвимых ландшафтов со схожей реакцией на рекреационную нагрузку, что проявляется в формировании эрозионных форм рельефа. Расположение этих территорий в условиях развития льдистых пород, высокая и нерегулируемая рекреационная нагрузка в пределах одного ООПТ и сходная реакция ландшафтов на механические воздействия позволяют рассмотреть обозначенную проблему в сходных геоэкологических и институциональных условиях.

Материалы и методы

Полевым изысканиям предшествовало изучение архивных картографических материалов [2, 7] и научных публикаций [1, 3, 4, 6, 10-15], а также анализ данных дистанционного зондирования Земли – цифровой модели рельефа SRTM и изображений спутников LANDSAT-8, 9 и Sentinel-2 [16, 17].

Полевые изыскания представляли собой комплексные ландшафтные исследования, включавшие: фиксацию признаков активности эрозионных форм; анализ их геоморфологической и ландшафтной приуроченности; первичный анализ межкомпонентных взаимосвязей в криовулканических природных комплексах; изучение условий залегания многолетнемерзлых пород и криогенных процессов в почвах.

Районы исследования

1. Территория, расположенная в западной части Ключевской группы вулканов, представлена пологими склонами и субгоризонтальной поверхностью вулканического плато «Ушковский дол» ($H_{\text{абс.}}=950-1500$ м) с наличием островной мерзлоты и сильным эрозионным расчленением [1, 10] под преимущественно горными лугами, но по

водораздельным поверхностям отмечается мохово-лишайниковая растительность, а по линейным понижениям – ольховый стланик.

2. Пемзовые массивы Пемзовая и Тарбаганья ($H_{\text{отн.}}=60$ м и 50 м соответственно) – вытянутые с северо-востока на юго-запад гряды с покатыми и пологими склонами, покрытые горными лугами и тундрами и расположенные у подножья северо-западного склона Мутновского вулкана [12, 13, 16].

Анализ полученных результатов

Ушковский дол

На исследуемой территории встречаются эрозионные формы линейного простирания, имеющие U-образный поперечный профиль, задернованные склоны и днища, и небольшой вершинный перепад (в некоторых случаях он не наблюдался) (рисунок, а), но фиксируются также и примеры более активных процессов. Это наблюдается вдоль грунтовых дорог при развитии эрозионных врезов, имеющих V-образный поперечный профиль с незадернованными склонами и днищами и ярко выраженным вершинным перепадом (рисунок, б). В борту одного из оврагов, имеющего признаки активного развития и V-образный тип профиля, обнаружены многолетнемерзлые породы [8]. Естественное восстановление ландшафтов в таких условиях затруднено.

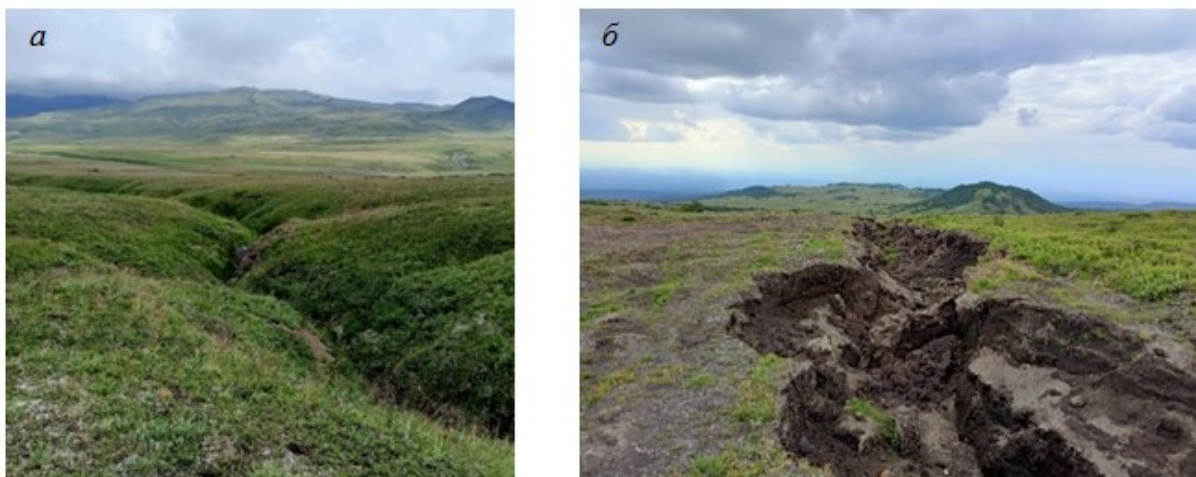


Рисунок. Эрозионная форма с U-образным (а) и V-образным (б) профилем.

Пемзовые массивы Пемзовая и Тарбаганья

Во время летней экспедиции 2021 г., проведенной в рамках работ по комплексному изучению современного состояния экосистем «Южно-Камчатского» парка, в пемзовых массивах Пемзовая и Тарбаганья нами впервые были обнаружены многолетнемерзлые породы. Их локализация в пористых породах является нетипичной для южной криолитозоны. Обычно в условиях южной криолитозоны они фиксируются в тонкодисперсных отложениях [5]. Также в процессе изучения локальной приуроченности льдистых пород были выявлены и экспозиционные различия. Для картирования их распространения использован комплекс геолого-геоморфологической и ландшафтно-индикационной информации, задействованной в рамках уже апробированного подхода к идентификации геокриологических условий в горных условиях [9]. По итогам сформулирована гипотеза о роли льдистых включений в формировании селевых явлений, типичных для района, прилегающего к Мутновскому вулкану, что необходимо принимать во внимание не только с целью реализации охраны ландшафтов, но и для обеспечения безопасности туристов.

Мероприятия по охране природы

Рекультивация нарушенных ландшафтов необходима в связи с тем, что развивающиеся на нарушенных участках деструктивные процессы в большинстве случаев имеют высокие скорости развития эрозионных процессов. Следовательно, этим природным комплексам для достижения динамического равновесия требуется значительное время. Поэтому на участках, где в результате рекреационной деятельности был нарушен растительный покров, но эрозионные процессы еще не активизировались, требуется реализовать комплекс мероприятий, включающий разрыхление уплотненного грунта и посев многолетних трав с мощной корневой системой, типичных для данного района Камчатки. В случае, если эрозионный врез уже сформировался, необходимо сократить его водосборную площадь путем водоотведения, а затем провести дальнейшую рекультивацию – засыпать овраг или произвести посев трав на его склонах и днище.

Природоохранные мероприятия. В целях предупреждения нарушения ландшафтов необходимо исключить наиболее нещадящие виды механического воздействия – в первую очередь это моторизированные типы транспорта. Маршрут троп должен быть проложен по наиболее устойчивым к воздействию природным комплексам, а наиболее уязвимые участки троп должны быть обустроены. Так, в вулканических ландшафтах Кроноцкого государственного заповедника и природного парка «Налычево» обустройство троп представлено строительством настилов и отсыпкой маршрутов щебнем. Мероприятия по защите уязвимых ландшафтов также могут включать в себя регулирование численности рекреантов и ограничение туризма в сезоны года, когда природные комплексы наиболее подвержены механическому воздействию.

Заключение

Механические нарушения в вулканических ландшафтах с льдистыми породами способны существенно активизировать развитие термоэрозионных процессов. Высокая уязвимость вулканических ландшафтов в данном случае обусловлена не только наличием льдистых включений, но и значительной мощностью рыхлых отложений, а также выраженным вертикальным расчленением их морфологической основы. Пространственная картина уязвимости ландшафтов должна являться основой для нормирования рекреационных нагрузок в пределах рассматриваемой территории.

Восстановление нарушенных ландшафтов может быть реализовано с использованием рекультивационных мероприятий, включающих посев многолетних трав и создание системы водоотведения вдоль стихийно проложенных дорог. Природоохранные мероприятия, предупреждающие нарушения ландшафтов, могут включать: регулирование численности рекреантов, ограничение туризма по сезонам года, разработку маршрутов в обход уязвимых природных комплексов, а также обустройство туристических троп.

Список литературы

1. *Абрамов А.А., Гиличинский Д.А.* Геокриологические условия района Ключевской группы вулканов (Камчатка) // Криосфера Земли. 2008. Т. 12. № 1. С. 29-40.
2. Атлас СССР / Под ред. В.В. Точенова. М.: ГУГК, 1983. 260 с.
3. *Бакалин В.А., Ветрова В.П.* Взаимосвязь растительности и мерзлоты в зоне спорадического распространения многолетней мерзлоты на Камчатке // Экология. 2008. № 5. С. 338-346.
4. В 2022 году туристический поток на Камчатке достиг отметки в 300 тыс. человек / Новости и события // Официальный сайт правительства Камчатского края. [Электронный ресурс]. URL: <https://kamgov.ru/news/v-2022-godu-turisticseskij-potok-na-kamcatke-dostig-otmetki-v-300-tys-celovek-58496> (дата обращения 29.05.2023).
5. *Втюрин Б.И.* Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 214 с.

6. Захарихина Л.В., Литвиненко Л.В. Генетические и геохимические особенности почв Камчатки. М.: «Наука», 2011. 246 с.
7. Карта четвертичных образований территории Российской Федерации. Схема распространения многолетнемерзлых и сезонномерзлых пород: Масштаб 1:50 000 000 / Под ред. О.В. Петрова. СПб.: ВСЕГЕИ, 2014.
8. Кузьмичев И.С., Медведков А.А., Скроб П.В. Развитие процессов овражной эрозии в вулканических ландшафтах природного парка «Ключевской» // Географическая среда и живые системы. 2022. № 3. С. 44-59. DOI: 10.18384/2712-7621-2022-3-44-59
9. Медведков А.А. Картирование геолого-геоморфологического фундамента ландшафтов под уровневой структурой рельефа для управления экологическими рисками в пределах южной криолитозоны // ИнтерКарто. ИнтерГИС. ГУ-обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы международной конференции. Москва: МГУ, географический факультет. 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 78-90. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-78-90
10. Национальный атлас России. Природа. Экология. Т. 2. М.: Роскартография, 2007. [Электронный ресурс]. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/240-242.html> (дата обращения: 15 сентября 2022).
11. Пыстина Н.Б., Унанян К.Л., Ильякова Е.Е. и др. Совершенствование технологий рекультивации ландшафтов на склонах в условиях Крайнего Севера // Арктика: экология и экономика. 2017. № 2 (26). С. 27-34. DOI: 10.25283/2223-4594-2017-2-27-34
12. Топчиева О.М., Мостовая Т.В., Петровский В.А. К вопросу о генезисе пемзовых отложений района гор Тарбаганья и Пемзовая на Камчатке // Вестник Пермского университета. Геология. 2014. № 3. С. 8-18. DOI: 10.17072/psu.geol.24.8
13. Селянгин О.Б. Строение, вещество и близповерхностные магматические очаги вулканов Мутновский и Горелый (Мутновский геотермальный район, Камчатка). II. Вулкан Мутновский // ГИАБ. 2016. № 31. С. 365-395.
14. Чижова В.П. Рекреационные ландшафты: устойчивость, нормирование, управление. Смоленск: Ойкумена, 2011. 173 с.
15. Шляхов С.А., Гришин С.Ю., Круголь К.С. Почвы субальпийского пояса вулкана Ключевская сопка // Вестник КрасГАУ. 2011. № 7 (58). С. 52-57.
16. SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. [Электронный ресурс]. URL: <https://srtm.csi.cgiar.org/> (дата обращения: 15 сентября 2022).
17. USGS Earth Explorer. [Электронный ресурс]. URL: <https://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 27 сентября 2022).

Водотоки Северной группы вулканов и их влияние на сток р. Камчатка

Куксина Л.В.¹, Муравьев Я.Д.²

Rivers of the Northern group of volcanoes and their influence on the Kamchatka River runoff

Kuksina L.V., Muravyev Ya.D.

¹ *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, г. Москва;*

e-mail: ludmilakuksina@gmail.com

² *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский*

Рассматриваются особенности пространственно-временной изменчивости компонентов речного стока в бассейнах водотоков на склонах действующих вулканов Северной группы. Показано, что особенности их стока определяются характером подстилающих пород и режимом питания. Установлено, что реки, испытывающие воздействие вулканизма, оказывают значительное влияние на средний многолетний сток взвешенных наносов р. Камчатка.

Наличие на территории Камчатского края районов проявления активного вулканизма создает особые условия для формирования стока протекающих здесь рек. Особую группу водотоков в регионе образуют реки районов активного вулканизма, непосредственно дренирующие склоны и подножия действующих вулканов Камчатки.

Реки на склонах вулканов характеризуются аazonальным водным режимом. Основной особенностью стока таких (так называемых «сухих») рек является его эпизодичность, обусловленная очень высокой водопроницаемостью пород, слагающих склоны вулканов. По этой причине уровень грунтовых вод залегает очень глубоко, что приводит к чрезвычайно быстрой фильтрации поверхностного стока в нижележащие слои. Эпизодический характер поверхностного стока обусловлен также особенностями их питания за счет атмосферных осадков, сезонного таяния снежников, а также снега и льда в период извержения вулканов.

Характерные черты гидрологического режима рек вулканических областей проявляются во внутрисуточном, суточном, внутригодовом и многолетнем масштабах.

Внутрисуточный режим флуктуаций уровней и расходов воды и, соответственно, характеристик стока наносов полностью определяется режимом таяния питающих ледников и снежников и трансформируется за счет фильтрации в подрусловые пути. В зависимости от близости расположения гидроствора к источнику питания и размеров последнего происходят колебания уровней (расходов) воды и мутности.

Потоки на склонах вулканов часто характеризуются заторно-волновым характером движения, что также связано с поступлением воды в русла. Механические преобразования в русле (такие как обрушение кровли ледника и создание временных плотин, их размыв, русловые деформации), а также просачивание воды в рыхлые вулканогенные отложения и их выход ниже по течению приводят к импульсивным изменениям расхода воды как в сторону повышения, так и в сторону уменьшения.

При движении от истока к устью вниз по течению в пределах водосборов на склонах вулканов можно выделить три зоны, отличающиеся изменениями расхода воды с увеличением площади водосбора [2]: 1) расход воды увеличивается; 2) расход воды остается практически неизменным (зона транзита); 3) расход воды уменьшается.

В зависимости от расходов воды происходит изменение размеров перемещаемых частиц от алеврита до валунов. Изменение водности и стока наносов сопровождается русловыми переформированиями вплоть до быстрой смены типа русла [3].

Изменения во внутригодовом режиме стока также характеризуются крайней неравномерностью. Обычно в зимний период их русла полностью лишены воды. В периоды максимальной водности (половодье и паводки) происходит максимальное насыщение грунтовых вод и смыкание их уровня с поверхностными. В этот же период происходит наиболее значительное увеличение мутности воды [1]. Весной, в период

интенсивного таяния сезонного снежного покрова, «сухими» реками совершается основная эрозионно-аккумулятивная работа.

В течение межени большинство рек территорий активного вулканизма никуда не впадает, образуя субэвральную песчанистую дельту. В период максимальной водности наиболее крупные из них являются притоками постоянных водотоков (р. Сухая, руч. Киргурич впадают в р. Камчатка, р. Сухая Хапица впадает в р. Большая Хапица, р. Сухая Халактырская впадает в Тихий океан).

В многолетнем плане колебания стока «сухих» рек также имеют свои особенности. Основными причинами циклических колебаний многоводных, маловодных и средних по водности периодов в стоке постоянных водотоков являются колебания климатических факторов. Причинами колебаний водности рек вулканических территорий, помимо изменений климатических факторов, служат эндогенные процессы. Наиболее полноводными реки бывают в периоды таяния снега и льда во время извержений вулканов. В этом случае их долины, как правило, становятся путями схода лахаров. Значительные снеготопивые запасы на склонах действующих вулканов обуславливают объемы водной составляющей потока. Массы рыхлого сыпучего материала (вулканические шлаки, пеплы, агломераты пирокластических потоков и раскаленных лавин), периодически отлагающиеся на склонах активных вулканов, являются источником огромного количества перемещаемого материала. Повторяемость и размеры таких событий зависят от повторяемости и характера извержений и от величины запасов снега к моменту начала извержения. Крупные извержения, сопровождающиеся таянием ледников и снежников, являются причинами пониженных фаз водности вулканических рек, поскольку происходит сокращение или полное уничтожение источника питания.

Помимо влияния на водность и насыщенность потока взвешенным материалом, извержения оказывают влияние на строение речных водосборов. Побочные прорывы, лавовые потоки, падение крупных обломков изверженного материала могут приводить к бронированию толщи ледников и их последующему отмиранию. Следствием этого является то, что «сухая» река лишается источника питания. Изменение морфологии речных долин вследствие вулканических извержений приводит к тому, что некоторые из ледников изменяют направление своего движения. Таким образом, они перестают питать одни реки и становятся источниками поступления вод для других.

На исследуемых реках Северной группы вулканов прохождения экстремальных объемов стока воды и наносов неоднократно фиксировались в XX веке. Ввиду характерных особенностей рек на склонах действующих вулканов, они, как правило, не достигают приемных водоемов в период межени, формируя аллювиальные дельты у подножий вулканов. Основной вынос вещества осуществляется в период прохождения половодья и при извержении вулканов в зимний период. Некоторые из рек вулканических территорий никогда не достигают приемных водоемов, теряясь в собственных отложениях. Согласно анализу снимков Sentinel-2, наиболее крупные водотоки вулканических районов (площадь водосбора более 100 км²) достигают приемных водотоков (р. Камчатка) в течение примерно четырех месяцев в течение года. Данная поправка позволяет произвести расчет для осредненных условий, экстремальные паводки, возникающие при извержении вулканов в зимний период, не учитываются. Таким образом, поступление воды, взвешенных наносов и ионов реками вулканических территорий можно рассчитать как:

$$W = M \cdot F \cdot \frac{T_B}{12},$$

где W – сток воды/взвешенных наносов/ионов рек вулканических территорий, т/год; M – модуль стока воды/взвешенных наносов/ионов рек вулканических территорий, т/км²·год; F – площадь водосбора реки, км²; T_B – продолжительность впадения в приемный водоток (Σ4 месяца).

С учетом данных о речных водосборах на склонах вулканов Северной группы, были отобраны 16 водотоков, способных достигать р. Камчатка. Обобщенные сведения для бассейна р. Камчатка в замыкающем створе и для отобранных водотоков, включая морфометрические и гидрологические данные, подготовлены по опубликованным источникам (сведения о площадях водосборов [4]), а также в период выполнения собственных полевых исследований на реках региона.

На основе подготовленных сведений о модуле водного стока, минерализации и мутности воды были получены среднееголетние оценки стока наиболее крупных водотоков вулканических районов в р. Камчатка. Согласно выполненным оценкам, доля вулканических водотоков в площади водосбора р. Камчатка, составляет 6.5 %, что сопоставимо с вкладом в водный сток (5 %) (рисунок). Воздействие на ионный сток оказывается минимальным и составляет всего 0.15 % (см. рисунок). Наибольшее влияние реки, дренирующие склоны и подножия действующих вулканов Камчатки, оказывают на сток взвешенных наносов, где их вклад достигает 67 % от суммарного стока наносов р. Камчатка в Тихий океан.

