

УДК 550.34:550.21

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПОД РАЙОНОМ УЗОН-ГЕЙЗЕРНОЙ ВУЛКАНО-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ДЕПРЕССИИ МЕТОДОМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**Кугаенко Ю.А.¹, Горбатилов А.В.², Салтыков В.А.¹, Степанова М.Ю.²**¹ Камчатский филиал Геофизической службы РАН,Петропавловск-Камчатский, *ku@emsd.ru*² Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Москва**Аннотация**

Для реконструкции глубинной структуры среды под районом Узон-Гейзерной вулканно-тектонической депрессии проведена пошаговая съемка фоновых микросейсм на взаимно перпендикулярных профилях и применен метод низкочастотного микросейсмического зондирования. Построены глубинные разрезы земной коры до 30 км, отражающие распределения относительных скоростей поперечных сейсмических волн. Проведена их комплексная интерпретация с использованием известных ранее результатов геологических, геолого-морфологических, петрологических исследований. Идентифицирована и пространственно локализована область закристаллизовавшегося кислого очага под кальдерным комплексом на глубинах 6–10 км. Выявлены и локализованы предположительные области концентрации базальтовых расплавов. Получено согласие геометрии обнаруженных глубинных структур с моделью внедрения магмы в верхние горизонты коры, предполагаемой по данным спутниковой интерферометрии.

Введение

Узон-Гейзерная вулканно-тектоническая депрессия относится к Восточно-Камчатскому вулканическому поясу и включает в себя два всемирно известных уникальных природных объекта: Долину Гейзеров и кальдеру Узон (территория Кроноцкого государственного биосферного природного заповедника). В 1970–1990-х годах в Узон-Гейзерном районе был выполнен большой объем геологических и петрологических работ [1–3, 8–12], однако геофизические и сейсмологические исследования ранее не проводились, а базовые инструментальные наблюдения (постоянные GPS-пункты, региональные сейсмостанции) отсутствуют и в настоящее время. Это заставляет рассматривать район как все еще малоизученный. Подтверждением служат недавно опубликованные данные спутниковой интерферометрии [16, 17] о поднятии на 15 см в 2001–2003 гг. восточной части депрессии и примыкающего к ней вулканического массива Кихпинич. Также неожиданной для научного сообщества явилась геологическая катастрофа – гигантский оползень 3 июня 2007 г., изменивший ландшафт и привычный облик Долины Гейзеров [6, 14]. Остро обозначились проблемы, связанные с ограниченностью существующих представлений об опасных эндогенных и экзогенных процессах и отсутствием специализированных геофизических исследований этой территории.

В 2009 г. для реконструкции глубинной структуры среды в районе Узон-Гейзерной вулканно-тектонической депрессии были впервые организованы геофизические наблюдения, результаты которых представлены в данной публикации.

