



УДК 553.086

В. М. Округин<sup>1</sup>, Ш. С. Кудяева<sup>1</sup>, С. В. Москалева<sup>1</sup>,  
Т. А. Горностаева<sup>3</sup>, П. М. Карташов<sup>3</sup>, А. В. Мохов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН; okrugin74@gmail.com;  
kudyaeva.sharapat@gmail.com;*

<sup>2</sup> *Камчатский Государственный университет имени Витуса Беринга:*

<sup>3</sup> *Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии  
и геохимии РАН, г. Москва*

## Самородное золото в продуктах ТТИ им. 50-летия ИВиС ДВО РАН

Трещинное извержение вулкана Плоский Толбачик (ТТИ) началось 27 ноября 2012 г. и продолжалось до 17 сентября 2013 г. За время извержения на дневную поверхность были вынесены огромные массы магматического вещества (объём извергнутого материала составил 2,2 км<sup>3</sup>, площадь лавовых потоков — 45 км<sup>2</sup>), в котором исследователями, включая авторов, обнаружено большое разнообразие «экзотичных» минералов [4, 6, 8, 9, 10]. Среди них — впервые для этого извержения — самородное золото. Самородное золото имеет исключительно мелкие размеры (5–15 мкм, в единичных случаях — до 25 мкм.) довольно простую форму частиц; по составу — две разновидности высокопробное (820–950) и электрум (550–750); присутствует в виде единичных зёрен и микровключений в других минералах (оксиды железа, кварц). В свою очередь оно содержит наночастицы редких, неизвестных ранее на Камчатке фаз.

### Введение

Толбачинская зона шлаковых конусов (ТЗШК, Толбачинский дол) — огромная лавовая равнина — представляет собой уникальный объект для изучения процессов вулканогенного минералообразования [1, 2, 5, 7, 8, 9]. В результате детальных исследований продуктов Большого Трещинного Толбачинского извержения (БТТИ 1975–76 гг.) — одного из шести крупнейших трещинных извержений новой эры было обнаружено более 120 минералов и их количество продолжает увеличиваться с каждым годом [2].

Новое извержение, начавшееся 27 ноября 2012 г. и закончившееся в середине сентября 2013 г., открыло ещё более широкие возможности для изучения форм нахождения рудообразующих элементов на различных этапах развития вулканических (магматических) процессов (рис. 1).

Авторами проводились полевые исследования как во время активной стадии извержения, так и после его завершения (декабрь 2012 г. — сентябрь 2014 г.).

В образцах, отобранных в 2013–2014 гг. с поверхности лавовых потоков, в зоне больших лавовых котлов, при лабораторных исследованиях были обнаружены мелкие агрегаты самородного золота.

Следует отметить, что присутствие выделений самородного золота в продуктах извержения активных вулканов — факт достаточно известный. На вулканах Камчатки и Курил оно впервые установлено

и детально изучено Л. П. Вергасовой, И. В. Чаплыгиным и другими исследователями [1, 11].

Частицы самородного золота были встречены в плюме вулкана Эребус (Антарктида), а также в аэрозолях и пробах снега, отобранных в его окрестностях. Размеры частиц из плюма достигали 20–60 мкм [12].

Самородное золото диагностировано в отложениях (сублиматах) кварцевых трубок, установленных в местах выхода высокотемпературных фумаролов на некоторых активных вулканах мира. Наиболее детально оно изучено в сублиматах вулкана Колима (Мексика), где отлагается в узком температурном интервале (550–600°С). Самородное золото представлено пластинчатыми кристаллами треугольной и пятиугольной формы с размерами 5–40 мкм. Значительно реже — пентагональными призмами и октаэдрами. По своему химическому составу — химически чистое, без примесей серебра или других металлов [13].