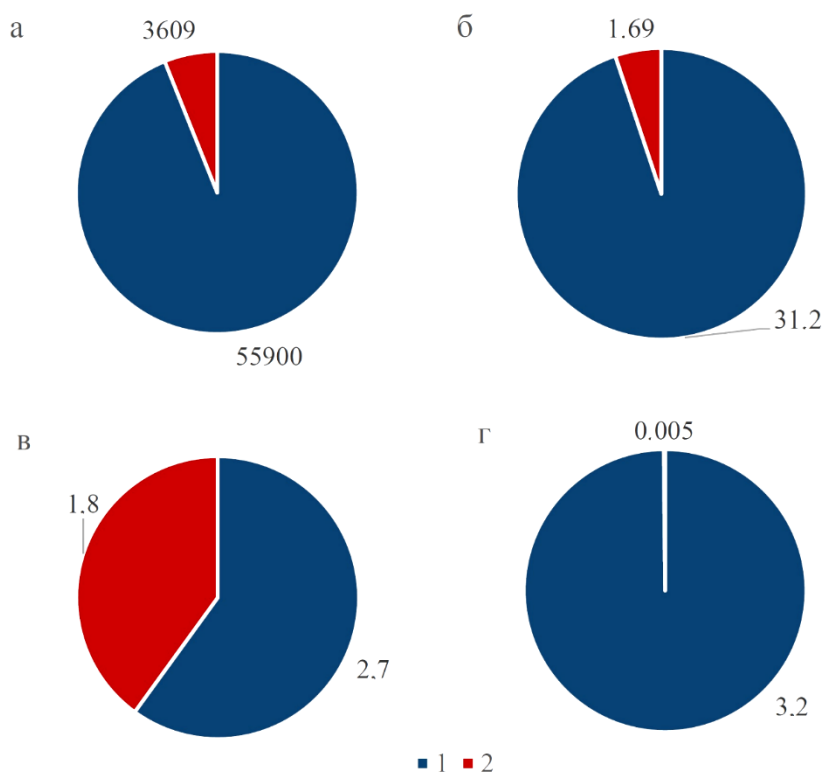


Рисунок. Соотношение вклада бассейна р. Камчатка (без водосборов рек вулканических областей, (1)) и речных водосборов Северной группы вулканов (2): а – площадь водосбора, км²; б – объем стока воды, км³; в – сток взвешенных наносов, млн т; г – ионный сток, млн т.

Список литературы

1. *Виноградов В.Н., Купцов А.Н.* О гидрологии «сухих» рек районов активного вулканизма // Водные ресурсы. 1980. № 5. С. 178-184.
2. *Виноградов В.Н., Муравьев Я.Д.* Ледник Козельский (Авачинская группа вулканов) // Водно-ледниковый и тепловой баланс горноледниковых бассейнов. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 120 с.
3. *Куксина Л.В., Чалов С.Р.* Сток взвешенных наносов рек территорий современного вулканизма Камчатки // География и природные ресурсы. 2012. № 1. С. 103-110.
4. Ресурсы поверхностных вод СССР. Гидрологическая изученность. Т. 20. Камчатка. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 258 с.

Пепловые выбросы вулканов Курильской островной дуги и биопродуктивность прилежащих локальных морских акваторий

Лепская Е.В.¹, Теннин О.Б.¹, Походина М.А.¹, Рашидов В.А.²

Ashfalls of Kuril Island Arc volcanoes and local sea sites productivity

Lepskaya E.V., Tenin O.B., Pokhodina M.A., Rashidov V.A.

¹ Камчатский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии (КамчатНИРО), г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: lepskaya@list.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

Приведен биогенный состав пеплов вулканов Райкоке и Чикурачки, расположенных в Курильской островной дуге. По данным спутникового мониторинга показаны различия в воздействии этих пеплов на продуктивность прилежащих морских акваторий, которую оценили по содержанию хлорофилла-а.

Введение

Частицы пепла содержат значительное количество биогенных элементов и могут положительно влиять на биопродуктивность лососевых нерестово-нагульных озер [4, 6, 7] или поддерживать биогенный режим этих водоемов на фоновом уровне [5]. Для морских акваторий такие исследования до настоящего времени не проводились. На примере двух недавних извержений вулканов Курильской островной дуги: вулкан Райкоке (2019 г.) и вулкан Чикурачки (2022 г.), проанализировано влияние пеплов на продуктивность морских акваторий.

Материалы и методика

Биогенные элементы (БЭ) (фосфатный фосфор (DIP), аммонийный, нитритный и нитратный азот – в сумме минеральный азот (DIN), кремний (DSi) и железо (Fe)) определяли в водных вытяжках из двух навесок пепла (коллекция В.А. Рашидова), соответственно, вулканов Райкоке (извержение 2019 г.) и Чикурачки (извержение 2022 г.) в лаборатории химического анализа Камчатского филиала ВНИРО (КамчатНИРО). Параллельно проведены определения pH, концентрации сульфатов. Эксперимент носил динамический характер и имитировал условия, при которых пепел попадает в активно перемешиваемую водную среду.

Продуктивность локальных морских акваторий, прилежащих к островам, на которых зарегистрированы мощные выбросы вулканического пепла, оценивали по содержанию хлорофилла-а в поверхностном слое воды.

Материалами по распределению хлорофилла-а (мг/м³) явились данные, полученные с группы спутников (дистанционное зондирование поверхности) SeaWiFS, MODIS, MERIS, VIIRS-SNPP, VIIRS-JPSS1, OLCI-S3A и OLCI-S3B, которые были обработаны компанией ACRI-ST (София Антиполис, Франция) и предоставлены как биогеохимический (BGC) продукт на базе процессора Global Ocean Colour (Copernicus-GlobColour, <https://www.copernicus.eu/en/access-data/copernicus-services-catalogue/global-ocean-colour-copernicus-globcolour-bio-geo>). В нашем случае уровень обработки исходных данных – четвертый (L4), т.е. пространственная интерполяция на регулярную сетку с шагом в 4 км по широте и долготе. Итоговая обработка и визуализация исходных данных, предоставленных в формате NetCDF (формат научного обмена данными Unidata, <https://www.unidata.ucar.edu/>), проведена в программе Panoply Data Viewer (PanoplyWin, <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>).

Сведения о вулканической активности, сроках извержения, его мощности, направленности распространения пепловых выбросов получены из различных источников сети Интернет: вулканологические сервисы KVERT (Камчатская группа оперативного реагирования на вулканические извержения, http://www.kscnet.ru/ivs/kvert/index_eng.php), SVERT (Сахалинская группа оперативного

реагирования на вулканические извержения, <http://www.imgg.ru/ru/teams/svert>), TokyoVAAC (Консультативный центр по вулканическому пеплу Японского метеорологического агентства, <https://ds.data.jma.go.jp/svd/vaac/data/index.html>).

Результаты

В эксперименте, проходившем с 18 по 25 мая 2023 г., проведены 4 последовательные экстракции из одной и той же навески пепла соответствующего вулкана. Суммарное содержание водорастворимых БЭ и сульфатов в пеплах различалось (таблица).

Таблица. Содержание БЭ и сульфатов (г/кг) в пеплах вулканов Райкоке и Чикурачки

Вулкан	DIP	DIN	Fe	DSi	SO ₄ ²⁻
Райкоке	0.0002	0.026	0.005	0.056	21.730
Чикурачки	0.0004	0.017	0.008	0.037	9.108

Пепел вулкана Райкоке выделялся по содержанию минерального азота и кремния, а также, значительно, – сульфатов. В пепле вулкана Чикурачки было больше минерального/фосфатного фосфора и железа. В минеральном азоте в обоих случаях более 90 % составлял азот аммония. Значение pH в водных вытяжках из пепла вулкана Райкоке последовательно изменялось, составляя 4.85, 4.92, 5.05, 5.02. В меньшей степени прослежены изменения pH в водных вытяжках из пепла вулкана Чикурачки – 5.28, 5.43, 5.67, 5.02. В конце эксперимента часть пепла вулкана Чикурачки превратилась в опалесцирующую взвесь, и образец стал непригоден для дальнейшей экстракции. Структура пепла вулкана Райкоке не изменилась.

Извержение вулкана Райкоке отличалось большой активностью (индекс взрывоопасности VEI 3) и малой продолжительностью – основное извержение наблюдалось в течение 21-22 июня 2019 г. [1] и привело к выбросу в стратосферу крупных шлейфов пепла (рис. 1а), которые распространились на расстояние более 1000 км в восточном-северо-восточном направлении.

По сообщению экипажа яхты «Iron Lady», находившейся в непосредственной близости от места события, выпадение пепла на поверхность океана в период извержения было очень интенсивным.

По данным спутникового мониторинга, распределение хлорофилла-а до момента извержения (18.06.2019 г. – рис. 1б), в день максимального выброса пепла (22.06.2019 г. – рис. 1в) и через 2 дня после прекращения активной фазы извержения (25.06.2019 г. – рис. 1г) носило равномерный характер с низкими концентрациями по всей видимой площади. Точечные пятна «цветения» отмечены на севере района и у западного побережья Камчатки и не связаны с пеплопадом. К 25 июня концентрация пигмента хлорофилла-а в районе вулкана Райкоке оставалась, в общем, на очень низком уровне.

Вулкан Чикурачки, являясь одним из наиболее активных вулканов Курильских островов, в 2022 г. проявлял повышенную активность не менее 5 раз [2, 3]: с 30.01 по 03.02, с 23 по 24.06, с 30.06 по 1.07, с 21.08 по 2.09 и наиболее мощное – с 13 по 20.10 (индекс взрывоопасности VEI 2). В отличие от рассмотренного извержения вулкана Райкоке 2019 г., данное событие было не столь интенсивным, но значительно растянуто по времени, когда пепел извергался «порционно». При этом в направлениях разноса пепловых шлейфов выделялись две основные траектории – запад-юго-запад и восток-юго-восток, попадая в акватории Охотского моря и Тихого океана. Дальность распространения от 310 км (зима) до 790 км (осень).

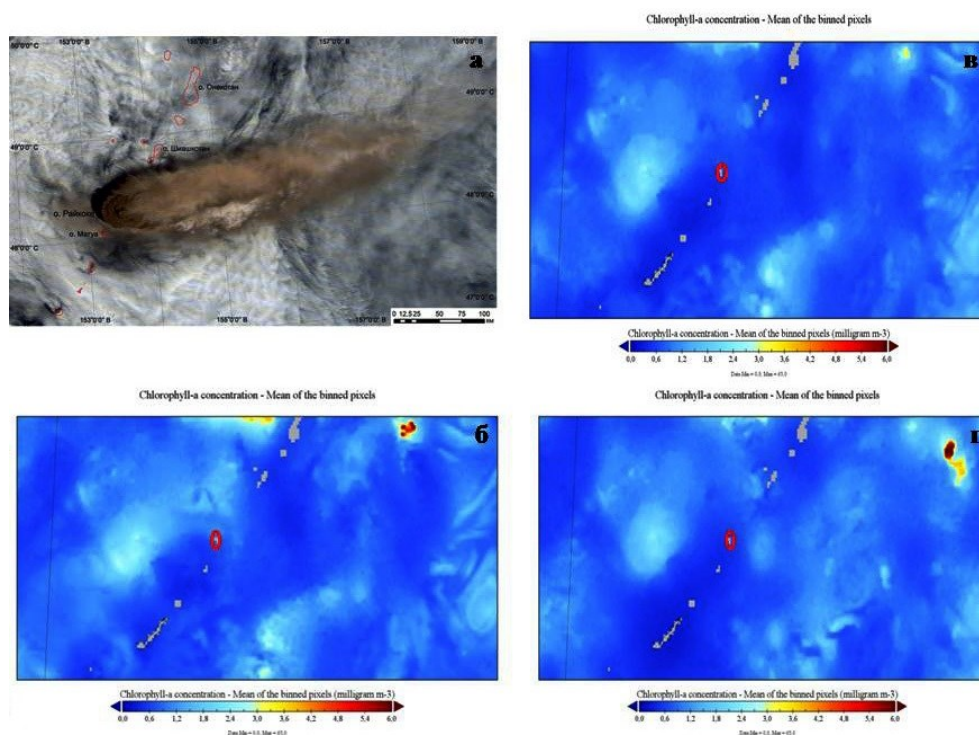


Рис. 1. Пепловый шлейф вулкана Райкоке на спутниковом снимке ИСЗ TERRA/MODIS 22 июня 2019 г. (а) [1]; изменение распределения концентрации хлорофилла-а ($\text{мг}/\text{м}^3$) 18.06.2019 (б), 22.06.2019 (в), 25.06.2019 (г) в акватории центральной части Курильской островной дуги.

Рассмотрим терминальные ситуации, когда развитие фитопланктона идет на спад, микроводоросли заглубляются и значения хлорофилла-а в акваториях невысоки – это зима и осень 2022 г. (рис. 2).

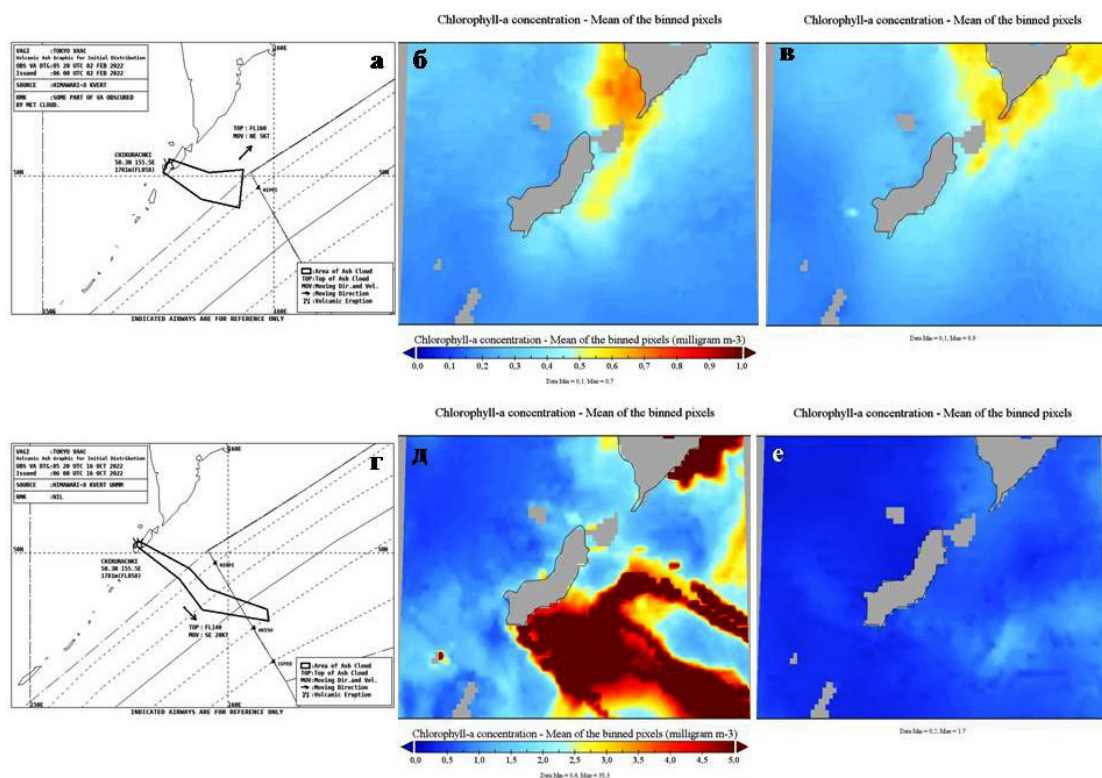


Рис. 2. Распределение пепловых шлейфов (а, г) и хлорофилла-а (б, в, д, е) в акватории у северных Курильских островов и южной оконечности Камчатки в 2022 г.: а, б – 02.02; в – 05.02; г, д – 16.10; е – 20.10.

Как зимой (рис. 2а-в), так и осенью (рис. 2г-е) поступление пепла в воду, вероятно, стимулировало развитие фитопланктона, которое выразилось в увеличении концентрации хлорофилла-а. Однако, если зимой воздействие пепла было пролонгировано, то осенью «цветение» закончилось на четвертый день после поступления пепла в акваторию.

Полученные результаты позволяют выдвинуть гипотезу о том, что пепел вулкана Райкоке не вызвал положительного отклика у фитопланктона прилегающей акватории. Пепел вулкана Чикурачки, напротив, оказал стимулирующее воздействие на фитопланктон. Различная реакция автотрофной микрофлоры морских акваторий на пеплы вулканов Райкоке и Чикурачки связана со структурой и удельным весом пеплов, что зависит от различий в их элементном составе, а также от особенностей в динамике поступлений пеплов в воду морских акваторий.

Список литературы

1. *Гирина О.А., Луян Е.А., Уваров И.А., Крамарева Л.С.* Извержение вулкана Райкоке 21 июня 2019 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 303-307.
2. *Гирина О.А., Мельников Д.В., Маневич А.Г. и др.* Спутниковый мониторинг эксплозивного извержения 2022 года вулкана Чикурачки (Северные Курилы) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 302-306.
3. *Дегтерев А.В., Чибисова М.В.* Эксплозивная активность вулкана Чикурачки в январе-октябре 2022 г. (о. Парамушир, Северные Курильские острова) // Геосистемы переходных зон. 2022. Т. 6. № 4. С. 328-338.
4. *Лепская Е.В.* Влияние пепла вулкана Алаид на фитопланктон озера Курильского (Южная Камчатка) // Исследование биологии и динамики численности промысловых рыб камчатского шельфа. 1993. Вып. II. С. 21-24.
5. *Лепская Е.В., Маслов А.В., Тепнин О.Б., Свириденко В.Д.* Биогенные элементы (содержание, динамика вымывания) из разноразмерного пирокластического материала Плоского Толбачика (извержение 2012-2013 гг.). // Вулканизм и связанные с ним процессы. Материалы региональной научной конференции, посвященной Дню вулканолога 29-30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 227-235.
6. *Kurenkov I.I.* The Influence of volcanic ashfall on biological processes in Lake // Limnology and Oceanography. 1966. V. 11. № 3. P. 345-363.
7. *Lepskaya E.V., Lupikina E.G., Bazarkina L.A.* The impact of pyroclastics upon flora and fauna of some lakes (Kamchatka peninsula and Kunashir island, Kuriles) // International Volcanological Congress. Ankara. 1994.

Ледники вулкана Шивелуч
Маневич Т.М.
Glaciers of the Shiveluch volcano
Manevich T.M.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;
e-mail: lav27@kscnet.ru

Представлены основные сведения о современном оледенении вулкана Шивелуч, его особенности и динамика.

Вулкан Шивелуч – не только крупнейшее вулканическое сооружение Камчатки, но и центр современного оледенения. Постоянная эксплозивная деятельность вулкана вносит особенности в формирование и существование ледниковых образований.

Первые сведения о ледниках вулкана Шивелуч были представлены геологическим отделом Камчатской экспедиции Русского географического общества в 1908-1910 гг. С.А. Конради и Н.Г. Келль [3] обозначили вулкан Шивелуч как самостоятельный центр оледенения, с которого спускаются шесть ледников (наиболее крупный из них – ледник Тюшева), их языки заканчиваются на высоте 800-900 м.

А.А. Меняйлов [4] описывает ледниковые отложения, которые проявляются всюду в виде морен и флювиогляциальных отложений. Из современных ледников называет 1, 2, 3, 4 и ледник Тюшева. Последний (ледник Тюшева) имеет крупные массивы мертвого льда, что свидетельствует о его отступании.

Наиболее полные сведения о ледниках вулкана прошлого столетия представлены в Каталоге ледников [1]. В нем дается информация о 7 ледниках общей площадью 30.4 км², которые относятся к бассейнам трех рек: р. Озерная, р. Ильчинец (бассейн р. Камчатка) и р. Укамкина.

Современное оледенение

В работе [5] представлены результаты измерений площадей ледников и их изменений со времени каталогизации. На основании дешифрирования спутниковых снимков в 2013 г. автор выделил 8 ледников общей площадью 16.62±0.84 км² (рис. 1), в том числе два ледника, не указанные в каталоге. Ниже представлена схема современного оледенения, составленная А.Я. Муравьевым [5].