На вулкане Кудрявый (о. Итуруп), в отличие от вулкана Колима, самородное золото встречается, преимущественно, в виде твёрдых растворов Au-Ag и Cu-Au-Ag как в природных фумарольных эксталятах (продукты реакций фумарольный газ — изверженная горная порода), так и сублиматах кварцевых трубок. Здесь оно пользуется широким развитием, практически, на всех известных фумарольных полях с температурами 870°С, 650°С и 290–300°С [11].



Рис. 1. Лавовое поле ТТИ имени 50-летия ИВиС ДВО РАН; красное — район отбора образцов в 2013–2014 гг. Карта по данным [4].

### Объект исследований и каменный материал

Извержение произошло в Толбачинской региональной зоне шлаковых конусов, площадь которой составляет около 900 км<sup>2</sup> при протяжённости до 70 км. Ретроспективный анализ сейсмических данных позволил сотрудникам Камчатского Филиала Геофизической Службы РАН выявить аномалию сейсмического режима перед началом ТТИ им. 50-летия ИВиС ДВО РАН [5, 6, 9]. Извержение началось с образования на южном склоне вулкана Плоский Толбачик трещины длиной примерно 5 км, которая ориентирована на юго-юго-запад от перевала между вулканами Острый и Плоский Толбачик. ТТИ было сосредоточено в двух основных эруптивных центрах: — прорыв им. И. А. Меняйлова (2000 м), который функционировал в течение трёх дней; — прорыв им. С. И. Набоко (1500 м), где и была сконцентрирована основная активность вплоть до окончания извержения [3, 4, 5, 6].

Ведущая роль среди продуктов извержения принадлежит породам эффузивной фации. Лавы прорыва Меняйлова представлены глиноземистыми трахиандеизибазальтами, — прорыва Набоко — более основными разностями. Макроскопически — это субафировые чёрные плотные образования с небольшим количеством вкрапленников плагиоклаза, оливина и пироксена [3, 4, 5].

Поверхность лавовых потоков, особенно в зоне лавовых котлов и у истоков лавовых рек, характеризуется своеобразными игольчатыми стекловатыми текстурами. Хрупкие с алмазным блеском, раковистым изломом, перистые до образований, схожих с рыбацкими иглами, они напоминают своеобразные развалы, сложенные наконечниками стрел

и копий, изготовленных из чёрного вулканического стекла. При легком соприкосновении с ними они моментально теряют сплошность и распадаются на серию причудливых остроугольных режущих обломков (рис. 2,3). Такая поверхность обладает огромной сорбционной способностью, способствующей протеканию химических реакций в системе газ-порода с отложением значительных количеств разнообразных новообразований — с одной стороны, а с другой играет роль своеобразного «разделительного стола или промприбора», обеспечивающего гравитационное обогащение при ветровой эрозии. Сильные ветры, талые и дождевые воды переносят разнообразные по своему составу частицы как из кратера и «эксплозивной тучи» так лавовых озёр и колодцев — центров выделения вы-



Рис. 2. Общий вид поверхности лавовых потоков ТТИ имени 50-летия ИВиС ДВО РАН.

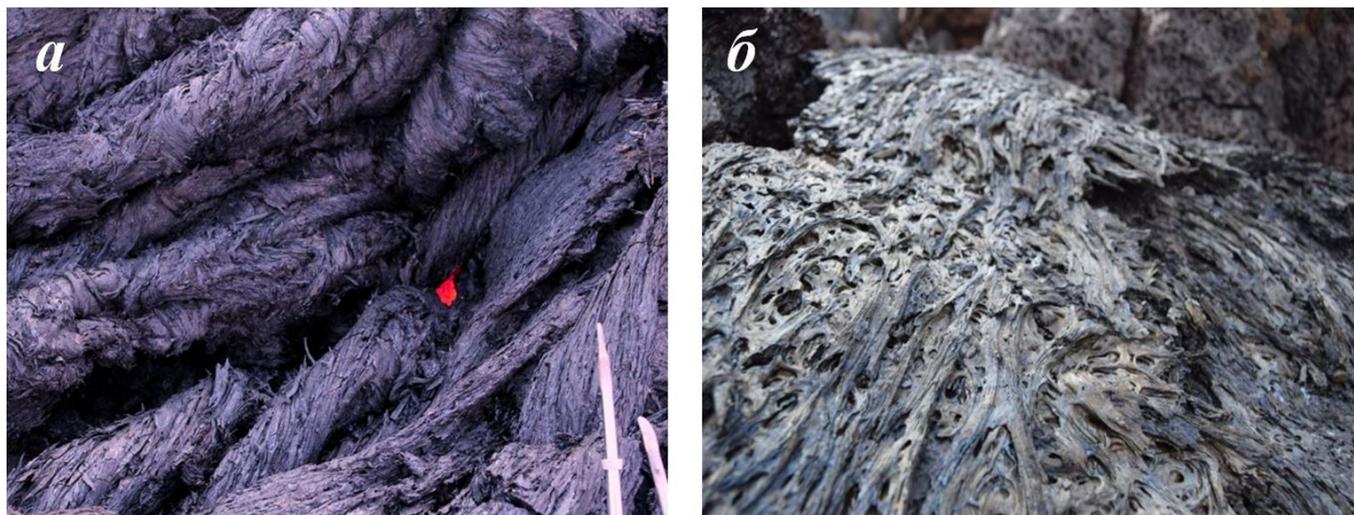


Рис. 3. Особенности строения поверхности лавовых потоков.

сокотемпературных магматических газов. Эти газы вступают в реакции с застывающими базальтами с образованием разнообразных возгонов, крайне неустойчивых при воздействии вышеназванных агентов эрозии.

Одна из отличительных особенностей ТТИ имени 50-летия ИВиС ДВО РАН — обилие минералов эксгаляций, которые отлагаются на поверхности лавовых потоков в местах выходов вулканических газов [7, 8, 9]. Именно вблизи от таких мест и были отобраны образцы игольчатых стекловатых лав, в которых было обнаружены частицы самородного золота (рис. 1, 2, 3, 4).

Это не первая находка самородного золота в региональной зоне шлаковых конусов. В своё время самородное золото было установлено в продуктах фумарольной деятельности БТТИ 1975–1976 гг. Л. П. Вергасовой, а затем И. В. Чаплыгиным [1, 2, 11].

Авторами мелкие зёрна и микрочастицы самородного золота были диагностированы в образцах, отобранных на разных стадиях извержения — активной магматической (февраль–май 2013 г.) и в самом начале постмагматической (17 сентября 2014 г. — завершение explosивно-эффузивной деятельности).

### Методы исследований

Извлечение зёрен самородного золота проводилось двумя способами, в основу которых был положен гравитационный способ. А именно — встряхивание игольчатых стекловатых агрегатов над белым листом бумаги. Таким способом были выявлены первые золотины в коллекциях февраля–мая 2013 г.

Вторая находка самородного золота сделана в сходном материале (как и в случае первой находки), отобранном сентябре 2014 г. в зоне Главного лавового котла. Однако представительность этого материала была иной. По сути дела взята «минигрупповая проба». С поверхности застывших лавовых речек и разрушенного лавовода собраны игольчатые стекловатые агрегаты общим весом

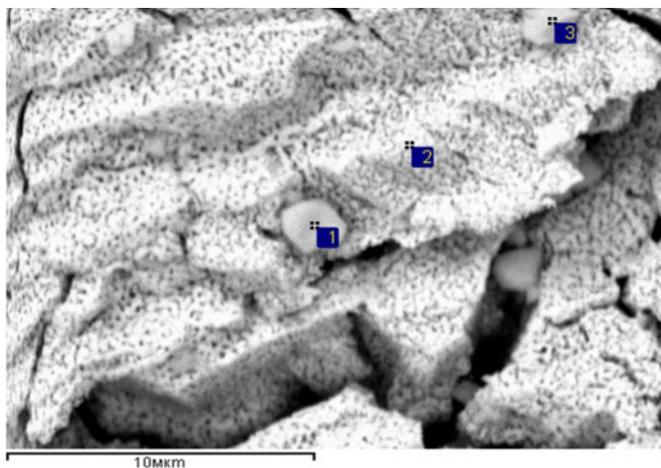


Рис. 4. Микроструктура самородного золота и включения сложных минеральных фаз (интерметаллид Au-Pb-Sb-Sn, табл. 1); 1,2,3 — аналитические точки. Фото BSE GSM 5610LV.