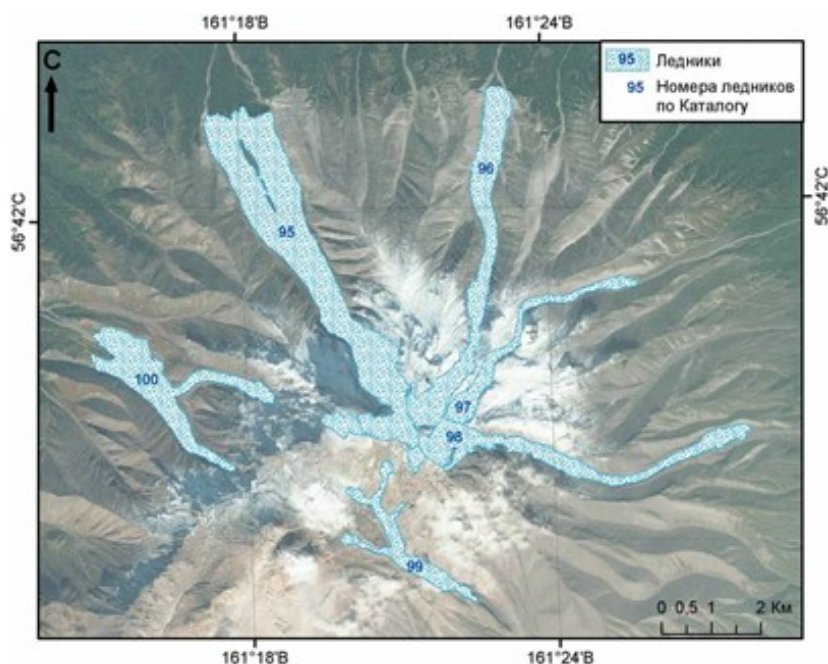


Рис. 1. Схема современного оледенения вулкана Шивелуч.

Полевые работы позволили уточнить имеющиеся данные и датировать моренные отложения двух ледников. Так, ледник № 101, расположенный, судя по каталогу, в верховьях правого притока р. Укамкина, обнаружен не был.

Ледник Тюшева залегает в барранкосах на западном склоне вулкана. Долинная часть ледника формируется при слиянии двух притоков на высоте 1100 м. Правый приток стекает с главной вершины, а левый – с седловины между Старым и Молодым Шивелучем. На высоте 950 м язык раздваивается, но оба фронта спускаются приблизительно до одного уровня – 850 м (рис. 2).

Ледник покрыт слоем пирокластического материала, местами его мощность достигает одного метра. В нижней части левого фронта на поверхности встречаются кустики ивы арктической высотой до 15 см и другие представители альпийской растительности. Судя по внешнему виду, левая часть ледника длительное время находится в стационарном состоянии. В то же время правый фронт выглядит более живым, без растительности, но лоб его уже заглажен, что говорит о начале стабилизации. Одной из причин может быть извержение вулкана Шивелуч в ноябре 1964 г., в результате которого вместе с постройкой была уничтожена часть области аккумуляции ледника. Ледяные блоки и глыбы глетчерного льда объемом до 10-15 м³ были обнаружены среди взрывных отложений на расстоянии 10 км от вулкана [2]. Это событие, вероятно, в совокупности с последующим увеличением среднелетней температуры, привело к ухудшению питания и деградации ледника. Но, учитывая информацию, представленную в работах [3, 4], в таком положении ледник находится как минимум на протяжении последнего столетия.

В перигляциальной зоне расположены несколько разновозрастных морен. Самые древние генерации хорошо задернованы, на их поверхности встречается древесная растительность, в том числе ольховый стланик высотой до одного метра. Датирование морен при помощи лишенометрии относит время формирования этих отложений к середине XIX в.



Рис. 2. Правый фронт ледника Тюшева.



Рис. 3. Фронт Четвертого ледника.

Второй по возрасту комплекс сформировался в 1930-е годы. Более молодая морена с ледяным ядром образовалась в конце 1960-х гг.

Четвертый ледник залегает в северо-западном барранкосе. Поверхность языка также покрыта мощным слоем пирокластического материала. С высоты 1000 м на поверхности ледника появляется растительность, которая на фронте переходит в почти сплошной покров с зарослями ольхового стланика высотой до полутора метров, изредка встречаются лиственницы высотой до 70 см (рис. 3). Между ледником и обоими бортами залегают гряды береговых морен. Комплекс левых береговых морен состоит из трех параллельных гряд. Самая старая морена протягивается практически вдоль всей долинной части ледника, ее длина более 2.5 км. Степень задернованности

поверхностей зависит от возраста, лишайники обильны на всех моренах. Время их формирования относится к 1870-м, 1940-м и 1960-м годам.

Вдоль правого борта, в его средней части, лежит только одна моренная гряда длиной 900 м. Судя по внешнему виду и диаметрам лишайников, время ее образования относится к концу XIX века, то есть, субсинхронно наиболее древней морене левого борта.

Отдельный интерес представляет ледник Ильчинец, залегающий на юго-восточном склоне вулкана на высоте 2700-1400 м. Питается он несколькими притоками с южных склонов Старого Шивелуча и седловины. Расположение ледника в непосредственной близости к активному куполу приводит к регулярному поступлению огромного количества продуктов извержения, которые консервируют большую часть языка. Это вызывает большие затруднения при дешифрировании ледника не только на снимках, но и на местности. Левый борт ледника проходит по краю лавового потока, что позволяет отнести его к морфологическому типу висячих ледников, поскольку у подножья потока отмечаются глыбы льда (рис. 4).

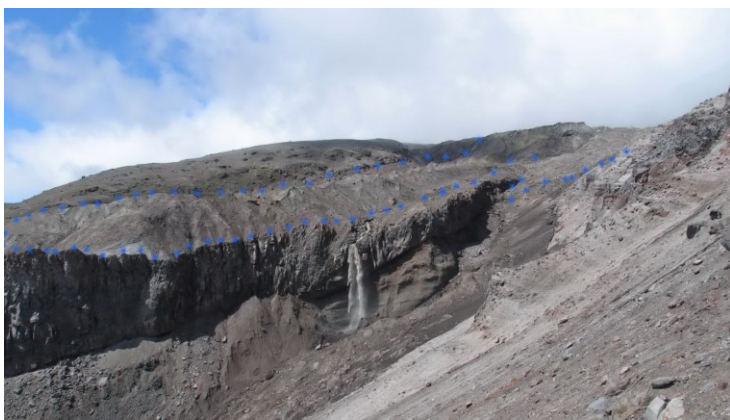


Рис. 4. Ледник Ильчинец.

Анализ аэрофотоснимков склонов вулкана за разные годы показал, что другие ледники не проявляли признаков активного движения последние полвека, а внешний вид их фронтов схож с изученными объектами.

Заключение

Оледенение вулкана Шивелуч вызывает интерес, поскольку существует на одном из самых активных вулканических сооружений. За последние полтора века ледники сократились незначительно (не более 10 %), колебания происходили во второй половине XIX века и в 1930-1940-х и 1960-х гг. Несмотря на увеличение в последние десятилетия летних температур, ледники находятся в стационарном состоянии, в отличие от невулканических районов полуострова. Это связано с бронирующими свойствами продуктов извержений, которые регулярно поступают на поверхность ледников.

Список литературы

1. *Виноградов В.Н.* Ресурсы поверхностных вод СССР: Каталог ледников СССР. Т. 20. Камчатка. Ч. 2-4. / Отв. ред. Котляков В.М. Л.: Гидрометеиздат, 1968. 67 с.
2. *Гориков Г.С., Дубик Ю.М.* Направленный взрыв на вулкане Шивелуч. В сб.: «Вулканы и извержения». Изд-во «Наука», 1969. С. 3-37.
3. *Конради С.А., Келль Н.Г.* Геологический Отдел Камчатской экспедиции 1908-1911 гг. // Известия Государственного Русского географического общества. 1925. Т. 57. Вып. 1. С. 3-32.
4. *Меняйлов А.А.* Вулкан Шивелуч – его геологическое строение, состав и извержения // Труды лаборатории вулканологии. Вып. 9. Изд-во АН СССР, 1955. 264 с.
5. *Муравьев А.Я.* Колебания ледников Камчатки во второй половине XX – начале XXI вв. Дис. на соиск. уч. ст. канд геогр. наук. Москва, 2017. 168 с.

Воздействие вулканического пепла на развитие некоторых видов сельскохозяйственных культур в условиях лабораторного эксперимента

Матвеева Е.В.¹, Позолотина Л.А.², Климова А.В.^{1,3}, Клочкова Т.А.¹

The impact of volcanic ash on the development of certain species of crops in the laboratory experiment

Matveeva E.V., Pozolotina L.A., Klimova A.V., Klochkova T.A.

¹ Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: annaklimovae@mail.ru

² Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

³ Камчатский филиал Тихоокеанского института географии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

В работе представлены данные по биотестированию пепла вулкана Шивелуч, изверженного в апреле 2023 г. Водные вытяжки пепла в концентрациях 100, 300 и 500 г/л обладали слабым стимулирующим рост растений кресс-салата и свеклы эффектом и не проявляли токсичных свойств. При этом проростки в значительной мере аккумулировали из водных растворов пепла Pb, Ni, Sr, Cu и Mn.

Введение

Территория северо-восточной части Камчатки, а именно район вулканов Северной группы, относится к зоне активного вулканизма с частыми пеплопадами [6]. Здесь продукты вулканической деятельности регулярно поступают в растительно-почвенный покров. Так, в апреле 2023 г. произошло пароксизмальное эксплозивное извержение вулкана Шивелуч, мощность слоя пепла в расположенных в непосредственной близости к вулкану поселках достигала 8 см [2, 6]. Определение воздействия пеплов на плодородие почв и биопродуктивность экосистем остается до сих пор актуальной задачей [4]. Поэтому целью настоящей работы было определение влияния пепла вулкана Шивелуч, изверженного в апреле 2023 г., на энергию роста, всхожесть и химический состав проростков сельскохозяйственных культур.

Материалы и методы

Образцы пепла вулкана Шивелуч, изверженного 10-13 апреля 2023 г., были отобраны в пос. Ключи (Камчатский край) в период 10-20 апреля 2023 г. Для проведения всех лабораторных работ образцы высушивали при температуре 105 °С. Далее были приготовлены водные вытяжки с содержанием пепла 100, 300 и 500 г в 1 л дистиллированной воды. После фильтрации вытяжки использовали для оценки токсичности и биологической активности образцов пепла, рН полученных растворов варьировал в пределах 4.5-4.7.

Для фитотестирования использовали семена кресс-салата (*Lepidium sativum* L., 1753), сорта Ванька кучерявый, Весенний и Обильнолистный, и свеклы обыкновенной подвид мангольд (*Beta vulgaris* L. subsp. *vulgaris* var. *vulgaris*) – сорта Изумруд и Рубин. Условия проведения лабораторных экспериментов для определения энергии прорастания и всхожести семян сельскохозяйственных культур соответствовали ГОСТ 12038-84 [3], для определения фитотоксичности – СанПин 2.1.7.573-96 [5].

В образце пепла, из которого готовились водные вытяжки, а также в проростках кресс-салата и свеклы после лабораторных экспериментов был определен микроэлементный состав. Содержание элементов Co, Mo, Cd, Pb, Ni, Cr, Ba, Sr, Cu, Zn, Mn и Al во всех образцах определяли с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с микроволновой плазмой AES-MP 4200 (Agilent Technologies, США) [1, 7].

Результаты и обсуждение

Развитие семян кресс-салата в испытуемых группах, в средах с добавлением пепла, и контрольной группе не отличалось по показателям энергии прорастания и всхожести (табл. 1). Однако после проведения эксперимента общая сухая масса проростков кресс-салата во всех испытуемых группах превышала контрольные значения на 48-81 %. Вероятно, подобная прибавка общей фитомассы растений связана с улучшением и активизацией их питательного режима благодаря внесенному пеплу вулкана Шивелуч. Ранее в условиях полевого эксперимента было показано увеличение урожайности картофеля при внесении пепла в почву [4].

Таблица 1. Развитие семян салата, выращенных на средах с добавлением пепла

Группа	pH	Количество семян	Энергия прорастания, % (5 день)	Всхожесть, % (10 день)	Общая масса проростков, г
контроль	7.2	200	99.9	99.9	0.21
ДВ+пепел 100 г/л	4.7	200	99.9	99.9	0.31
ДВ+пепел 300 г/л	4.5	200	99.9	99.9	0.35
ДВ+пепел 500 г/л	4.5	200	99.9	99.9	0.38

Показатели энергии прорастания и всхожести семян свеклы во всех группах были низкими, однако в испытуемых группах превышали контрольные значения на 2.5-3.7 % (табл. 2). Вероятно, медленное прорастание семян растений в целом обусловлено их сортовой принадлежностью. Общая масса проростков свеклы, наоборот, во всех испытуемых группах снижалась в зависимости от увеличения концентрации пепла в среде и едва достигала 75 % от контрольных значений. При этом длина корней проростков только в группе с максимальным добавлением пепла превышала контрольные показатели на 15 %, что указывает на слабый стимулирующий рост растений эффект. В целом, протестированные водные вытяжки пепла не обладали фитотоксичными свойствами, ингибирующими развитие семян как свеклы, так и кресс-салата (табл. 1, 2).

Таблица 2. Развитие семян свеклы, выращенных на средах с добавлением пепла

Группа	pH	Кол-во семян	Энергия прорастания, % (5 день)	Всхожесть, % (10 день)	Общая масса проростков, г	Длина корня	
						мм	% от контроля
контроль	7.2	885	5.8	5.8	0.50	75.3	100
ДВ+пепел 100 г/л	4.7	885	8.7	8.7	0.35	71.0	94.3
ДВ+пепел 300 г/л	4.5	885	9.5	9.5	0.38	69.7	98.1
ДВ+пепел 500 г/л	4.5	885	8.3	8.3	0.32	80.7	115.8

Химический состав пепла вулкана Шивелуч, изверженного в апреле 2023 г., характеризовался широким спектром элементов (табл. 3). Исследованные образцы пепла включали повышенное содержание Al, Mn, Zn, Cu, Sr, Ba, Cr. Следует также отметить наличие в собранных образцах пепла токсичных металлов – Pb и Cd, однако последний определен в следовых количествах. В водных вытяжках пепла все указанные выше элементы, за исключением Pb, присутствовали в детектируемых концентрациях.

Элементный анализ проростков кресс-салата и свеклы выявил схожие тенденции в накоплении Pb, Ni, Sr, Cu и Mn (табл. 3). Для указанных выше металлов отмечено многократное превышение их содержания в проростках из групп с максимальным содержанием пепла в сравнении с растениями из контрольных групп. Особенно

выраженный эффект накопления элементов растениями отмечен для Ni, Mn, Cu и Pb. Последний накапливался у проростков свеклы в концентрациях более чем 2.6-4.2 раз в сравнение с контрольными образцами, у проростков кресс-салата – свыше 8.9-14.0 раз. Аккумуляция Cr прослеживалась у проростков тестируемых видов растений только в группах, выращенных на водных вытяжках пепла 500 г/л (табл. 3). В условиях лабораторного эксперимента не выявлено различий в накоплении проростками кресс-салата Cd, Ba и Zn и проростками свеклы – Cd, Ba и Al. Отмеченные выше особенности содержания элементов в растениях, в первую очередь, характеризуются их видоспецифичностью и ролью некоторых металлов в процессах жизнедеятельности.

Таблица 3. Элементный состав пепла, водной вытяжки и фитомассы проростков салата и свеклы

Исследованные образцы пепла и растений	Элемент, мг/кг											
	Co	Mo	Cd	Pb	Ni	Cr	Ba	Sr	Cu	Zn	Mn	Al
Пепел извержения вулкана Шивелуч, апрель 2023 г.												
Пепел, РФС*	–	–	–	16	30	86	426	374	37	113	–	–
Пепел, АЭС-МП**	<0.003	<0.001	0.93	<0.003	<0.001	21.95	10.8	20.31	20.95	19.14	68.94	2112.94
Водная вытяжка, ПФ***	0.12	–	0.38	<0.005	0.037	0.002	0.229	0.499	0.012	0.090	0.920	1.62
Проростки салата												
контроль	<0.003	<0.001	0.56	0.9	3.61	0.8	19.94	15.01	14.86	73.54	40.14	42.38
ДВ+пепел 100 г/л	<0.003	<0.001	0.52	2.35	3.96	0.8	12.43	20.54	26.45	63.17	48.49	64.08
ДВ+пепел 300 г/л	<0.003	<0.001	0.48	2.84	5.4	0.68	7.61	29.39	45.11	63.02	99.31	70.29
ДВ+пепел 500 г/л	<0.003	<0.001	0.61	3.74	7.97	3.83	9.67	34.05	86.32	73.37	108.24	104.49
Проростки свеклы												
контроль	<0.003	<0.001	0.60	0.34	2.14	3.52	16.9	14.86	13.72	43.41	90.49	93.87
ДВ+пепел 100 г/л	<0.003	<0.001	0.49	3.47	3.44	6.45	17.53	15.16	21.28	55.34	110.48	52.07
ДВ+пепел 300 г/л	<0.003	<0.001	0.33	4.75	4.41	3.73	14.12	21.17	28.65	55.15	193.95	88.74
ДВ+пепел 500 г/л	0.03	<0.001	0.38	3.03	5.08	6.85	16.99	21.69	29.21	57.79	208.64	99.60

Примечание. Элементный анализ пепла выполнен методом рентгенофлуоресцентной спектроскопии* (мг/кг), для водной вытяжки – методом плазменной фотометрии*** (мг/л) и приведен по данным А.В. Сергеевой. Собственные данные по элементному составу пепла, выполненные с помощью атомно-эмиссионного спектрометра после кислотного озоления образцов, обозначены **.

Закключение

Полученные результаты могут быть использованы в сельском хозяйстве для повышения урожайности овощных культур, в частности проращивания микрозелени кресс-салата и свеклы. Продолжение экспериментов по подбору эффективных концентраций пепла и увеличению ассортимента тестируемых видов растений является перспективным направлением дальнейших исследований. Кроме того, выявленные особенности накопления растениями отдельных элементов дают представление об их вовлечении в биотические компоненты. Безусловно, это является важным для

понимания процессов поступления и перераспределения некоторых металлов в наземных экосистемах особенно в районах активного пеплопада.

Список литературы

1. *Авдощенко В.Г., Климова А.В.* Оценка загрязнения растительного покрова города Петропавловска-Камчатского (Камчатский край) тяжелыми металлами в 2017-2020 гг. // Вестник КамчатГТУ. 2021. № 55. С. 89-101. <https://doi.org/10.17217/2079-0333-2021-55-89-101>
2. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291>
3. ГОСТ 12038-84. Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести. М.: Стандартинформ, 2011. 29 с.
4. *Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С., Ряховская Н.И. и др.* Особенности геохимической трансформации естественных почв и повышение продуктивности агроценозов при поступлении продуктов вулканических извержений // Вулканология и сейсмология. 2016. № 3. С. 52-72. <https://doi.org/10.7868/S0203030616030068>
5. СанПин 2.1.7.573-96. Гигиенические требования к использованию сточных вод и их осадков для орошения и удобрения. Приложение 10. Методика биотестирования по проращиванию семян. М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. 54 с.
6. *Озеров А.Ю., Гирина О.А., Жаринов Н.А. и др.* Извержения вулканов Северной группы Камчатки в начале XXI века // Вулканология и сейсмология. 2020. № 1. Р. 3-19. <https://doi.org/10.31857/S0203030620010058>
7. *Хеттипатирана Т., Мельник М.И.* Определение содержания тяжелых и токсичных металлов в почвах с использованием атомно-эмиссионного спектрометра с микроволновой плазмой // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. Владивосток: Дальнаука, 2014. № 6. С. 728-733.

**Динамика вымывания солей из пепла вулкана Шивелуч, извержение апреля 2023 г.
Назарова М.А., Сергеева А.В., Кузьмина А.А., Карташева Е.В.**

Dynamics of salt leaching from the ash of Shiveluch volcano, April 2023 eruption

Nazarova M.A., Sergeeva A.V., Kuzmina A.A., Kartasheva E.V.

Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: nazarovamar@mail.ru

Исследовано вымывание растворимых солей из пепла вулкана Шивелуч, извержение 10-13 апреля 2023 г. Смоделировано действие метеорных вод на пепловые отложения. Обнаружено, что вымывание солей из вулканического пепла происходит немонотонно, с максимумом, после которого вынос убывает по экспоненте. За один сезон пепел практически очищается от растворимых солей.

Введение

В апреле 2023 г. произошло пароксизмальное эксплозивное извержение вулкана Шивелуч, которое сопровождалось мощными пепловыми выбросами [1]. Пеплопад затронул ряд населенных пунктов в окрестности вулкана, особенно сильно повлиял на поселки Ключи, Майское и Козыревск, которые были покрыты слоем пепла мощностью до 8 см, в зоне выпадения пепла оказалось около 5600 чел.

Поступление растворимых солей пепла в воды питьевого и хозяйственно-бытового назначения могло привести к изменению их состава для потребителя. Например, в результате извержения вулкана Корякский в 2008-2009 гг. произошло понижение pH до ~4-5, повышение содержания сульфатов и хлоридов кальция, магния и натрия, а также солей алюминия [2]. Поэтому в настоящей работе были исследованы водные вытяжки пепла и динамика вымывания растворимых солей из него. Целью работы было установление динамики вымывания растворимых солей из свежееизверженного пепла в почвенные покровы и водоемы поселков.

Материалы и методы

Образцы пепла отобраны Д.В. Мельниковым в окрестностях поселка Ключи непосредственно во время извержения в апреле 2023 г. Были получены водные вытяжки свежего пепла, для чего 100 г пепла смешали с 1 л воды, через сутки профильтровали и определили макрокомпонентный состав по стандартным методикам.

Динамика вымывания солей из пепла была исследована с помощью портативного солемера Combo (Hanna) в ходе непрерывного эксперимента. Солемер измеряет электропроводность раствора и пересчитывает ее в содержание хлорида натрия, которое коррелирует с содержанием солей в растворе. Также была исследована динамика вымывания солей при порционном промывании навески пепла и высушивании фильтрата. Непрерывный эксперимент отражает поступление растворимых веществ из пепла при попадании пепла в водоем. Дискретный или порционный эксперимент моделирует или отражает промывание пепла, который выпал на суше, метеорными водами.

Результаты и обсуждение

В солевом составе свежих пеплов доминируют сульфат кальция и хлорид натрия, в меньших концентрациях находятся сульфаты и хлориды калия, аммония, магния, алюминия, железа. Из микроэлементов в небольших количествах содержатся барий, стронций, мышьяк, кадмий.

На рис. 1 показаны временные зависимости массы вымываемых солей при дискретном промывании водой и при постоянном нахождении в воде. В обоих случаях вымывание солей немонотонное, имеет экстремум в начальные моменты времени. Немонотонность скорее всего связана с протеканием реакций при контакте растворимых солей пепла и воды. В противном случае наблюдалась бы монотонная

кривая, с постепенным замедлением. Наиболее вероятно, что в пепле вулкана Шивелуч содержатся не только сульфат кальция и хлорид натрия, но и хлорид кальция с сульфатом натрия, в этом случае при растворении между ними протекает реакция с образованием малорастворимого гипса. Наличие хлорида кальция и сульфата натрия в исходном пепле весьма вероятно, хлориды летучи и могут поступать из глубин или из магматического расплава при его дегазации. При образовании гипса уменьшается содержание солей, одновременно из раствора могут частично удаляться некоторые токсичные компоненты, такие как барий, стронций, мышьяк, кадмий. Барий, стронций и кадмий могут изоморфно заместить кальций в гипсе, а мышьяк наиболее вероятно выпадет в осадок в виде малорастворимого арсенита или арсената кальция. Таким образом, ожидается некоторое самоочищение вод, промываемых пеплом.

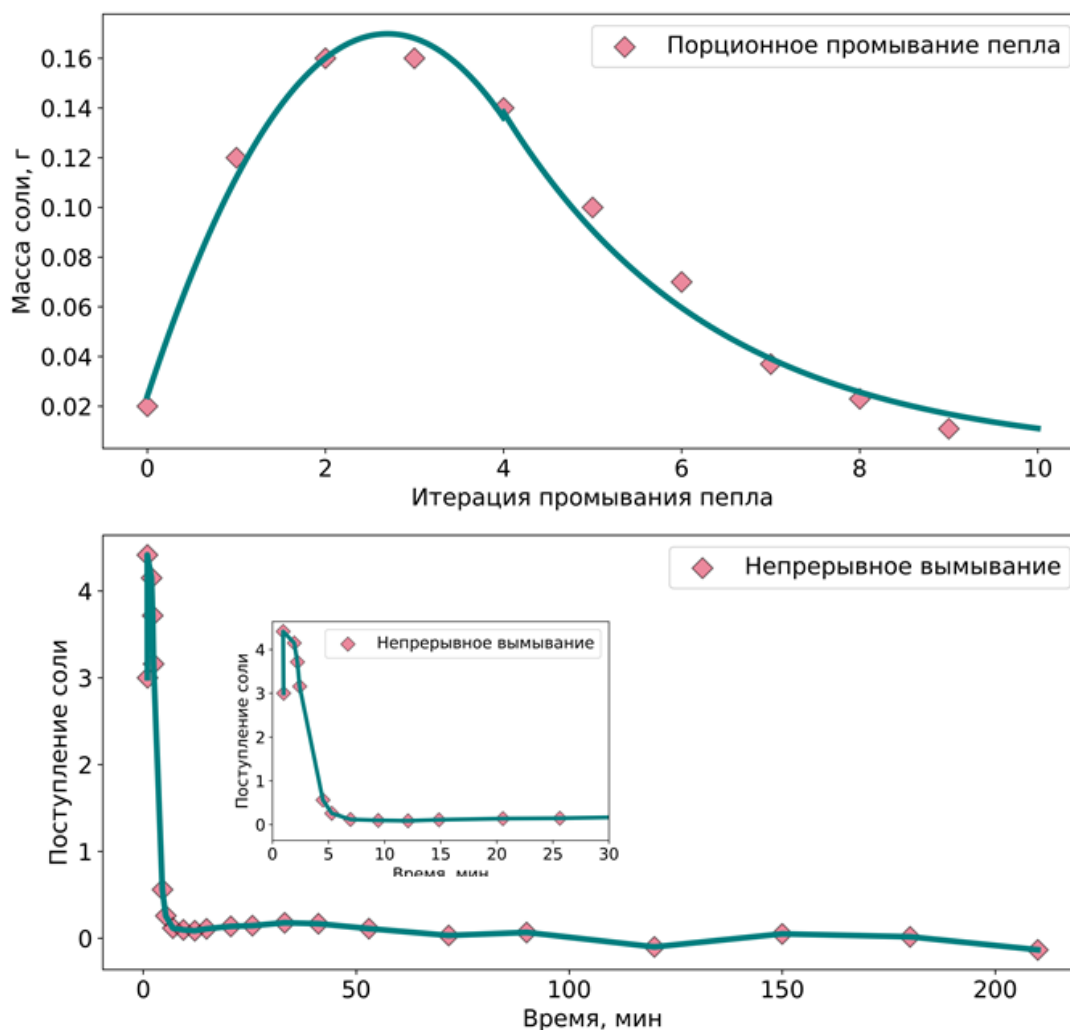


Рис. 1. Сравнение порционного и непрерывного режимов промывания пепловых отложений.

Динамика метеорных осадков поселка Ключи показана на рис. 2. Апрель и июль в 2023 г. характеризуются более высоким уровнем осадков по сравнению с медианным значением, а всего с апреля по август в поселке Ключи выпало 287 мм осадков, что эквивалентно 287 кг воды на квадратный метр. Средняя масса сухого пепла, приходящаяся на квадратный метр в поселке Ключи, в мае составляла порядка 30 кг, а непосредственно после извержения – порядка 50-60 кг на квадратный метр. Таким образом, соотношение масс метеорной воды и пепла на площади пос. Ключи – от 10:1 до 5:1. Этого достаточно для промывания пепла.

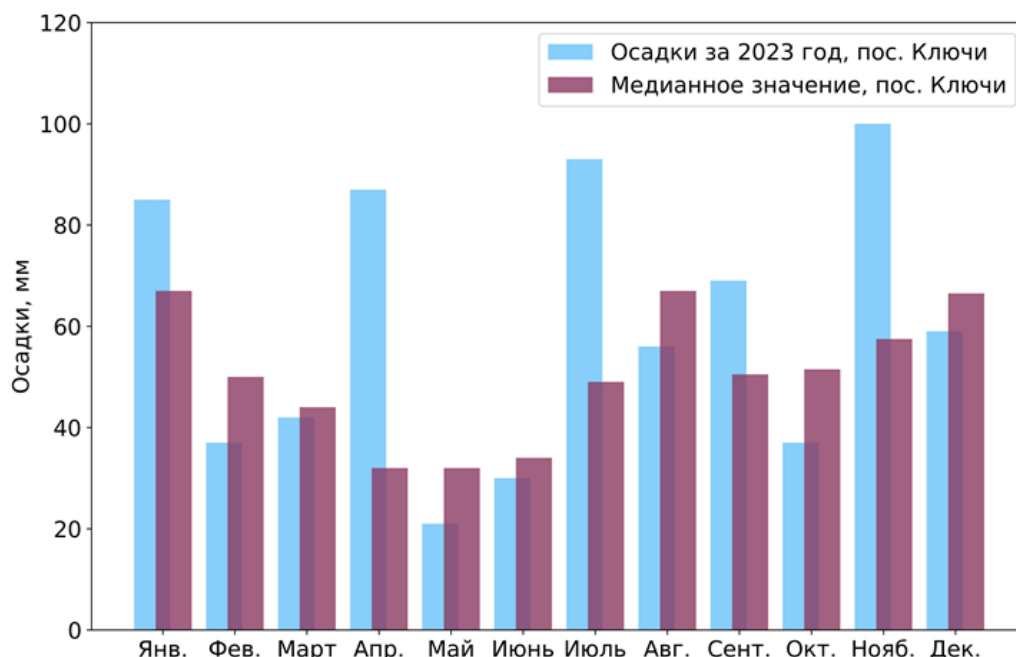


Рис. 2. Медианный уровень осадков в поселке Ключи за 1936-2023 гг. и осадки в 2023 г.

Исследование состава водных вытяжек пепла, пролежавшего до августа, показало, что контактные с пеплом воды потеряли до 90 % своей минерализации, произошло изменение состава вод: от хлоридно-сульфатного натриево-кальциевого состава к хлоридно-гидрокарбонатному кальций-натриевому. Практически за сезон произошло естественное промывание пепла.

Заключение

Пепел мощного эксплозивного извержения вулкана Шивелуч, произошедшего 10-13 апреля 2023 г., нес в себе высокие концентрации растворимых веществ. В основном, среди растворимых солей были сульфаты и хлориды натрия и кальция. За сезон, в результате естественного выпадения осадков, пепел промылся, и воды, контактирующие с ним, по составу приблизились к составу местных пресных источников.

Список литературы

1. *Гирина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-2-283-291
2. *Мелекесцев И.В., Карташева Е.В., Кирсанова Т.П., Кузьмина А.А.* Загрязненная свежевыпавшей тефрой вода как фактор природной опасности (на примере извержения вулкана Корякский, Камчатка, в 2009-2009 гг.) // Вулканология и сейсмология. 2011. № 1. С. 19-32.

Возраст Паланского оползня (Корякия): предварительные результаты
Певзнер М.М.¹, Буркова А.А.², Овсянников Г.Н.³, Нечушкин Р.И.¹, Толстых М.Л.⁴
Age of the Palan Landslide (Koryakia): preliminary results
Pevzner M.M., Burkova A.A., Ovsyannikov G.N., Nechushkin R.I., Tolstykh M.L.

¹ Геологический институт РАН, г. Москва;

e-mail: m_pevzner@mail.ru

² Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, г. Хабаровск

³ Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский

⁴ Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, г. Москва

Приводятся первые данные о возрасте Паланского оползня. Выделен новый тип отложений – пыль обрушения (обвала, оползня).

Паланский оползень (ПО) впервые был выделен в В.Л. Леоновым и О.Н. Егоровым [3] как крупный комплекс сейсмогенных обвального-оползневых отложений в долине р. Палана (рис. 1а, б), возраст события не обсуждался. Во всех предшествующих работах отложения ПО интерпретировались как ледниковые позднплейстоценовые [1, 5].

Главная цель наших работ заключалась в определении возраста образования ПО. Были проведены комплексные тефрохронологические и радиоуглеродные исследования: изучена серия шурфов в торфах, перекрывающих отложения оползня. Радиоуглеродное датирование выполнено в ГИН РАН. Кроме того, изучались собственно отложения ПО.

Отложения Паланского оползня

В районе наших работ (рис. 1б) были изучены наиболее поздние порции этого события: блоковая фация, скальный обвал и подстилающие их отложения обломочной лавины. Блоковая фация (рис. 1в, г) обнажается в серии обрывов правого берега р. Палана, высота обрывов над урезом реки 80-100 м. Представлена осадочными и вулканогенно-осадочными отложениями, которые, согласно [1], характерны для пород эрмановской свиты, слагающей средние части склонов долины.

Фация обвала установлена в обрыве левого берега реки. Толща (10 м видимых) представлена хаотическим нагромождением глыб массивных андезитов до 2.5 м в поперечнике (рис. 1е). Глыбы с оббитыми гранями, плотно уложены, ориентированы хаотично, заполнитель – аналогичные, но более мелкие обломки. Согласно [1], такими породами сложены горы Автолкын и гора Масса (рис. 1б).

Холмы обломочной лавины (рис. 1в, д) высотой 5-15 м сложены главным образом несортированными отложениями осадочных, вулканогенно-осадочных, в меньшей степени магматических пород: разноразмерный щебень, дресва, обломки в песчаном, реже песчано-глинистом заполнителе. Количество и размерность обломков лав (андезиты, андезибазальты, реже базальты и дациты) резко уменьшается по мере удаления от реки на юг. По набору пород близки к породам эталонской свиты, которые, по данным [1], слагают нижние части склонов долины.

Межхолмовые понижения заняты озерами и/или покрыты торфяными болотами глубиной до 2.5 м. В подошве шурфов, выкопанных на этих болотах, вскрываются дресвяники, не отличимые по составу обломков от фации холмов. Кровля дресвяников обогащена материалом глинисто-алевритовой размерности темно-сизого цвета.

Результаты тефрохронологических работ

В изученных разрезах были установлены три уверенных прослоя тефры, которые мы связываем с деятельностью вулкана Шивелуч. Корреляция этих пеплов в разрезах профиля (рис. 2а) не вызывает сомнения.

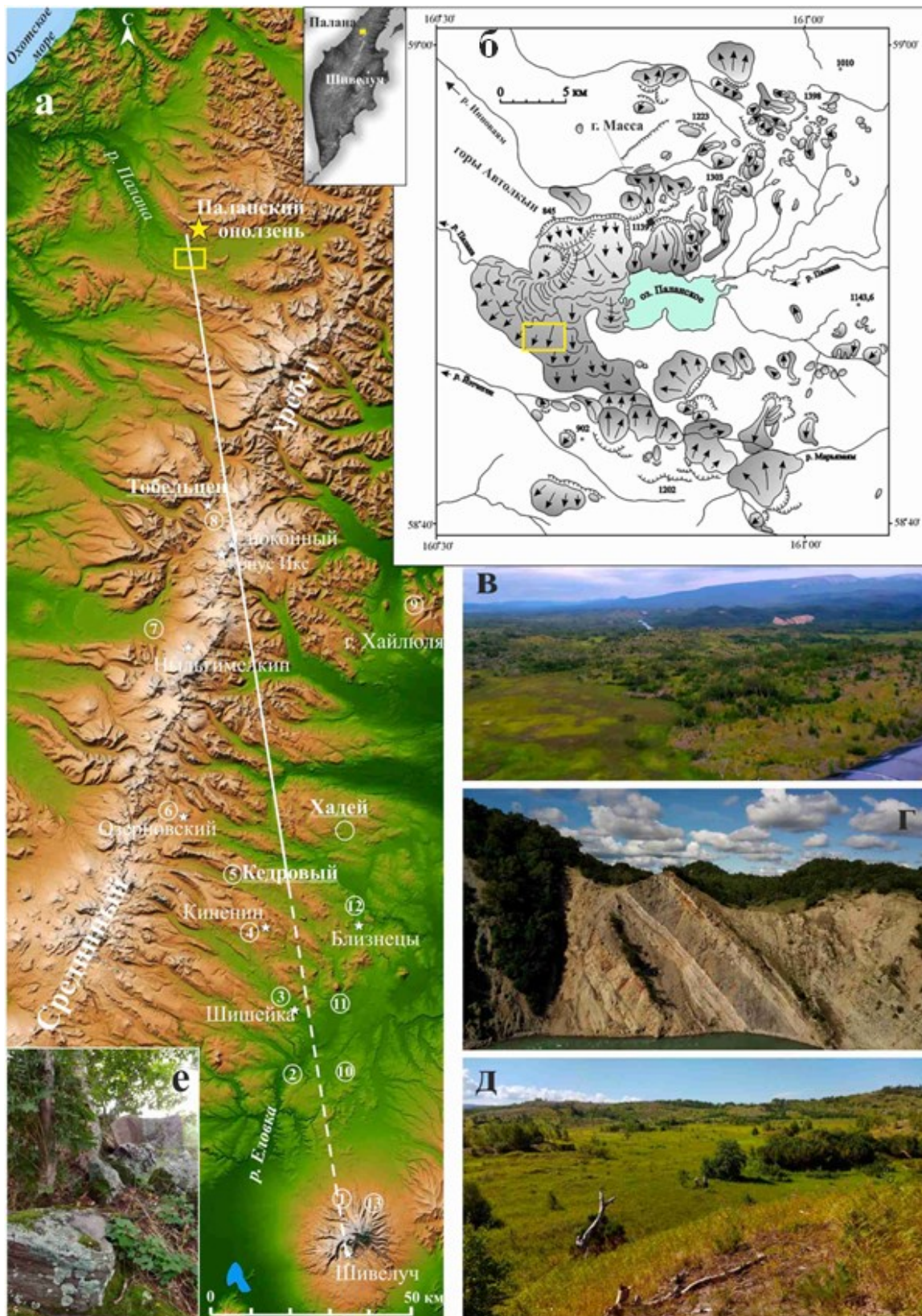


Рис. 1. Паланский оползень. (а) – опорные разрезы почвенно-пирокластических чехлов по профилю вулкан Шивелуч – р. Палана. Номера разрезов (1-13) в соответствии с [4], новые разрезы в долине р. Палана и на руч. Хадей см. рис. 2. (б) – карта отложений Паланского оползня из [3], прямоугольник – район наших полевых работ 2022 г. (в-е) – отложения Паланского оползня: (в) – на переднем плане холмы обломочной лавины, на среднем – светлые обрывы блоковой фации, на заднем – горы Автолкын, справа оползневой цирк, вид с вертолета на ССЗ; (г) – блоковая фация, высота обрыва 80-90 м, вид с квадрокоптера на ЗСЗ; (д) – по мере удаления холмы обломочной лавины группируются в серповидные гряды, выпуклая сторона направлена к югу, межхолмовые понижения заболочены; (е) – глыбы обвала.

Кроме вулканических пеплов, в верхней части колонки были выявлены не менее двух прослоев, которые мы идентифицируем как пыль обрушения (рис. 2а, б). На рис. 2в видно, что отложения пыли I представлены 6-см горизонтом, где в кровле и подошве залегают пески светло-бежевые тонко- и мелкозернистые, а середина слоя представлена темно-сизым глинистым алевритом с грубым песком и обломками плотных пород мелко-дресвянистой размерности с сильно оббитыми гранями. В других разрезах этот же горизонт был представлен либо тонко- и мелкозернистым песком бурым, либо светло-палевым алевритом. Прослой тонкой фракции пыли и горизонт тефры дальнего разноса оказывались визуально не различимы. Предположительно, эта пыль связана со сходом молодых оползней; очевидно, события были достаточно сильными, чтобы не только песок, но и обломки лав до 1 см в диаметре долетели до левобережья Паланы.