Таблица 1. Химический состав самородного золота и включений сложных минеральных фаз по данным SEM (рис. 2).

Элемент	Ag	Sn	Sb	Au	Pb	O	Σ
1	1,9	9,98	14,05	20,28	43,15	10,64	100
2	8,86			91,14			100
3	6,9		2,3	82,23	7,25	1,32	100

около 1,5 кг. Предпринимались все меры, чтобы исключить возможное «заражение» при опробовании, упаковке и доставке в ИВиС ДВО РАН для дальнейших исследований.

В лаборатории вулканогенного рудообразования половина пробы была подвергнута гравитационному обогащению. Полученная таким способом а «тяжёлая» фракция (вес около 25 г) обработана плавиковой кислотой (HF), практически, до полного рас-

творения силикатной матрицы. Оставшийся после растворения «полиминеральный осадок» просматривался с помощью стереомикроскопа Stemi 2000 C (Carl Zeiss). Наиболее интересные частицы, минеральные зёрна отбирались и наклеивались на углеродную ленту для дальнейшего изучения.

Ещё раз следует сказать, что на всех этапах работ, начиная от опробования лавовых потоков и заканчивая электронно-зондовыми исследованиями, соблюдались все меры предосторожности для минимизации вероятного техногенного «заражения образцов».

Для изучения отдельных «мономинеральных» зёрен самородного золота, его сростаний и других минеральных агрегатов, их микроморфологии, микроструктуры и химического состава были применены методы классической минералогии, минераграфии и локального физико-химического анализа включающие такое современное оборудование как прецизионный стереомикроскоп Discovery V12 SteREO; последняя версия новейшего сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega 3 с энергетическим спектрометром Oxford Instruments X-Max 80 mm<sup>2</sup>, сканирующий электронный микроскоп GSM 5610LV. Исследования выполнялись в лаборатории вулканогенного рудообразования, Аналитическом центре ИВиС ДВО РАН и ИГЕМе РАН (П. М. Карташев, Т. А. Горностаева, А. В. Мохов).

### Результаты исследований

Первая находка — серия зёрен самородного золота была выделена из стекловатых разностей базальтов, слагающих поверхность «свежих» (возраст 2–3 дня) лавовых потоков активной стадии извержения (февраль-май 2013 г.). Частицы самородного золота просто высыпались на лист белой бумаги при встряхивании над ним небольших образцов. Форма зёрен простая — изометричная или слегка вытянутая. Цвет «густо-желтый, тусклый» с зеленоватым оттенком. Размеры — 10–25 микрон, микроструктура — пористая. По составу это высокопробное (820–950) самородное золото (табл. 1). В отдельных золотилах обнаружены однородные микровключения соединений (интерметаллиды?) золота, свинца, сурьмы и олова (рис. 4, табл. 1). Минеральные фазы с таким химическим составом прежде на Камчатке не встречались.

Вторая находка частиц самородного золота сделана в оставшемся после растворения в HF, «полиминеральном осадке» пробы, отобранной 17 сентября 2014 г. Методами микронзондового анализа в этом «осадке» определены самородное золото, циркон, корунд, кварц, оксиды железа, шпинелиды, единичные зёрна пирита и сфалерита (рис. 6).

Самородное Золото — мелкое с размерами не более 10–15 мк. Как правило, это отдельные свободные частицы (минеральные зёрна), в единичных случаях — сростания со сфалеритом (рис. 5). Встречены микровключения самородного золота (первые микроны) в оксидах железа и кварце. По составу

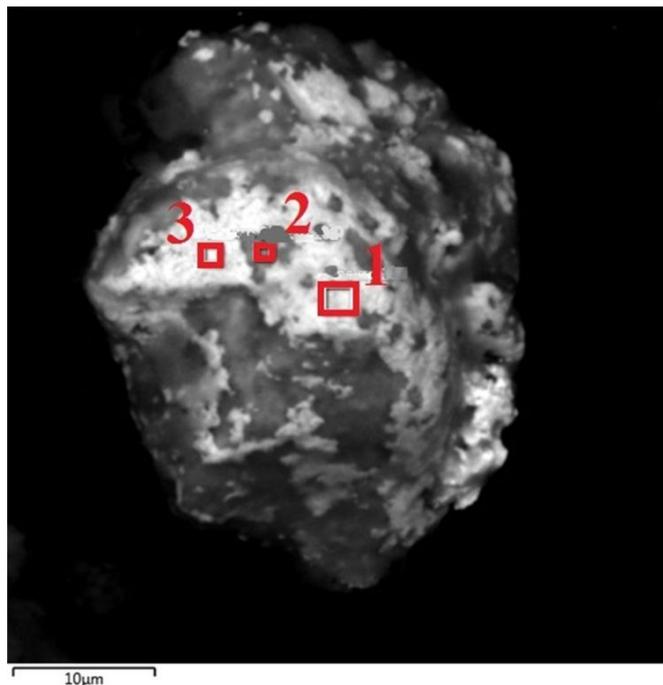


Рис. 5. Зерно сложной формы: самородное золото в сростании со сфалеритом. Фото BSE SEM Vega3 Tescan.

у соответствует электруму, пробность меняется от 550 до 750 (предварительные данные!!!).

### Выводы

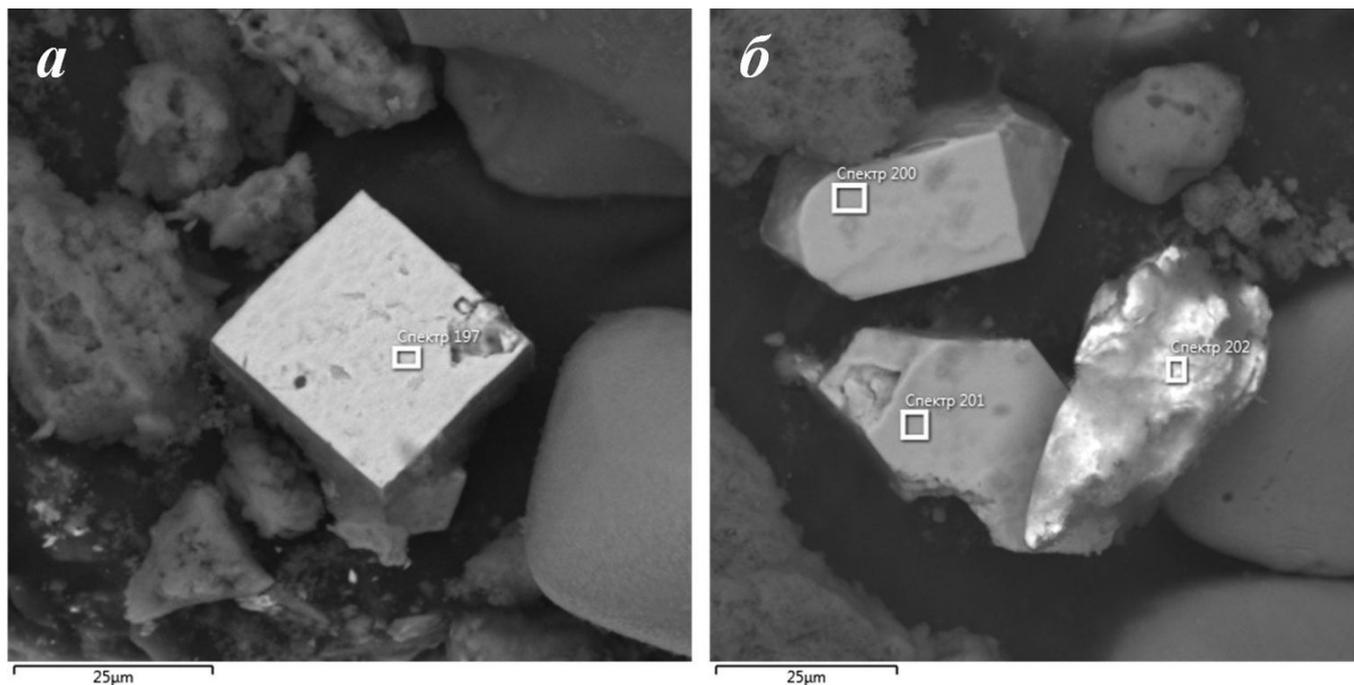
Выявлен широкий спектр минералов, «нетипичных» для продуктов вулканических извержений: самородные металлы — золото, медь, олово, селен, железо; интерметаллические соединения — Cu-Sn-Sb-Pb; сульфиды — пирит, халькопирит, халькозин, гринокит [9, 10].