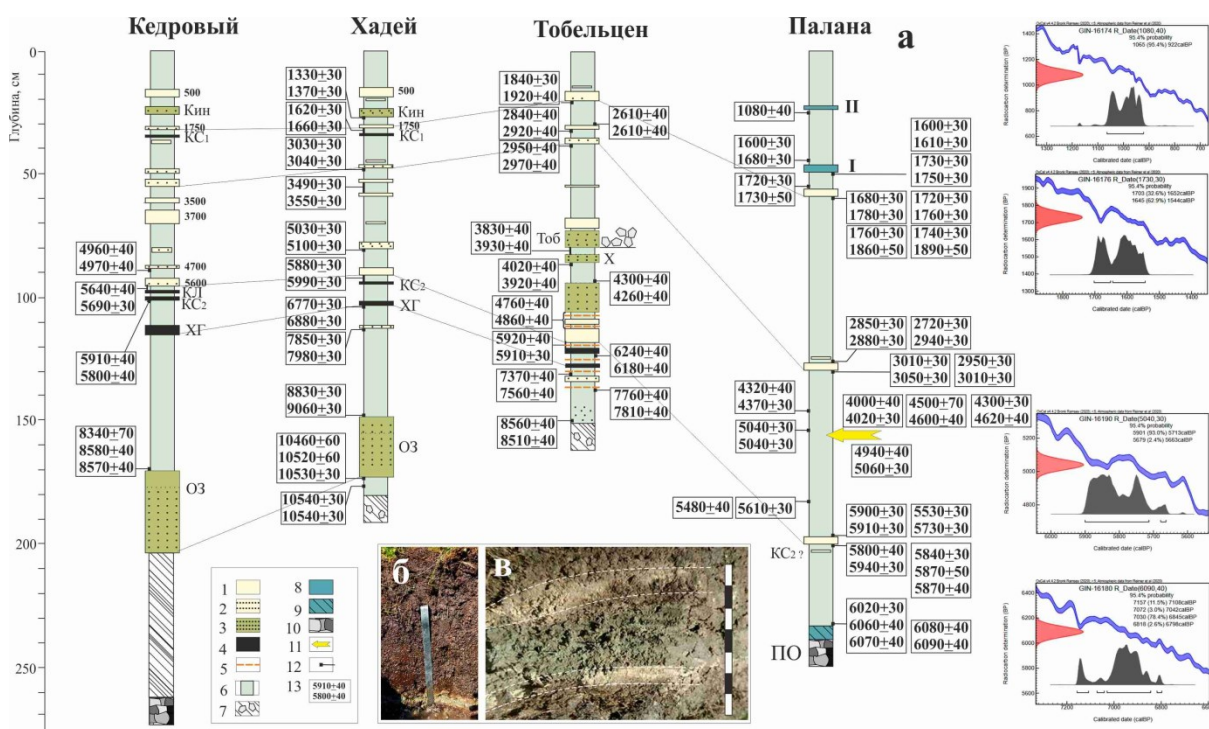


Рис. 2. Почвенно-пирокластические чехлы северной Камчатки (а): руч. Кедровый (верховья р. Еловка) и конус Тобельцен по [4], новые авторские данные: ручей Хадей, среднее течение р. Палана (сводный, справа графики калиброванного значения возраста, см. в тексте). 1-5 – тефры: 1-2 – вулкана Шивелуч: 1 – тонкий пепел, 2 – вулканический песок; 3 – шлаковых конусов (Тоб – Тобельцен, X – конус Икс, ОЗ – Озерновский поток, Кин – маар Киненин); 4 – удаленных вулканов (КС – Ксудач, КЛ – Ключевской, ХГ – Хангар,); 5 – стратовулкана Спокойного; 6 – торф; 7 – суглинки неясного происхождения с мелкой дресвой; 8-10 – отложения оползней: 8 – пыль обрушения, 9 – суглинок с примесью песка, 10 – дресвяники ПО с крупными обломками; 11 – эпизод спуска озера; 12-13 – места отбора проб (12) и радиоуглеродные даты (13). (б-в) – отложения пыли обрушения I (1.7-1.6 тыс. кал.л.н.): б – прослой в стенке торфяного шурфа, в – крупный фрагмент, цена деления масштабной линейки 1 см.

Тонкая фракция пыли обрушения отличается от вулканических пеплов по минеральному составу. В пеплах обнаружены: вулканическое стекло, полевоы шпат, амфибол. В отложениях пыли: полевоы шпат, амфибол (в т.ч. рибекит), гранат, кристобалит, а фракция глинистого алеврита дополнительно содержит кварц и смектит. Данные получены на рентгено-фазовом анализаторе TEFA III (ГИН РАН).

Темно-сизые глинистые алевриты (и в отложениях прослая пыли I, и в кровле дресвяников ПО) демонстрируют идентичные литологические характеристики. Это позволяет предполагать, что глинистый алеврит с дресвой, обнаруженный в основании торфяников, представляет собой отложения пыли ПО.

Результаты радиоуглеродного датирования

Полученные даты показаны на рис. 2а. В подошве торфов, залегающих на дресвяниках ПО, получены даты около 6100 ¹⁴C лет, что в календарном летоисчислении составляет 6.9-6.4 тыс. лет. Однако после схода оползня должно было пройти какое-то время, чтобы появилась новая растительность.

Как было показано в [2], при сходе катастрофического оползня в Долине Гейзеров 03.06.2007 г. образовалось несколько порций грубообломочных отложений («обвальные лавины»), а на заключительном этапе произошло оползание крупного аллохтона. Первичная поверхность этого блока оказалась практически не нарушенной, сохранились покрывавшие его кустарники.

На завершающей стадии схода ПО также происходило перемещение крупных блоков. И, как видно на рис. 1г, они не были разрушены, только наклонены. Это позволяет предполагать, что и на их поверхности сохранилась первичная растительность. Следовательно, процесс зарастания отложений обломочной лавины мог начаться довольно быстро, чему дополнительно способствовали небольшие гипсометрические высоты новообразованной поверхности (около 200 м). Скорее всего, потребовалось несколько десятков или первые сотни лет, чтобы в межхолмовых котловинах началось торфонакопление. Таким образом, возраст образования ПО можно предварительно оценить около 7.5-7 тыс. кал. лет. Для получения более точной даты необходимо датировать подстилающую, а еще лучше – вмещающую органику.

Еще одна интересная находка в районе исследований – отложения прорыва небольшого озерца, которое располагалось на одном из холмов обломочной лавины. На рис. 2а видно, что событие произошло около 5 тыс. ¹⁴C л.н. (5.9-5.7 тыс. кал.л.н.).

Молодые обрушения датированы по их пыли, захороненной в торфе: 1.7-1.6 и ~1 тыс. кал.л. Подобные отложения (dust) описаны в литературе, в последние годы их стали использовать для датирования обвалов и оползней [6].

Выводы

Возраст Паланского оползня оценивается не моложе 7.5-7 тыс. кал. лет. Установлены отложения пыли обрушения; кроме пыли ПО (темно-сизый глинистый алеврит) датировано и два молодых события: 1.7-1.6 и ~1 тыс. кал.л.н. Изменение базиса эрозии и спуск озерца зафиксированы 5.9-5.7 тыс. кал.л.н.

Работа выполнена в соответствии с темой FMMG-2022-0002 Госзадания ГИН РАН и при финансовой поддержке РФФИ № 20-05-00085.

Список литературы

1. Государственная геологическая карта СССР. М-б 1:200 000. Серия Западно-Камчатская. Листы О-57-Х, XI (Палана, Кинкиль). Объяснительная записка. М., 1988. 99 с.
2. Двигало В.Н., Мелекесцев И.В. Геолого-геоморфологические последствия катастрофических обвальных и обвально-оползневых процессов в Камчатской Долине Гейзеров (по данным аэрофотограмметрии) // Вулканология и сейсмология. 2009. № 5. С. 24-37.
3. Леонов В.Л., Егоров О.Н. Обвалы и оползни на территории Корякского автономного округа, связанная с ними опасность и факторы, ее определяющие // Вопросы географии Камчатки. 2005. № 11. С. 36-39.
4. Певзнер М.М. Северная граница вулканической активности Камчатки в голоцене // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2010. № 1. Вып. 15. С. 117-144.
5. Barr I.D., Spagnolo M. Testing the efficacy of the glacial bazzsaw: insights from the Sredinny Mountains, Kamchatka // Geomorphology. 2013. V. 193. P. 30-44. DOI: 10.1016/j.geomorph.2013.09.026
6. Panek T. Recent progress in landslide dating: A global overview // Progress in Physical Geography. 2015. V. 39. № 2. P. 168-198. DOI: 10.1177/0309133314550671

Содержание микроэлементов в компонентах среды термальных полей Мутновского геотермального месторождения в августе 2023 г.

Позолотина Л.А.^{1,2}, Климова А.В.², Сергеева А.В.¹

Concentrations of trace elements in components of the thermal fields of Mutnovsky geothermal field in August 2023

Pozolotina L.A.^{1,2}, Klimova A.V.², Sergeeva A.V.¹

¹ *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;*

e-mail: Pozolotina@mail.ru

² *ФГБОУ ВО Камчатский государственный технический университет, г. Петропавловск-Камчатский;*

e-mail: annaklimovae@mail.ru

Представлены данные о содержании микроэлементов (Zn, Cd, Sr, Ba, Cu, Ni, Co, Pb, Mn, Cr, Al) в грунтах и у представителей класса листостебельных мхов (Bryopsida) термальных полей Мутновского геотермального месторождения в августе 2023 г.

Введение

В пределах Мутновского геотермального района расположен вулкан Мутновский с самыми мощными на Камчатке фумарольными полями и многочисленными выходами термальных вод и пара. Вулканическая и гидротермальная деятельность здесь началась в миоцене и продолжается до настоящего времени [2]. Под влиянием гидротермальных процессов формируются специфические условия местообитания на химически измененных породах и существенно отличающиеся от окружающих территорий по микроклимату, температурному режиму почв, влажности и составу приземного слоя воздуха, pH, геохимии субстратов и орографии. Формируются характерные для термальных полей фитоценозы [1]. Цель – исследовать содержание микроэлементов в компонентах среды термальных полей и выявить потенциал их аккумуляции представителями класса Bryopsida.

Материалы и методы

В ходе полевых работ в августе 2023 г. были собраны пробы грунта и мхов на термальных полях Мутновского геотермального месторождения: Северо-Мутновское (западная группа), Дачные источники (группа Активная) и в районе скважины № 022. В районе мест сбора были проведены физико-химические измерения среды (t, pH) (табл. 1).

Содержание элементов Zn, Cd, Sr, Ba, Cu, Ni, Co, Pb, Mn, Cr, Al в пробах грунта и мха определяли с помощью атомно-эмиссионного спектрометра с микроволновой плазмой AES-MP 4200 (Agilent Technologies, США). Подготовку к микроэлементному анализу предварительно высушенных при 70 °С проб проводили методом мокрой минерализации в системе кислотного разложения проб Ethos UP (Milestone, Италия). Образцы (~0.4 г сухой массы) помещали в тефлоновые тигли с раствором HNO₃ и деионизированной воды (7:1 v/v – для грунта и 6:2 v/v – для мха) и термостатировали при 200 °С в течение 15 минут. Полученные растворы доводили деионизированной водой до объема 15 мл. Для контроля точности определений использовали стандартные образцы листа березы (ЛБ-1, ГСО8923-2007), элодеи канадской (ЭК-1, ГСО8921-2007) с аттестованными значениями содержания металлов. Вычисление концентраций элементов и предварительную обработку полученных данных проводили в программе MP Expert и MS Office Excel. Значения содержания элементов в пробах приведены в мг/кг сухой массы.

Таблица 1. Сбор материала для анализа и некоторые физико-химические характеристики воды и грунта термальных полей

№ п/п	Описание пробы	Дата сбора	Район сбора	Место сбора	pH воды	t _{грунта/воды} , °C
1	Глина серая, вода	5.08.2023 г.	Северо-Мутновское термальное поле (западная группа)	берег ручья; ручей, дренирующий термальное поле (в начале)	6.23	-/1.3
2	Глина белая, вода			берег ручья дренирующий термальное поле, в начале	6.23	-/1.3
3	Грунт, мох			центр термального поля	-	-
4	Вода			ручей, дренирующий термальное поле, нижняя часть	5.38	18.2
5	Глина, вода	8.08.2023 г.	Термальное поле возле скважины № 022	район гидротермального взрыва; сток из небольшого озера новообразованного термального поля	3.26	97.6/ -
6	грунт, мох			периферия термального поля	-	18.0/ -
7	грунт, мох	8.08.2023 г.	Дачные источники, группа Активная	выше места разгрузки	5.6	-
8	грунт, мох			место разгрузки, субстрат прикрепления мха на камнях в ручье, дренирующий термальное поле	-	35.8/ -
9	грунт, мох			ниже места разгрузки, субстрат прикрепления мха на камнях в ручье, дренирующий термальное поле	4.19	16.6/ -

Для количественной оценки степени концентрирования мхом элементов из грунта использовали фактор аккумуляции биота-осадок (biota-sediment accumulation factor, BSAF) [3]. Вычисление проводили по формуле (1):

$$BSAF = C_b / C_s, \quad (1)$$

где C_b – содержание элемента в пробах мха, мг/кг сух. массы; C_s – содержание элемента в грунте, мг/кг сух. массы. Организм относят к концентраторам при $BSAF > 1$ [3].

Результаты и обсуждение

Получены данные о содержании 11 элементов в грунтах и листовых мхах трех термальных полей Мутновского геотермального месторождения (табл. 2). Во всех проанализированных пробах содержание Co и Ni было ниже предела обнаружения. Концентрации остальных элементов варьировали в широких диапазонах. При этом в грунтах и мхах в районе скважины № 022 были определены минимальные значения содержания элементов в отличие от проб, собранных на Северо-Мутновском термальном поле и Дачных источниках. Во всех пробах исследуемых районов выявлено большее содержание алюминия по сравнению с другими элементами.

Согласно значениям фактора аккумуляции, мох на периферии термальной площадки в районе скважины № 022 является концентратором рассматриваемых элементов. Также, по данному показателю, мох, собранный изо всех мест, аккумулирует Pb. Мох Северо-Мутновского термального поля (западная группа) является деконцентратором элементов Zn, Cd, Cu и Cr, фактор аккумуляции для которых составил менее 1.0 (табл. 3).

Таблица 2. Некоторые статистические показатели содержания микроэлементов (мг/кг) в пробах грунта и образцах мха термальных полей Мутновского геотермального месторождения в августе 2023 г.

Проба/образец	Параметр	Zn	Cd	Sr	Ba	Cu	Ni	Co	Pb	Mn	Cr	Al
Северо-Мутновское термальное поле (западная группа)												
Грунт (n=3)	<u>Min-Max</u>	<u>9.49-40.5</u>	<u>0.42-0.91</u>	<u>3.53-38.7</u>	<u>1.48-64.5</u>	<u>9.83-99.7</u>	<0.004	<0.003	<u>0-2.76</u>	<u>42.8-562.2</u>	<u>4.43-29.4</u>	<u>16667-79757</u>
	Mediana	20.7	0.76	22.0	54.7	66.7			1.85	160.3	4.81	71010
Мох	–	24.6	1.83	19.7	31.2	71.8	<0.004	<0.003	3.62	114.94	16.21	23317
Термальное поле (скважина № 022)												
Грунт (n=2)	<u>Min-Max</u>	<u>2.77-5.51</u>	<u>0.01-0.86</u>	<u>5.96-21.9</u>	<u>4.90-37.34</u>	<u>11.5-41.7</u>	<0.004	<0.003	<u>0-1.84</u>	<u>17.9-24.6</u>	<u>1.68-1.84</u>	<u>1777-2316</u>
	Mediana	4.14	0.43	13.9	21.12	26.60			0.92	21.23	1.76	2047
Мох	–	13.8	2.39	16.8	30.5	30.3	<0.004	<0.003	2.85	74.2	2.55	4084
Дачные источники (группа Активная)												
Грунт (n=3)	<u>Min-Max</u>	<u>36.4-61.3</u>	<0.01	<u>59.4-78.6</u>	<u>114.1-218.1</u>	<u>56.5-111.0</u>	<0.004	<0.003	<u>4.74-8.29</u>	<u>299.2-373.7</u>	<u>13.11-23.9</u>	<u>30366-40745</u>
	Mediana	53.9		68.7	188.8	92.3			6.61	302.4	15.23	35544
Мох (n=3)	<u>Min-Max</u>	<u>26.6-34.2</u>	<u>0.87-1.84</u>	<u>26.4-43.2</u>	<u>46.3-139.0</u>	<u>26.6-44.0</u>	<0.004	<0.003	<u>5.39-7.64</u>	<u>163.2-245.9</u>	<u>6.51-9.65</u>	<u>18677-37102</u>
	Mediana	29.1	1.46	36.0	136.8	30.6			7.35	194.6	7.73	19566

Примечание: n – количество проб/образцов в выборке.

Таблица 3. Фактор аккумуляции биота-осадок (BSAF)

№ п/п	Район сбора проб грунта и образцов мха	Zn	Cd	Sr	Ba	Cu	Pb	Mn	Cr	Al
1	Северо-Мутновское термальное поле (западная группа)	1.2	2.4	0.9	0.6	1.1	2.0	0.7	3.4	0.3
2	Термальное поле (скважина № 022)	3.3	5.6	1.2	1.4	1.1	3.1	3.5	1.4	2.0
3	Дачные источники (группа Активная)	0.5	–	0.5	0.7	0.3	1.1	0.6	0.5	0.6

Заключение

Ряды убывания содержания элементов в грунтах и мхах термальных полей Мутновского геотермального месторождения имели схожую последовательность в отношении пяти элементов – Al, Mn, Cr, Pb и Cd. Мох: Al (19566 мг/кг) > Mn (114.94 мг/кг) > Ba (31.2 мг/кг) > Cu (30.62 мг/кг) > Zn (24.6 мг/кг) > Sr (19.7 мг/кг) > Cr (7.73 мг/кг) > Pb (3.62 мг/кг) > Cd (1.83 мг/кг); Грунт: Al (35544 мг/кг) > Mn (160.3 мг/кг) > Cu (66.7 мг/кг) > Ba (54.65 мг/кг) > Sr (22.0 мг/кг) > Zn (20.7 мг/кг) > Cr (4.81 мг/кг) > Pb (1.85 мг/кг) > Cd (0.43 мг/кг).

В компонентах среды (грунт, мох) термального поля в районе скважины № 022 обнаружено минимальное содержание исследуемых элементов в отличие от мхов других исследуемых районов. Однако фактор аккумуляции (BSAF) для мхов данного поля был больше 1.0, что соответствует высокой концентрационной способности.

Список литературы

1. Самкова Т.Ю. Влияние гидротермальных процессов на растительность (на примере Паужетской гидротермальной системы Камчатки). Автореф. дис. на соиск. уч. ст. канд. биол. наук. Петропавловск-Камчатский, 2009. 25 с.
2. Чудаев О.В. Состав и условия образования современных гидротермальных систем Дальнего Востока России. Владивосток: Дальнаука, 2003. 216 с.
3. Ghosn M., Mahfouz C., Chekri R. et al. Assessment of trace element contamination and bioaccumulation in algae (*Ulva lactuca*), bivalves (*Spondylus spinosus*) and shrimps (*Marsupenaeus japonicus*) from the Lebanese coast // Regional Studies in Marine Science. 2020. V. 39. Art. 101478. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101478>

Динамика вымывания биогенных элементов и некоторых вулканогенных макрокомпонентов из пепла вулкана Шивелуч (извержение 11 апреля 2023 года)

Походина М.А., Лепская Е.В.

Dynamics of leaching of biogenic elements and some volcanogenic macrocomponents from the ash of Shiveluch volcano (eruption of April 11, 2023)

Pokhodina M.A., Lepskaya E.V.

Камчатский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («КамчатНИРО»), г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: pohodina.ma@gmail.com

Проведено исследование динамики вымывания биогенных элементов, а также сульфатов и хлоридов из пепла вулкана Шивелуч. Было поставлено два эксперимента, имитирующих процессы вымывания из пепла химических элементов в речной системе. В первом случае была смоделирована ситуация попадания пепла в турбулентное течение, во втором – постепенное смывание его с поверхности атмосферными осадками. Также был определен состав тяжелых металлов в пепле и рН водных вытяжек.

Введение

Вулкан Шивелуч – один из крупнейших и наиболее активных вулканов Камчатки [9]. 11 апреля 2023 г. произошло его извержение, а пеплопад стал сильнейшим за десятки лет в расположенном вблизи поселке Ключи. Пепел от данного извержения выпал на снежный покров, поэтому процесс вымывания химических элементов из пепла происходил постепенно, их влияние было пролонгированным и не столь критическим, как если бы извержение происходило в летние месяцы, и пепел попадал непосредственно в водотоки, водоемы и почву. Последнее наблюдали при извержении вулкана Сент-Хеленс (США) в 1980 г. Негативное влияние пепла от этого извержения проявилось в разрушении нерестилищ, повышении температуры воды, уменьшении кормовой базы рыб и прямом воздействии на здоровье рыб. Вулканический пепел, содержащий частицы силикатного стекла, имел острую угловатую поверхность, которая оказывала абразивное воздействие на эпителиальную ткань рыб, особенно на жабры, и вызывала стресс с летальным исходом. Поэтому в реках и ручьях, попавших в зону пеплопада, значительно сократилась численность и биомасса тихоокеанских лососей и форели [12].

Действующие вулканы Камчатки являются постоянным источником поступления веществ в окружающую среду [6]. Поэтому так важно понять, как происходит процесс вымывания из пепла химических веществ в разных условиях. Известно, что обильный пеплопад, содержащий большое количество растворимых солей, попадающих в воду и смываемых с водосбора, изменяет химический состав воды рек. При этом реакция воды становится более кислой. По ионному составу воды камчатских рек при смывании пепла приобретают слабо выраженный сульфатный характер [1, 10]. Вулканические извержения сопровождаются вспышкой урожайности растительности в течение одного вегетационного периода, так как пепел содержит большое количество подвижных фосфатов. Затем питательные вещества быстро вымываются или переходят в неусвояемые формы [7, 11]. Это подтверждают и ранее проведенные исследования динамики вымывания биогенных элементов из пепла и лапиллей в период таяния снега при Трещинном Толбачинском извержении 2013-2014 гг. [5]. Тогда при анализе разноразмерных частиц было установлено, что происходит первоначальное залповое вымывание биогенных элементов с последующей стабилизацией процесса на фоновом уровне, свойственном для камчатских водоемов. Это вымывание носит нелинейный характер и оказывает наибольшее влияние на экосистемы в первый год после извержения.

Материалы и методы

Пепел вулкана Шивелуч, отобранный недалеко от поселка Ключи после масштабного извержения 11 апреля 2023 г., массой более 1 кг во влажном состоянии доставили в лабораторию 13 апреля и хранили в холодильнике при +6 °С.

В эксперименте, который имитировал вымывание биогенных элементов (БЭ) в речной системе при активном воздействии на него воды, взяли навеску пепла массой 58 г, которую залили дистиллированной водой объемом 500 мл, перемешивали на магнитной мешалке в течение 1 ч и отстаивали сутки в прохладном помещении при 16 °С, затем отфильтровали через фильтр «синяя лента» с размером пор 2-3 мкм. В полученном фильтрате определили общий азот ($N_{\text{общ}}$), общий фосфор ($P_{\text{общ}}$), минеральные формы азота (азот аммонийный – NH_4^+ , нитритный – NO_2^- и нитратный – NO_3^-), фосфор фосфатов (PO_4^{3-}), железо (Fe), кремний (Si), стандартными методами [2]. Навеску пепла последовательно промывали дистиллированной водой, получив четыре вытяжки (14.04, 19.04, 25.04, соответствует номерам 1, 2, 3 на рис. 1). В первом экстракте также определили содержание тяжелых металлов (Zn, Cd, Pb, Cu) методом инверсионной вольтамперометрии [8]. С 18 по 25 мая отобрали новую навеску 57 г, в этот раз измеряли только рН фильтрата и сульфаты (SO_4^{2-}) [2].

Вторая часть опыта имитировала вымывание пепла атмосферными осадками. Через навеску пепла массой 30 г, находящейся на фильтре, пропускали дистиллированную воду, измеряя полученный объем фильтрата. Фильтрацию провели трижды (09.08, 10.08, 14.08). Каждый раз измеряли содержание БЭ, рН, сульфаты (SO_4^{2-}) и хлориды (Cl⁻). Соотношение пепла и воды в первой части опыта составляло 1 к 9 и 1 к 15 во второй части, что относится к рекомендованным соотношениям [6].

Результаты

Эксперимент № 1. На первом этапе эксперимента (экстракт 1) произошло максимально полное вымывание фосфора (рис. 1а) и азота (рис. 1б) – 62 % и 75 % соответственно, представленных, в основном, минеральными формами. На долю аммония пришлось 98 % минерального азота. Аналогично произошло и вымывание железа – 85 %. Кремний вымывался постепенно 25 % и 22 % на первом и втором этапах эксперимента соответственно (рис. 1г).

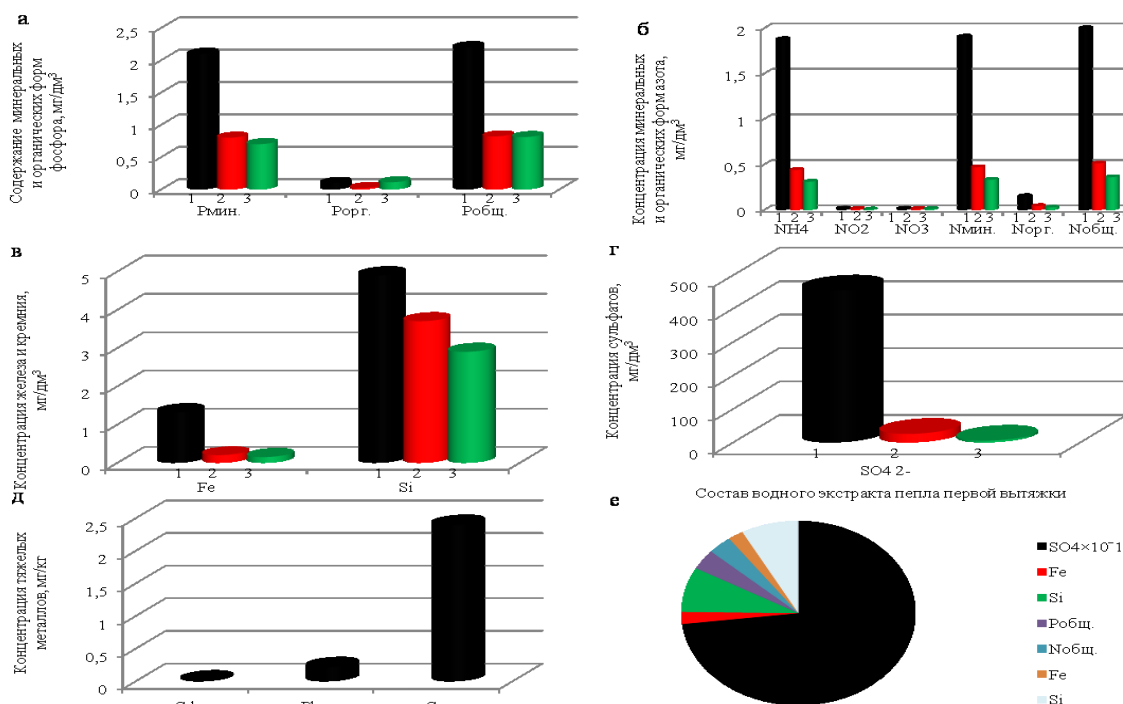


Рис. 1. Содержание биогенных элементов и тяжелых металлов в водных экстрактах пепла вулкана Шивелуч при активном перемешивании вытяжки пепла (1, 2, 3 – номер экстракта, соответствует датам): а – содержание минеральных и органических форм фосфора; б – содержание минеральных и органических форм азота; в – содержание железа и кремния; г – содержание сульфатов; д – содержание тяжелых металлов; е – общее содержание БЭ и SO_4^{2-} в первой вытяжке.

Начиная со второго этапа, вымывание всех биогенных элементов, стабилизируется и происходит более равномерно. Сульфаты (рис. 1г) почти полностью вымывались на первом этапе в количестве 95 %, на втором – оставшиеся 5 %, на третьем их содержание было ниже предела обнаружения методикой. Известно, что из всех типов магм для андезита (к которым относятся продукты вулкана Шивелуч) наблюдается наибольшее относительное содержание SO_4^{2-} (до 100 %) [3]. Невозможно не заметить, что большую часть вытяжки составляют SO_4^{2-} – 96 %, что отмечают и другие авторы [5] и связывают это с присутствием в пеплах вторичных минералов (гипс), вынесенных при извержении (рис. 1е). Анализ пепла на содержание тяжелых металлов (рис. 1д) проводили по 4 элементам, причем цинк обнаружен не был, меньше всего содержалось кадмия 0.015 мг/кг, на порядок больше свинца и больше всего меди – 2.4 мг/кг. Известно, что на активном вулкане Шивелуч под воздействием паров и кислых конденсатов преобладает вынос из андезитов халькофильных элементов и возрастает содержание Cu [7]. Значение pH в начальной водной вытяжке составило 4.39.

Эксперимент № 2. Вымывание БЭ в условиях, имитирующих атмосферные осадки, происходило постепенно. Содержание фосфора на втором и третьем этапах эксперимента составило 45 % и 77 %, и было представлено, как и в первом эксперименте, в основном, аммонием (рис. 2а, б). Подобным образом происходило и вымывание железа – 75 % на первом этапе, только кремний вымывался постепенно: 58 % и 69 % на первом и втором этапах, соответственно (рис. 2в). Вымывание SO_4^{2-} происходило точно так же, как и в первом эксперименте, когда пепел активно перемешивали в водной среде. Вымывание Cl⁻ произошло на 90 % на первом этапе, на втором вымылось еще 2 %. Суммарное содержание этих ионов составило 99.1 %, соотношение $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ – 4:1 (рис. 2г). Ионы Cl⁻ и SO_4^{2-} являются вулканогенными макрокомпонентами, и их повышенные концентрации в химическом составе поверхностных вод после извержений нормальны, однако исследователи отмечают их быстрое вымывание [6]. На начальном этапе второго эксперимента было зафиксировано самое низкое значение pH – 4.78. По мере вымывания из экстрактов сульфатов и хлоридов, pH увеличилось до субнейтральных значений (5.97 на втором и 6.12 на третьем этапах).

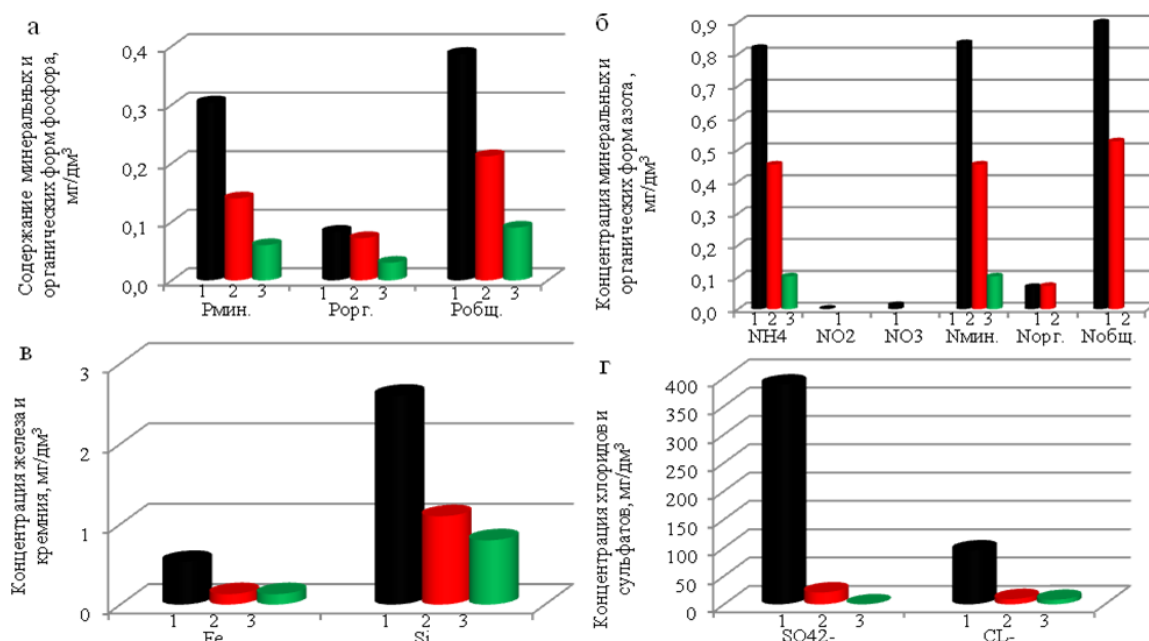


Рис. 2. Содержание БЭ в водных экстрактах пепла вулкана Шивелуч при имитации вымывания его атмосферными осадками: а – содержание минеральных и органических форм фосфора; б – содержание минеральных и органических форм азота; в – содержание Fe и Si; г – содержание Cl⁻ и SO_4^{2-} .

Заключение

Таким образом, экспериментально установлено, что вымывание биогенных элементов и некоторых вулканогенных макрокомпонентов из пепла вулкана Шивелуч происходит довольно быстро. Причем, чем активнее перемешивается пепел с водой, тем более залповым происходит выход химических элементов. После третьего этапа вымывания в обоих экспериментах вытяжка из пепла превращалась в опалесцирующую взвесь, которая проходила через фильтр и не осаждалась центрифугированием при 8500 об./мин на протяжении 15 мин. Отметим, что существует определенная закономерность воздействия вулканического пепла на водоемы. Свежие, ювенильные пеплы вызывают ингибирование биологических процессов в водоемах, а при вымывании из них ионов SO_4^{2-} и Cl^- можно наблюдать природный фертилизационный эффект [4].

Список литературы

1. Агафонова К.Г. Гидрохимический режим рек Камчатки // Вопросы географии Камчатки Вып. 2. Петропавловск-Камчатский: Дальневосточное книжное издательство, 1964. С. 49.
2. Алевкин О.А., Семенов А.Д., Скопинцев Б.А. Руководство по химическому анализу вод суши. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 269 с.
3. Ершов В.В. Химический состав водных вытяжек из пеплов вулканов Курильских островов // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами. Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2020. С. 343-346.
4. Лепская Е.В. Влияние пепла вулкана Алаид на фитопланктон озера Курильского (Южная Камчатка) // Исследование биологии и динамики численности промысловых рыб камчатского шельфа. Петропавловск-Камчатский: Камчатское отделение тихоокеанского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии. Вып. II. 1993. С. 21-24.
5. Лепская Е.В., Маслов А.В., Тепнин О.Б., Свириденко В.Д. Биогенные элементы (содержание, динамика вымывания) из разноразмерного пирокластического материала Плоского Толбачика (извержение 2012-2013 гг.) // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвященной Дню вулканолога, 29-30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 227-235.
6. Малик Н.А. Пеплы извержений вулканов Камчатки (2003-2013 гг.): состав, масса и водорастворимый комплекс. Дис. на соиск. уч. ст. канд. геол.-мин. наук. Петропавловск-Камчатский, 2019. 160 с.
7. Мархинин Е.К. Вулканизм. М.: Недра, 1985. 288 с.
8. МУ 31-11/05 Количественный химический анализ проб почв, тепличных грунтов, сапропелей, илов, донных отложений, твердых отходов. Методика выполнения измерений массовых концентрация цинка, кадмия, свинца, меди, марганца, мышьяка, ртути методом инверсионной вольтамперометрии на анализаторах типа ТА / ООО «НПП» Томьаналит». Томск, 2006. 49 с.
9. Певзнер М.М., Бабанский А.Д. Возраст вулкана Молодой Шивелуч и эволюция состава его пород // Магматизм и метаморфизм в истории Земли. XI Всероссийское петрографическое совещание, 24-28 августа 2010 г. Екатеринбург: Институт геологии и геохимии УрО РАН, 2010. С. 115-116.
10. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20. Л.: Гидрометеиздат, 1966. 368 с.
11. Dahm C.N., Baross J.A., Lilley M.D. et al. Lakers in the blast zone of Mt. St. Helens: chemical and microbial responses following the may 18, 1980 eruption // Selected Papers from Mt. St. Helens Effects on Water Resources proceedings from the conference. 1982. P. 98-137.
12. Phinney D.E. General overview of immediate and longer-term effects of Mount St. Helens on the salmon resources // Selected Papers from Mt. St. Helens Effects on Water Resources proceedings from the conference, 1982. P. 293-299.

Сезонная изменчивость биогенных элементов (P, N, Si, C) в реках Камчатка и Авача (п-ов Камчатка) в 2023 г.

Семкин П.Ю.¹, Павлова Г.Ю.¹, Лобанов В.Б.¹, Горин С.Л.², Лепская Е.В.³, Уланова О.А.¹, Шкирникова Е.М.¹, Швецова М.Г.¹, Zhang J.⁴, Тищенко П.Я.¹

Seasonal variability of nutrients (P, N, Si, C) in the Kamchatka and Avacha rivers (Kamchatka Peninsula) in 2023

Semkin P.Yu., Pavlova G.Yu., Lobanov V.B., Gorin S.L., Lepskaya E.V., Ulanova O.A., Shkirnikova E.M., Shvetsova M.G., Zhang J., Tishchenko P.Ya.

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток;

e-mail: pahno@list.ru

² Всероссийский научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии, г. Москва

³ Камчатский филиал «Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии», г. Петропавловск-Камчатский

⁴ State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai, China

В реке Камчатка установлены сезонные экстремумы концентраций и потоков минерального и органического фосфора, а также органического углерода в период таяния снега в долине реки и на высокогорье в районе с непосредственным влиянием вулканизма – вблизи вулканов Ключевской группы и вулкана Шивелуч.

Введение

Увеличение речных поступлений минерального азота (DIN) и фосфора (DIP) для шельфовых экосистем, наблюдаемых на протяжении последнего столетия во всем мире, связывается, как правило, с сельским хозяйством и сточными водами [7]. На этом фоне эвтрофикация, связанная с природными процессами, такими как вулканизм, в литературе обсуждается гораздо меньше. Однако известно, что вулканический пепел (тефра) является важным источником биогенных элементов (БЭ) и железа (Fe) для рек [4] и, соответственно, для прибрежно-морских экосистем. Особенностью 2023 г. было сильнейшее за несколько последних десятилетий извержение вулкана Шивелуч, случившееся 11 апреля (официальное сообщение директора ИВиС ДВО РАН А.Ю. Озерова и множественные сообщения СМИ).

Биогенный фон прибрежных акваторий Восточной Камчатки формируется стоком БЭ, выносимых крупными реками полуострова, бассейны которых подвержены регулярному воздействию активного вулканизма. Залповое внесение БЭ может влиять на продуктивность прибрежных акваторий, вызывая «цветение» фитопланктона, в том числе, видов, образующих «красные приливы» [3, 8]. Тем самым вулканизм на Камчатке формирует особые условия окружающей среды, не имеющие аналогов в мире, а понимание контролирующих факторов речных потоков БЭ вдоль побережья имеет решающее значение для эффективного хозяйственного управления в прибрежно-морском регионе.