Интенсивное выделение газов и игольчатая сложная микроструктура поверхности лавовых потоков способствовали формированию значительных площадей отложению на них различных минеральных образований, среди которых авторами было обнаружено и самородное золото.

На вулкане Кудрявый самородное золото ассоциирует с сульфидами (сфалерит, галенит, молибденит и др.), кислородсодержащими соединениями (рутил, магнетит, ферберит и др.), хлоридами и сульфатами натрия и калия [11].

Появление самородного золота в ассоциации с Na-K сульфатами на вулкане Колима объясняется эволюцией магматического флюида. Предполагается, что золото переносится в виде либо сульфида (AuS), либо гидрида (AuH). При продвижении вулканического газа к поверхности газ встречается с кислородом атмосферы, в результате чего S или H взаимодействуют с O<sub>2</sub>, с последующим отложением золота в самородном виде [11, 13].

Присутствие золота (в продуктах ТТИ имени 50-летия ИВиС) было установлено в конденсатах вулканических, талой воде снега, отобранного с поверхно-



**Рис. 6.** «Агрегат оставшихся от растворения минералов»: а — идиоморфный кристалл пирита ( $\text{FeS}_2$ ); б — зёрна циркона ( $\text{ZrSiO}_4$ ). Фото BSE SEM Vega3 Tescan.

сти лавовых потоков в непосредственной близости от лавового котла в феврале-марте 2013 [8, 9]. Минеральная ассоциация, в которой обнаружено самородное золото, сопоставима с таковой вулкана Кудрявый. В самородном золоте диагностированы микровключения интерметаллидов типа Cu-Sn-Sb-Pb. Сведения о наличии подобных фаз в рудах и минералах постмагматических стадий Камчатки в литературе отсутствуют. В то же время медь, олово, сурьма и свинец установлены в талых водах и конденсатах вулканических газов ТТИ [7, 8, 9, 10]. Пока это только три аргумента в пользу присутствия «первичного» самородного золота, образование которого как-то связано процессами ТТИ им. 50-летия ИВиС.

Авторы данного сообщения не ставили перед собой задачи изучения источника и форм переноса (газовый транспорт и т. д.) золота к месту его обнаружения. Основное внимание было обращено на «чистоту эксперимента» — доказательство, того что самородное золото действительно присутствует на поверхности лавовых потоков, вблизи лавовых котлов и лавоводах — источниках истечения высокотемпературных «магматических» газов. В процессе взаимодействия таких газов с уникальными по своим текстурно-структурным особенностям изверженными породами происходило (этот процесс продолжается) образование разнообразных минеральных сообществ — возгонов (экзгаляций).

Возможно, механизм образования золота в продуктах извержения ТТИ имени 50-летия ИВиС такой же, как и на вулкане Колима. Можно предположить, что образование золота происходит путём

отложения из глубинных газов. Чтобы подтвердить (или опровергнуть) этот факт необходимо продолжение исследований

Самородное золото можно рассматривать в качестве типоморфного минерала твёрдых продуктов современной вулканической деятельности (фумарольных ассоциаций в частности) Курило-Камчатской островной дуги.