Цель данной работы – изучение сезонной изменчивости концентрации соединений БЭ в 2023 г. в двух наиболее значимых реках Восточной Камчатки, дренирующих вулканические территории.

Объекты исследований и данные

Река Камчатка – крупнейшая река полуострова Камчатка, протекающая почти на всем протяжении Центральной Камчатской депрессии (рис. 1), имеет площадь водосбора 55900 км² при длине 758 км. Река Авача – сравнительно крупная река на юго-восточном побережье Камчатки. Длина реки 122 км, площадь водосборного бассейна 5090 км². Обе реки имеют преимущественно подземное питание при

значительном участии талого стока. Величина подземного стока для среднего по водности года для реки Камчатка составляет 60-64 %, для реки Авача – 50 % [6]. Бассейны рек расположены в зоне пеплопадов, где тефра покрывает ледники в высокогорных районах и распространяется на расстояние сотен километров от действующих вулканов. К активным вулканам Восточно-Камчатского региона относятся Шивелуч, Ключевской, Безымянный, Плоский Толбачик, Карымский, Авачинский, Корякский, Горелый и Мутновский [1]. В нижней части водосбора р. Камчатка расположены наиболее активные вулканы Ключевской группы (рис. 1), среди которых вулкан Ключевской – самый высокий активный вулкан в Евразии с высотой от 4750 до 4850 м над уровнем моря и вулкан Шивелуч с высотой 3283 м. В состав левобережного водосборного бассейна р. Авача входят вулканы Авачинской группы (рис. 1), два из которых – Авачинский и Корякский – являются действующими. Высота Авачинского и Корякского вулканов составляет 2741 и 3456 м, соответственно. Из-за активного вулканизма в водосборах изучаемых рек преобладает вулканический тип почв [2], поскольку количество тефры, образующейся при одном извержении, например, Авачинского вулкана, может достигать нескольких тысяч тонн на 1 км² [5].

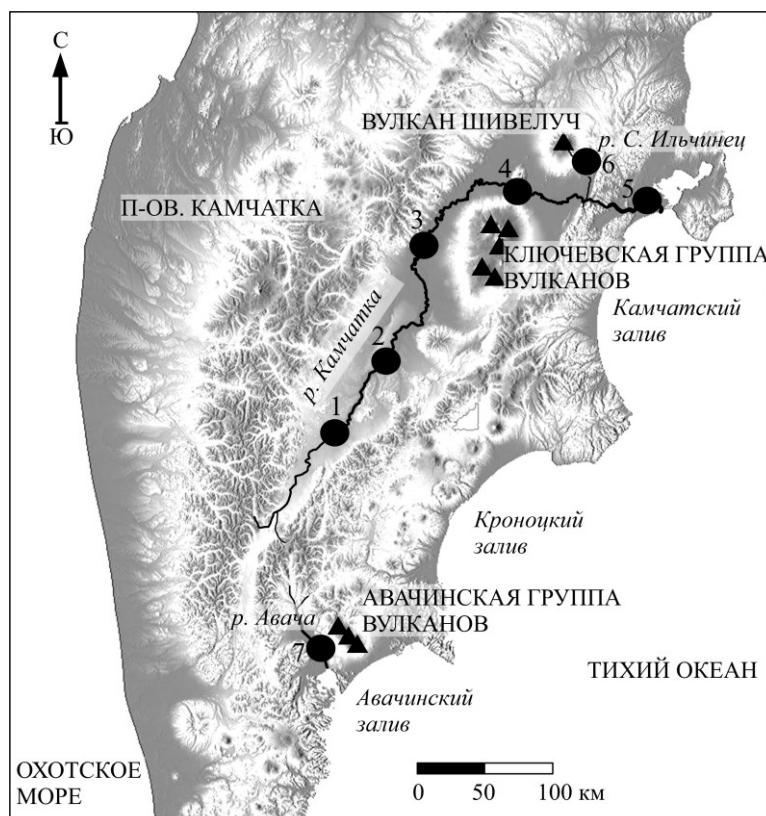


Рис. 1. Изучаемый район: ● – станции отбора проб воды, ▲ – действующие вулканы в бассейнах изучаемых рек.

Четыре экспедиции были проведены в основные фазы водного режима рек в 2023 г. для отбора проб воды на 5 станциях в р. Камчатка, на одной станции в р. Сухой Ильчинец и в р. Авача (рис. 1). Пробы воды на всех семи станциях отбирались за одни сутки: 1 апреля, 22 мая, 17 июня и 6 сентября. На следующий день после отбора пробы доставлялись в лабораторию гидрохимии ТОИ ДВО РАН, где сразу проводились измерения. В день доставки анализировались БЭ в минеральной форме: DIP, DIN (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+), силикаты (DSi). Пробы для определения суммы минеральной и органической форм азота и фосфора ($\text{N}_{\text{общ}} = \text{DIN} + \text{N}_{\text{орг}}$; $\text{P}_{\text{общ}} = \text{DIP} + \text{P}_{\text{орг}}$) замораживались в день доставки и в последующем анализировались в течение месяца.

Пробы для определения растворенного органического углерода (РОУ) анализировались также в день доставки.

Результаты

Выявлены особенности сезонного распределения биогенных веществ в изучаемых реках (рис. 2). Во-первых, аномально высокие для речных вод концентрации DIP (рис. 2а) во все сезоны наблюдались в р. Сухой Ильчинец – от 6.5 мкмоль/л в апреле до 11.3 мкмоль/л в июне. Также зафиксировано повышенное содержание $P_{орг}$ в мае и июне – 7.9 и 6.6 мкмоль/л, соответственно. На этом фоне концентрация DIP в р. Авача и в районе верхнего течения р. Камчатка была незначительной: соответственно, 0.94-1.38 и 0.47-1.94 мкмоль/л. Возрастание DIP до 2.08-3.87 мкмоль/л во все сезоны наблюдалось в районе с непосредственным влиянием вулканов Ключевской группы и вулкана Шивелуч (рис. 2). Максимальная концентрация DIP наблюдалась на ст. 5 в мае в период после пеплопада и интенсивного снеготаяния в долине р. Камчатка. Максимальные концентрации $P_{орг}$ (4.58 мкмоль/л) в р. Камчатка также наблюдались в районе непосредственного влияния вулканизма на ст. 3-5 в мае (рис. 2б). Во-вторых, в р. Авача концентрация DIN (рис. 2в) была выше во все сезоны по отношению к р. Камчатка, а экстремумы наблюдались в мае и июне (рис. 2). Однако в р. Сухой Ильчинец концентрация DIN не превышала 15 мкмоль/л.

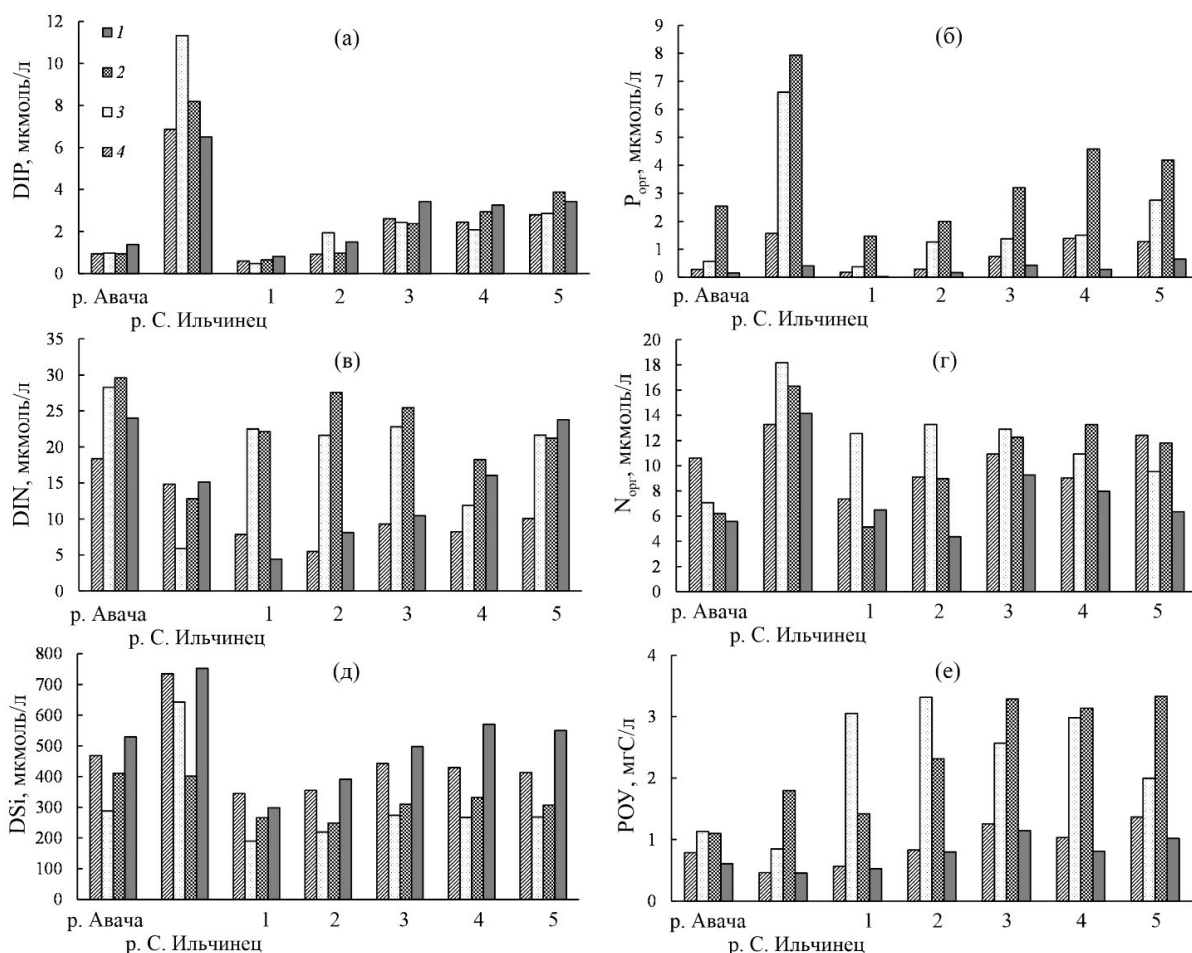


Рис. 2. Сезонная изменчивость концентрации биогенных веществ в реках Авача, Сухой Ильчинец и на пяти станциях в реке Камчатка. 1 – 1 апреля, 2 – 22 мая, 3 – 17 июня, 4 – 6 сентября 2023 г.

В-третьих, аномально высокие концентрации DSi наблюдались в р. Сухой Ильчинец в апреле, сентябре и июне: 752, 735 и 642 мкмоль/л, соответственно (рис. 2д). Повышенные концентрации DSi в апреле фиксировались почти на всех станциях в

р. Камчатка, а максимальные (570 мкмоль/л) – в районе непосредственного влияния вулканов Ключевской группы и вулкана Шивелуча. В р. Авача концентрация DSi в апреле тоже была высокой – 528 мкмоль/л. В-четвертых, воды р. Камчатка имеют низкие азот-фосфорные отношения ($N/P = 3.6-7.5$). В-пятых, для всех изученных рек характерны максимальные концентрации РОУ в периоды возрастающих расходов воды – в мае и июне (рис. 2е). При этом в р. Камчатка максимальная концентрация РОУ составляла 3.3 мгС/л, а в р. Авача не превышала 1.1 мгС/л.

Таким образом, выявлена пространственно-временная изменчивость гидрохимических характеристик речных вод, в том числе, в связи с вулканизмом и вариациями расхода воды. Воды р. Камчатка характеризуются преимущественно повышенными концентрациями исследованных характеристик, за исключением DIN, в районе влияния свежих пеплов.

Работа выполнена в ТОИ ДВО РАН – Гос. тема № 122110100002-8 (экспедиционные работы) и при поддержке РФФ, грант № 23-77-10001, <https://rscf.ru/project/23-77-10001/> (анализ проб воды).

Список литературы

1. Влодавец В.И., Пийп Б.И. Каталог действующих вулканов Камчатки // Бюллетень вулканологических станций. 1957. № 25. С. 5-95.
2. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С. Геохимические особенности вулканических почв Камчатки // Почвоведение. 2010. № 4. С. 412-421.
3. Лепская Е.В.; Тепнин О.Б., Коломейцев В.В. и др. Исторический обзор исследований и основные результаты комплексного экологического мониторинга Авачинской губы в 2013 году // Исследования водных биологических ресурсов Камчатки и северо-западной части Тихого океана. 2014. № 34. С. 5-21.
4. Малик Н.А. Импактный вклад извержений вулканов в формирование химического состава сезонного снежного покрова (Камчатка) // Лед и снег. 2010. № 4. С. 45-52.
5. Пийп Б.И. Извержение Авачинской сопки в 1945 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1953. № 17. С. 6-23.
6. Ресурсы поверхностных вод СССР. 1973. Том 20. Камчатка. Л.: Гидрометеиздат. 368 с.
7. Beusen A.H., Bouwman A.F., Van Beek L.P. et al. Global riverine N and P transport to ocean increased during the 20th century despite increased retention along the aquatic continuum // Biogeosciences. 2016. V. 13. № 8. P. 2441-2451.
8. Orlova T.Y., Aleksanin A.I., Lepskaya E.V. et al. A massive bloom of *Karenia* species (Dinophyceae) off the Kamchatka coast, Russia, in the fall of 2020 // Harmful Algae. 2022. V. 120. Art. 102337.

Биогенные элементы (N, P, Si) и хлорофилл «а» Авачинского залива (Восточная Камчатка) и прилегающей акватории Тихого океана летом 2022 г.

Уланова О.А., Барабанищikov Ю.А., Семкин П.Ю., Тищенко П.П., Швецова М.Г., Федоров М.С., Лобанов В.Б.

Nutrients (N, P, Si) and chlorophyll «a» of the Avacha Bay (Eastern Kamchatka) and the adjacent Pacific Ocean in the summer of 2022

Ulanova O.A., Barabanshchikov Yu.A., Semkin P.Yu., Tishchenko P.P., Shvetsova M.G., Fedorov M.S., Lobanov V.B.

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, г. Владивосток;

e-mail: shitkova@poi.dvo.ru

Изучены биогенные элементы (N, P, Si) и хлорофилл «а» Авачинского залива. Установлено, что «цветение» фитопланктона обусловлено интенсивным поступлением биогенных элементов со стоком р. Налычева в период весенне-летнего половодья. Изменчивость N/P соотношений в Авачинском заливе в связи с вулканизмом рассматривается в качестве возможной причины вредоносного «цветения».

Введение

Потоки биогенных элементов (N, P, Si) с речным стоком определяют интенсивность первичной продукции фитопланктона в прибрежно-морских бассейнах, а различия в N/P соотношениях способны оказывать влияние на доминирование тех или иных видов микроводорослей. В случае существенного увеличения N/P соотношений, доминирующие виды сменяются с диатомовых на динофлагелляты, в том числе потенциально токсичные [6].

Известно, что вулканический пепел является источником P, Si, в то время как N поступает в атмосферу за счет вулканических эксгаляций [3]. Соответственно, реки, дренирующие вулканические водосборы, будут оказывать важное влияние на содержание хлорофилла «а» и видовой состав фитопланктона в прибрежных бассейнах.

В связи с этим цель данной работы – установление взаимосвязи между особенностями поступления и распределения соединений N, P, Si и пространственной изменчивостью содержания хлорофилла «а» в Авачинском заливе.

Материалы и методы

В Авачинский залив впадает множество рек, среди которых наиболее важная – река Налычева с площадью водосборного бассейна 1460 км². Река Налычева имеет преимущественно снеговое питание. Ключевой фазой водного режима реки является половодье в мае-июле, на которое приходится 70 % годового стока [5]. На водосборе реки находятся вулканы Авачинской группы, среди которых Авачинский и Корякский – действующие. Высота вулканов Авачинский и Корякский составляет 2741 и 3456 м, соответственно. На вершинах вулканов имеются ледники. Изучаемые районы располагаются в зоне возможных пеплопадов, где пепел распространяется от действующих вулканов на сотни километров. В результате одного извержения количество пепла может достигать нескольких тысяч тонн на 1 км² [4]. Поэтому вулканический тип почв доминирует на водосборах рек, а также вдоль береговой линии Авачинского залива [1].

Исследовательские работы проведены с 26 июня по 5 июля 2022 г., т.е. в период после прохождения пика весенне-летнего половодья. В ходе экспедиции были отобраны пробы воды в Авачинском заливе и прилегающей акватории Тихого океана с борта судна НИС «Профессор Гагаринский» и параллельно в эстуарии реки Налычева с моторной лодки. В работе представлены следующие данные: температура, соленость, концентрации хлорофилла «а», N, P, Si в минеральной форме (нитраты, фосфаты и кремний) и концентрация O₂.

Результаты

В результате проведенного исследования в Авачинском заливе и прилегающей акватории Тихого океана обнаружены высокие концентрации хлорофилла «а» (рис. 1а). Наиболее высокие концентрации хлорофилла «а» (44 мг/л) (рис. 1б) и O_2 (11 мл/л) наблюдались на глубине 25 м в районе плюма реки Налычева на расстоянии около 2 км от устьевового створа реки. В целом, повышенное содержание хлорофилла «а» под влиянием реки Налычева проявилось на всем изучаемом полигоне в поверхностном слое воды (рис. 1а).

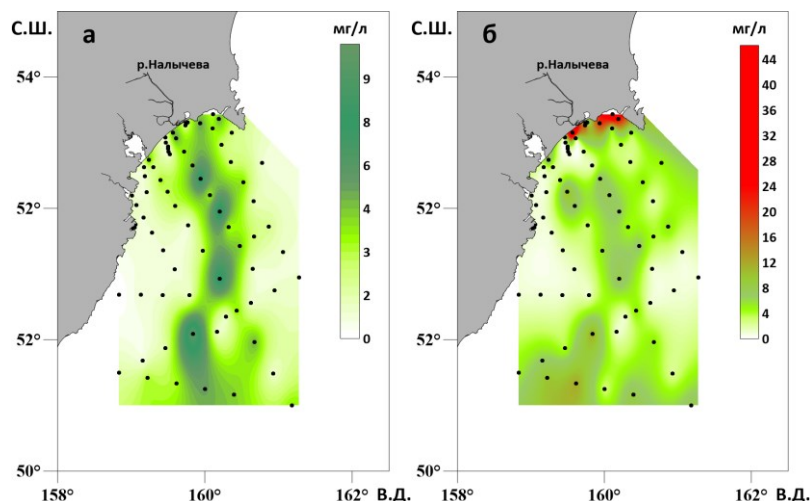


Рис. 1. Концентрация хлорофилла «а» в поверхностном слое воды (а) и на горизонте 25 м (б) Авачинского залива и прилегающей акватории Тихого океана 26 июня – 5 июля 2022 г.

Прибрежная часть Авачинского залива была наиболее опреснена и прогрета по сравнению с более морской частью. Повышенные концентрации нитратов наблюдались в поверхностном горизонте вод Авачинского залива, а максимум – в районе плюма реки Налычева (рис. 2). На горизонте 25 м содержание нитратов достигало значений 22 мкмоль/л. Концентрации фосфатов были понижены и не превышали 2.4 мкмоль/л (рис. 2). Также полученные результаты указывают, что основным источником DSi для поверхностного слоя Авачинского залива является сток реки Налычева.