Авторы выражают благодарность В. В. Ящук, А. В. Бьяченко, М. Е. Зеленскому, Н. А. Малик, В. В. Ананьеву, Я. Д. Муравьёву, А. М. Округиной, Е. В. Карташёвой, В. В. Куликову, А. А. Платонову, О. А. Зобенько, Е. Ю. Плутахиной, В. К. Карандашеву за помощь в проведении исследований.

#### Список литературы

1. Вергасова Л. П., Старова Г. Л., Серафимова Е. К. и др. Самородное золото вулканических эксгаляций шлаковых конусов Большого трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 2000. № 5. С. 19-27.
2. Вергасова Л. П., Филатов С. К. Новые минералы в продуктах фумарольной деятельности Большого Трещинного Толбачинского извержения // Вулканология и сейсмология. 2012. № 5. С. 3-12.
3. Вольнец А. О., Мельников Д. В., Якушев А. И. Первые данные о составе продуктов Трещинного Толбачинского извержения им. 50-летия ИВиС ДВО РАН (Камчатка) // Доклады Академии Наук, 2013. Том. 452. № 3. С. 303-307
4. Вольнец А. О., Мельников Д. В., Якушев А. И. и др. Трещинное Толбачинское извержение 2012-2013 гг.: первые данные о вариациях состава пород, вкрапленников и кристаллолапиллей плагноклаза // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм

- и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 32–37.
5. Гордеев Е. И., Муравьев Я. Д., Самойленко С. Б. и др. Трещинное Толбачинское извержение в 2012–2013 гг. Первые результаты // Доклады Академии Наук, 2013 г. Том. 452. № 5. С. 562–566.
  6. Двигало В. Н., Свирид И. Ю., Шевченко А. В. Первые количественные оценки параметров Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. по данным аэрофотограмметрических наблюдений // Вулканология и сейсмология. 2014. № 5. С. 3–11.
  7. Карпов Г. А., Кривовичев С. В., Вергасова Л. П. и др. Оксисульфаты меди, натрия и калия на лавовых потоках Трещинного Толбачинского извержения 2012–2013 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 6. С. 22–30.
  8. Малик Н. А., Зеленский М. Е., Округин В. М., Чубаров В. М., Гембицкая И. М. Эмиссия элементов эруптивными газами ТТИ им. 50-летия ИВиС ДВО РАН // Материалы региональной научной конференции «Вулканизм и связанные с ним процессы», посвящённой Дню вулканолога, 29–30 марта 2013 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2014. С. 92–105.
  9. Округин В. М. Вулканическая фантазия — месяц третий // Горный вестник Камчатки. 2013. В. 1 (23). С. 79–92.
  10. Округин В. М., Козлов В. В., Малик Н. А., Возможности сканирующей электронной и зондовой микроскопии при изучении форм нахождения меди в продуктах извержения Толбачинской зоны ареального вулканизма (Камчатка) // Тезисы докладов XIX Российского симпозиума по растровой электронной микроскопии и аналитическим методам исследования твёрдых тел. г. Черноголовка. 2015. С. 46–47
  11. Чаплыгин И. В. Рудная минерализация высокотемпературных фумарол вулкана Кудрявый (о. Итуруп, Курильские о-ва). Дис. к.г.-м.н.. М. 2009. 186 с.
  12. Meeker K. A., Chuang R. L., Kyle P. R., Palais J. M. Emission of elemental gold particles from Mount Erebus, Ross Island, Antarctica // Geoph. Res. Lett. 18. 1991. P. 1405–1408.
  13. Taran Yu. A., Bernard A., Gavilanes J.-C., Africano F. Native gold in mineral precipitates from high-temperature volcanic gases of Colima volcano, Mexico // Appl. Geochem. 2000. Vol. 15. P. 337–346.