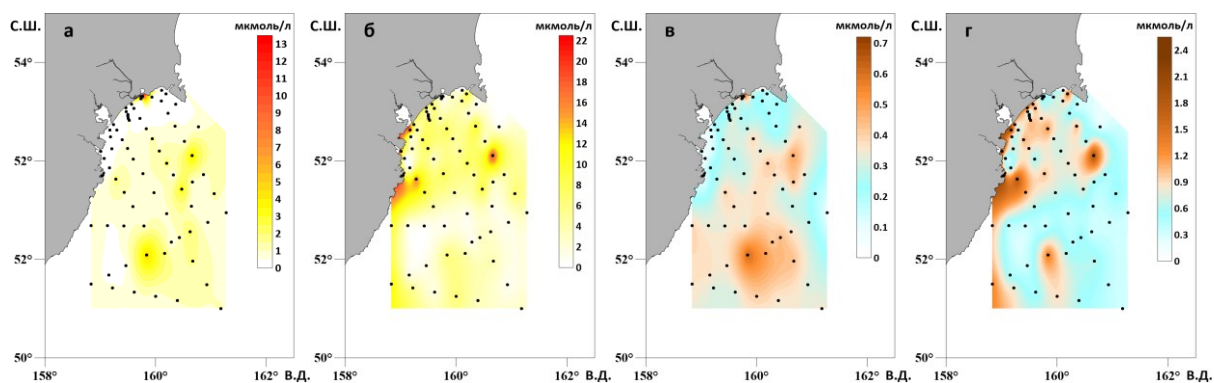


Рис. 2. Пространственное распределение нитратов (а, б) и фосфатов (в, г) в поверхностном слое воды (а, в) и на горизонте 25 м (б, г) Авачинского залива и прилегающей акватории Тихого океана 26 июня – 5 июля 2022 г.

Таким образом, особенностями распределения биогенных веществ в Авачинском заливе и прилегающей акватории Тихого океана являются низкие концентрации фосфатов и высокие – нитратов. Высокая концентрация азота может быть связана с таянием снега в водосборе реки Налычева и поступлением соединений азота с

материковым стоком в залив. Обогащение водосборов азотом, вероятно, происходит преимущественно за счет вулканических эксгаляций и последующего атмосферного переноса их продуктов [3].

Согласно недавним исследованиям [8], при значительном росте N/P соотношений доминируют динофлагелляты, включая потенциально токсичные виды. Многие динофлагелляты более токсичны, когда концентрации азота находятся в стехиометрическом избытке над фосфором. Также известно, что токсичность динофлагеллят значительно возрастает при длительном лимитировании фотосинтеза фосфатами [6]. Учитывая взаимосвязь «красных приливов» и N/P соотношения с преобладанием высоких концентраций азота, сток реки Налычева можно считать одним из основных факторов, способных спровоцировать развитие динофлагеллят после прохождения пика половодья. В то время как существенное понижение N/P соотношения способствовало бы развитию диатомовых водорослей [6]. Кроме того, есть также данные о том, что форма азота влияет на выработку токсинов динофлагеллят. Экспериментальные данные подтверждают, что диатомовые водоросли эффективней усваивают азот в форме нитратов, а динофлагелляты – в форме аммония [6].

Таким образом, в результате работы выявлено, что «цветение» микроводорослей в Авачинском заливе и прилегающей акватории Тихого океана зависит от поступления биогенных веществ с речным стоком с вулканических водосборов. Однако известно, что пеплы различных вулканов отличаются по химическому составу [2] и, соответственно, вносят разное соотношение потоков нитратов и фосфатов в приемные бассейны. Согласно ранее полученным результатам, N/P соотношения для рек Авача и Вилюча составляют в среднем 29 и 53, соответственно, и значительно изменяются в зависимости от сезона [7]. На данный момент авторы не имеют данных о содержании биогенных макроэлементов в реке Налычева, однако очевидно, что N/P соотношения в стоке данной реки также будут иметь существенную межгодовую изменчивость в зависимости от интенсивности вулканизма. Исследование межгодовой изменчивости потоков биогенных веществ со стоком реки Налычева в связи с вулканизмом будет целью дальнейших работ авторов.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы фундаментальных научных исследований в ТОИ ДВО РАН (Per. № 122110100002-8, 121021500052-9).

Список литературы

1. Захарихина Л.В., Литвиненко Ю.С. Геохимические особенности вулканических почв Камчатки // Почвоведение. 2010. № 4. С. 412-421.
2. Малик Н.А. Импактный вклад вулканических извержений в формирование химического состава сезонного снежного покрова (Камчатка) // Лед и снег. 2010. № 4. С. 45-52.
3. Набоко С.И. Вулканические эксгаляции и продукты их реакций / Труды лаборатории вулканологии. Отв. ред. В.И. Влодавец. Москва: Издательство Академии Наук СССР. 1959. Вып. 16. 303 с.
4. Пуйин Б.И. Извержение Авачинской сопки в 1945 г. // Бюллетень вулканологических станций. 1953. № 17. С. 6-23.
5. Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 20. Камчатка. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 368 с.
6. Glibert P.M., Burford M.A. Globally changing nutrient loads and harmful algal blooms: Recent advances, new paradigms, and continuing challenges // Oceanography. 2017. V. 30. № 1. P. 58-69.
7. Semkin P., Pavlova G., Lobanov V. et al. Nutrient flux under the influence of melt water runoff from volcanic territories and ecosystem response of Vilyuchinskaya and Avachinskaya Bays in Southeastern Kamchatka // Journal of Marine Science and Engineering. 2023. V. 11. Art. 1299.
8. Zhang Q.-C., Wang Y.-F., Song M.-J. et al. First record of a Takayama bloom in Haizhou Bay in response to dissolved organic nitrogen and phosphorus // Marine Pollution Bulletin. 2022. V. 178. Art. 113572.

Активный биомониторинг в оценке влияния пеплопадов на загрязнение воздуха

Чернягина О.А.¹, Зиньковская И.И.², Юшин Н.С.²

Active biomonitoring in assessing the impact of ashfalls on air pollution

Chernyagina O.A., Zinicovskaia I.I., Yushin N.S.

¹ Камчатский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Тихоокеанский институт географии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский;

e-mail: kamchatika@mail.ru

² Объединенный институт ядерных исследований, г. Дубна

Впервые активный биомониторинг с использованием техники «мох в мешочках» был применен на Камчатке для оценки влияния пеплопадов на качество воздуха. Содержание Al, Ba, Co, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, P, Pb, Sr, S, V и Zn в экспонированных и контрольных образцах мха было определено на ИСП-ОЭС. Содержание элементов в экспонированных образцах практически во всех точках было выше по сравнению с контролем.

Введение

Вулканы, во время извержения которых в воздух выбрасываются миллионы тонн пепла и газов, являются одними из наиболее важных природных загрязнителей воздуха. Шивелуч – наиболее активный вулкан Камчатки, расположенный в северной части Центральной Камчатской депрессии, в 50 км от пос. Ключи и в 450 км от г. Петропавловск-Камчатский [1]. Извержение вулкана в апреле 2023 года привело к выбросу огромного количества пепла, который выпал в населенных пунктах, находящихся вблизи вулкана. Как известно, помимо газообразных загрязнителей, пепел является важным источником загрязнения воздуха тяжелыми металлами.

Мхи рассматриваются как один из основных биологических индикаторов загрязнения воздуха из-за их широкого распространения, простоты строения, высокой скорости размножения, роста на территориях с разным уровнем загрязнения и возможности мониторинга концентраций загрязнителей различного происхождения [3, 5]. Поскольку у мхов отсутствует хорошо развитая корневая система, они поглощают питательные вещества и загрязняющие вещества в основном из воздуха [4].

В 1971 г. Гудман и Робертс предложили использовать технику «мох в мешках», которая заключается в сборе мха в относительно чистом (фоновом регионе) и экспонировании его на исследуемой территории в специальных проницаемых для воздуха мешочках [6]. На сегодняшний день данная техника широко используется во многих странах мира.

Целью данной работы стало использование техники «мох в мешках» для определения влияния пеплопадов на качество воздуха в населенных пунктах вблизи вулкана Шивелуч.

Материалы и методы

Для проведения активного биомониторинга был выбран мох *Sphagnum girgensohnii*. Мох был собран в мае 2022 г. в водно-болотном угодье Тверской области, которая, по результатам пассивного биомониторинга, является самым чистым регионом в центральной России. Пробоподготовка мха перед экспонированием подробно описана в ранее выполненных работах [6]. Мешочки со мхом развешивали на территории Елизовского, Быстринского, Усть-Камчатского районов (рисунок). По окончании периода экспонирования мешочки со мхами хранили в закрытых бумажных пакетах. Часть неэкспонированного материала хранили в лаборатории и использовали в качестве контроля при расчетах.

В лаборатории растительное сырье извлекали из мешков, сушили до постоянной массы при температуре 105 °С и гомогенизировали в планетарной мельнице Pulverisette 6 («Fritsch», Германия).

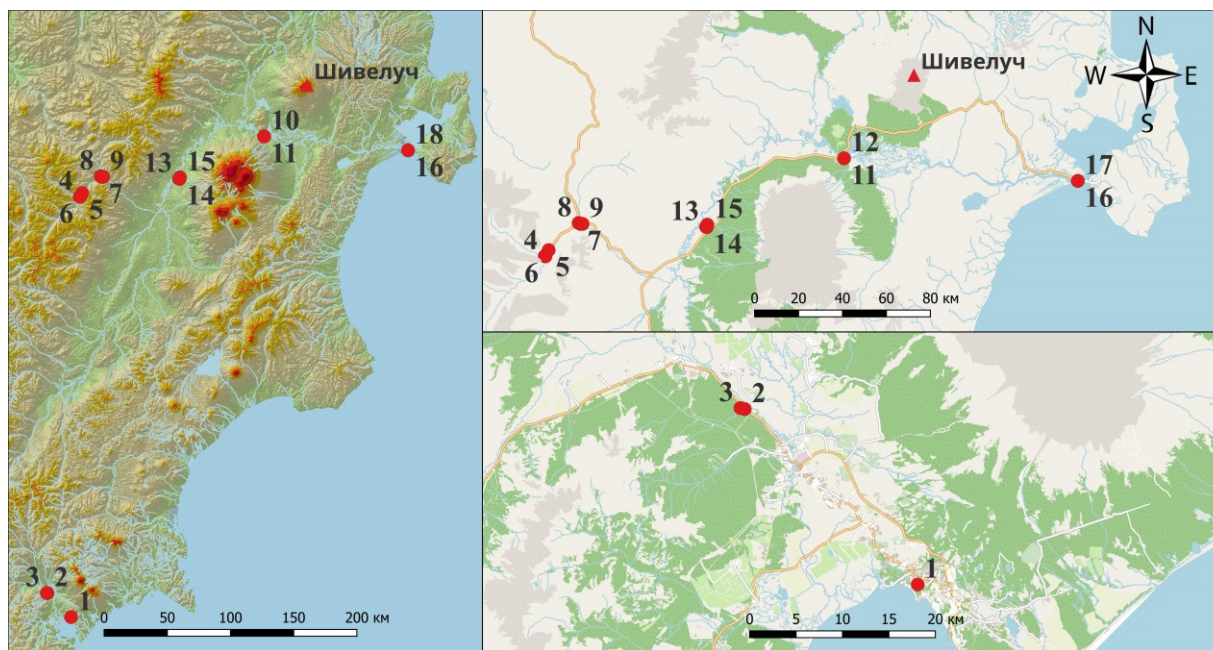


Рисунок. Карта экспонирования мешочков со мхами.

Для проведения элементного анализа 0.5 г мха помещали в тefлоновые сосуды и добавляли 5 мл концентрированной HNO_3 («Sigma-Aldrich», Германия) и 2 мл H_2O_2 (Sigma-Aldrich, Германия). Разложение проводили при 180 °С в микроволновой системе разложения Mars 6 (СЕМ, США). После охлаждения пробы количественно переносили в колбы емкостью 50 мл и доводили до объема деионизированной водой. Более подробную информацию о подготовке проб можно найти в работе [7]. Содержание Al, Ba, Co, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, P, Pb, Sr, S, V и Zn определяли на оптико-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС) PlasmaQuant 9000 Elite (Analytik Jena, Германия). Калибровочные растворы готовили из стандартного раствора IV-STOCK-27 (Inorganic Ventures, США). Все контрольные стандарты анализировали повторно после каждых 10 проб.

Контроль качества измерений обеспечивался анализом эталонного материала «Листья табака восточной басмы» (INCT-OBTL-5). Извлечение элементов из стандартного материала варьировало от 96 % до 110 %.

Результаты и обсуждение

Как видно из данных, представленных в таблице, содержание элементов в экспонированных пробах мха было значительно выше по сравнению с контрольными образцами. Помимо населенных пунктов вблизи вулкана, мхи экспонировали также в г. Петропавловск-Камчатский и вблизи города Елизово. Содержание всех элементов, кроме P и S, в образцах мха, экспонированных в г. Петропавловск-Камчатский (точка № 1), было выше по сравнению с контролем. Так как город не был подвержен пеплопадам, основными источниками элементов в данном случае можно считать транспорт и дорожную пыль [2]. Вблизи г. Елизово (точки №№ 2, 3) содержание основной части элементов было на уровне контроля, кроме Zn, Ba, Mn, источником которых можно считать осаждение частиц почвы и дорожной пыли.

Таблица. Содержание химических элементов (мг/кг) в контрольных и экспонированных образцах мха

№ точек экспонирования	Определенные элементы														
	Al	Cu	Cd	Co	Pb	Zn	V	Ba	Cr	Mn	P	S	Sr	Fe	Ni
<i>контроль</i>	<i>217</i>	<i>3.9</i>	<i>0.14</i>	<i>0.25</i>	<i>1.80</i>	<i>25.5</i>	<i>0.54</i>	<i>22.63</i>	<i>0.34</i>	<i>215</i>	<i>1966</i>	<i>1256</i>	<i>10.40</i>	<i>215</i>	<i>1.44</i>
1*	430	4.9	0.23	0.37	2.36	70.8	1.32	45.2	0.49	338	1191	1161	15.6	577	2.30
2	197	3.7	0.13	0.23	1.86	26.6	0.47	23.5	0.31	304	1945	1180	12.1	231	1.03
3	215	4.3	0.16	0.28	2.34	55.3	0.55	36.4	0.31	352	1732	1209	13.9	278	1.23
4	303	4.7	0.15	0.26	1.89	49.8	0.62	40.3	0.35	348	2051	1395	16.1	311	1.41
5	315	4.1	0.13	0.25	1.68	45.0	0.76	33.7	0.33	318	2045	1323	15.2	341	1.42
6	369	4.7	0.15	0.29	1.96	49.1	1.06	37.4	0.39	340	2101	1402	16.3	427	1.72
7	796	5.1	0.15	0.37	1.83	56.9	2.05	41.8	0.53	368	2207	1475	19.3	704	1.52
8	401	5.7	0.20	0.34	2.76	90.1	0.94	62.2	0.43	434	2038	1495	19.4	400	1.59
9	711	5.4	0.19	0.40	2.41	86.0	1.61	53.3	0.50	410	1947	1431	19.6	577	1.55
10	424	5.0	0.14	0.33	1.83	34.0	1.19	29.5	0.81	310	1856	1361	13.8	427	1.48
11	362	4.5	0.15	0.31	1.77	37.0	0.87	31.1	0.58	324	1664	1234	13.7	344	1.30
12	387	4.4	0.14	0.33	1.90	30.4	0.97	27.1	0.68	316	1800	1289	12.7	384	1.27
13	1024	5.1	0.14	0.51	2.48	39.2	2.55	38.7	1.02	309	1259	1017	17.7	830	1.50
14	404	4.5	0.14	0.31	1.89	50.3	0.91	47.4	0.45	332	1434	1096	13.8	368	1.28
15	573	4.9	0.15	0.36	1.81	53.6	1.39	41.8	0.75	381	1373	1136	16.4	493	1.46
16	981	6.4	0.16	0.95	2.27	49.5	3.81	43.1	3.34	339	1455	1234	15.7	1366	6.29
17	702	5.8	0.13	0.70	2.00	33.7	2.63	28.9	2.20	307	1683	1253	13.6	996	4.69
18	595	5.0	0.14	0.58	2.31	49.9	1.95	41.9	1.79	327	1406	1131	14.5	807	3.77

Примечание. 1 – г. Петропавловск-Камчатский; 2, 3 – в 40 км от г. Елизово; 4, 5, 6 – с. Эссо; 7, 8, 9 – с. Анавгай; 10, 11, 12 – п. Ключи; 13, 14, 15 – п. Козыревск; 16, 17, 18 – п. Усть-Камчатск.

В точках 4-6 (с. Эссо), содержание Al, Cd, Pb, Cu, Co, Cr, P, S и Ni было на уровне или чуть выше контроля, содержание Zn, V, Ba, Sr, Fe выше на 15-97 %. Источником этих элементов предположительно может быть вулканический пепел. Во мхах, экспонированных в с. Анавгай (точки №№ 7-9), содержание всех элементов, кроме P и Ni, было выше контроля. Самое высокое накопление наблюдалось для Al, Ba, Zn, V, Fe и Sr. Стоит отметить, что во мхах накапливались одни и те же элементы вне зависимости от расположения точки экспонирования, и накопление элементов было выше, чем в г. Петропавловск-Камчатский. В поселке Ключи (точки №№ 10-12) во мхах накапливались Cu, Co, Zn, V, Ba, Cr, Sr и Fe. Мхи, экспонированные в п. Козыревск, накопили Al, Co, Zn, V, Ba, Cr, Sr, Mn и Fe, а в образцах, экспонированных в п. Усть-Камчатск, наблюдали накопление Cu, Co, Pb, Zn, V, Ba, Cr, Sr, Ni, и Fe. Ввиду отсутствия в описанных населенных пунктах крупных промышленных предприятий можно считать вулканический пепел важным источником накопления химических элементов в образцах мха. В дальнейшем планируется определение элементного состава пепла и сопоставление результатов с данными, полученными в настоящей работе.

Список литературы

1. *Гурина О.А., Лупян Е.А., Хорват А. и др.* Анализ развития пароксизмального извержения вулкана Шивелуч 10-13 апреля 2023 года на основе данных различных спутниковых систем // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 2. С. 283-291.
2. *Apeagyei E., Bank M.S., Spengler J.D.* Distribution of heavy metals in road dust along an urban-rural gradient in Massachusetts // Atmospheric Environment. 2022. V. 45. P. 2310-2323. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.11.015>
3. *Macedo-Miranda G., Avila-Pérez P., Gil-Vargas P. et al.* Accumulation of heavy metals in mosses: a biomonitoring study // Springerplus. 2016. V. 5. P. 1-13. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2524-7>
4. *Świsłowski P., Kosior G., Rajfur M.* The influence of preparation methodology on the concentrations of heavy metals in Pleurozium schreberi moss samples prior to use in active biomonitoring studies // Environmental Science and Pollution Research. 2021. V. 28. P. 10068-10076. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11484-7>
5. *Vuković G., Urošević M.A., Pergal M. et al.* Residential heating contribution to level of air pollutants (PAHs, major, trace, and rare earth elements): a moss bag case study // Environmental Science and Pollution Research. 2015. V. 22. P. 18956-18966. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5096-0>
6. *Zinicovscaia I., Aničić Urošević M., Vergel K. et al.* Active moss biomonitoring of trace elements air pollution in Chisinau, Republic of Moldova // Ecological Chemistry and Engineering S. 2018. V. 25. № 3. P. 361-372. <https://doi.org/10.1515/eces-2018-0024>
7. *Zinicovscaia I., Hramco C., Chaligava O. et al.* Accumulation of potentially toxic elements in mosses collected in the Republic of Moldova // Plants. 2021. V. 10. P. 1-13. <https://doi.org/10.3390/plants10030471>

Научное издание

**Вулканизм и связанные с ним процессы.
Материалы XXVII ежегодной научной конференции,
посвященной Дню вулканолога**

27-29 марта 2024 г.

Сдано в набор 18.04.2024
Подписано к печати 18.04.2024
Дата выхода: 01.05.2024
Формат 60x84/8
Бумага типографская
Гарнитура «Таймс»
Усл.-печ. л. 39.06

Заказ № СТ24-000766

Отпечатано с готового оригинал-макета, подготовленного в ИВиС ДВО РАН,
в ООО «СЭТО-СТ», 683024, г. Петропавловск-Камчатский, пр. 50 лет Октября, 1/2.
тел. 8(4152) 43-17-14