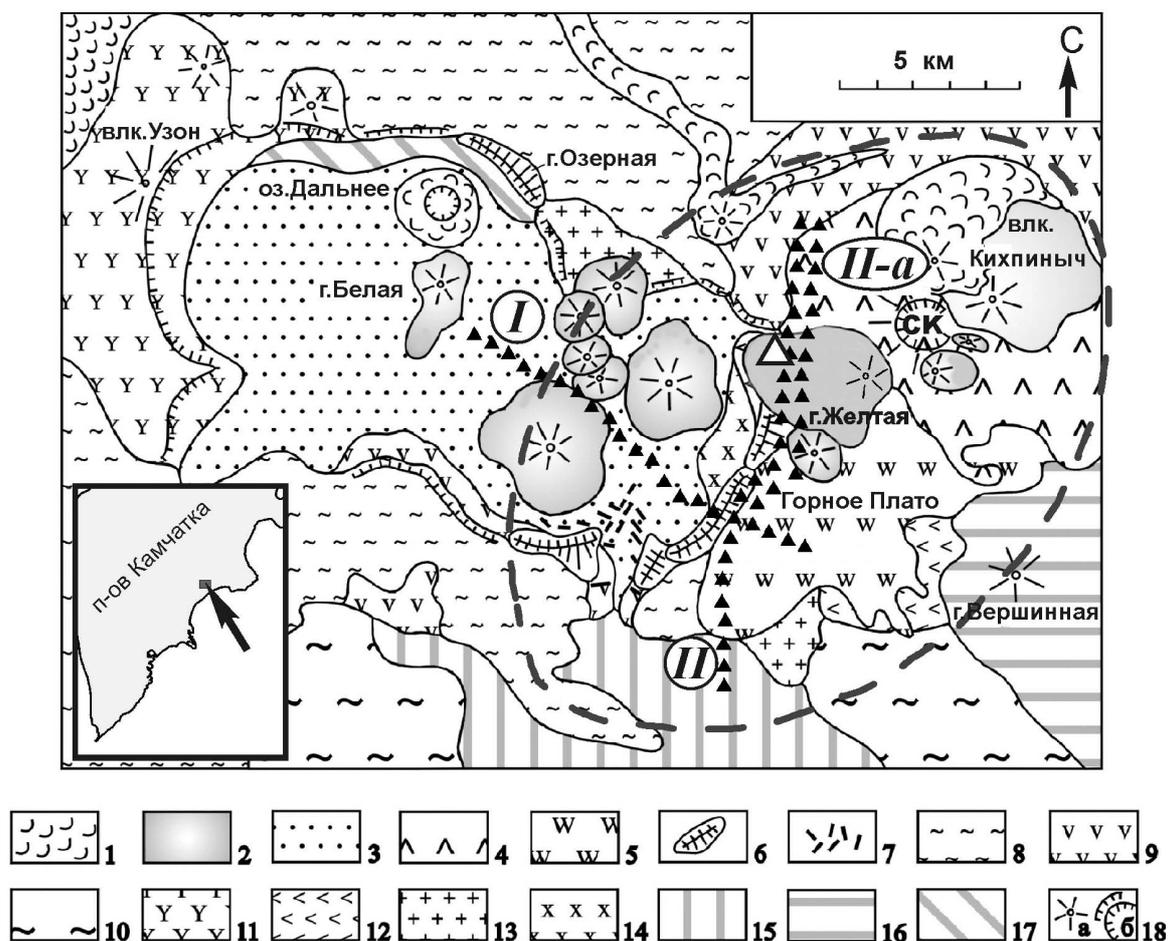


Рис. 1. Схематическая геологическая карта района проведения микросейсмического профилирования [10]: Узон-Гейзерная вулканотектоническая депрессия и вулканический массив Кихпинич. На карту-схему нанесены реперы профилей микросейсмической съемки (черные треугольники) и опорная станция (белый треугольник). Эллипсом оконтурена граница Кихпиничского долгоживущего вулканического центра [1, 8]. Условные обозначения: Голоцен: 1 – лавы андезитового, андезибазальтового состава. Верхний плейстоцен: 2 – лавы дацитового, риодацитового состава; 3 – озерные отложения, заполняющие Узон-Гейзерную депрессию; 4 – лавы базальтового состава (вулкан Старый Кихпинич); 5 – лавы андезитового состава; 6 – комплекс бортовых экструзий; 7 – дайковый комплекс; 8 – игнимбриты, связанные с формированием Узон-Гейзерной депрессии; 9 – лавы андезитового состава («андезиты бортов»). Средний плейстоцен: 10 – игнимбриты, связанные с формированием Большесемьячической кальдеры; 11 – лавы базальтового, андезибазальтового состава (вулкан Узон); 12 – лавы базальтового состава (Горное Плато); 13 – лавы риодацитового состава; 14 – лавы дацитового состава; 15 – лавы андезитового, андезибазальтового состава. Нижний – средний плейстоцен: 16, 17 – лавы базальтового состава. 18 – центры вулканических построек (а), границы Узон-Гейзерной депрессии, кратера вулкана Старый Кихпинич (СК), маара оз. Дальнего (б).

О районе исследования

Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия представляет собой вулканическую структуру овальных очертаний, вытянутую в широтном направлении и имеющую размеры по кромке ограничивающих ее уступов 9×18 км (рис. 1). Кальдерный комплекс Узон-Гейзерной депрессии состоит не менее чем из 6 отдельных кальдер, образовавшихся в среднем-верхнем плейстоцене, но их выделение и описание затруднены из-за того, что вся внутренняя часть этой впадины заполнена мощной толщей озерных отложений и экструзивными куполами [10, 11]. Западная часть кальдерной системы представляет собой впадину с относительно плоским дном, где расположены многочисленные озера, грязевые котлы и термальные источники. Она носит собственное название – кальдера Узон. Восточная часть депрессии плохо выражена в рельефе, так как внедрившиеся после ее формирования лавы образовали серию крупных экструзивных куполов и практически полностью заполнили ее внутреннюю часть. Вдоль восточной границы депрессии пролегает глубокий каньон с разнообразными термальными источниками, в том числе гейзерами, – Долина Гейзеров. Далее на восток располагается сложный вулканический массив Кихпиныч, который состоит из нескольких слившихся разновозрастных вулканических сооружений [2]. Его последнее извержение произошло 500–600 лет назад. Депрессия связана с узлом пересечения крупных региональных разломов: магмо- и флюидопроводящего Вулканического раздвиг северо-восточного простирания и субширотного Узон-Валагинского глубинного сдвига. С этими региональными структурами связаны две системы поверхностных разрывных нарушений соответствующих простираний. Выделена также сеть разломов, ориентированных по отношению к депрессии концентрически [8].

Система наблюдений

В сентябре 2009 г. в ходе полевых работ выполнена микросейсмическая съемка на взаимно перпендикулярных профилях в районе «Долина Гейзеров – вулкан Кихпиныч» (рис. 1). Профили были заложены с учетом данных о геологическом строении района [1–3, 9–12], сложного рельефа местности и результатов спутниковой интерферометрии [16, 17]. Профиль **I** пересек восточную часть и борт Узон-Гейзерной депрессии в направлении ЮВ – СЗ. Профиль **II** субмеридионального простирания прошел вдоль восточного борта депрессии и захватил западное подножье вулканического массива Кихпиныч. Для повышения достоверности получаемых экспериментальных разрезов был пройден профиль **II-а**, смещенный относительно профиля **II** на 500 м к востоку. Профилирование производилось в виде пошагового накопления спектра микросейсмического поля. Расстояния между точками выдерживались примерно 500 м. Регистрация в каждой точке профиля длилась не менее 2 часов, что определялось временем достижения статистической устойчивости спектра сигнала. Для исключения медленной трендовой составляющей в спектре зондирующего микросейсмического сигнала одновременно с измерениями вдоль профилей непрерывно работала опорная станция.

Методика

Для реконструкции глубинного строения среды использовался метод микросейсмического зондирования [4, 5], в котором в качестве зондирующих сигналов выступают поверх-

ностные рэлеевские волны различных частот, определяющие основной вклад в вертикальную компоненту микросейсмического поля Земли. Геологические структуры, представляющие собой скоростные неоднородности, взаимодействуют с падающими рэлеевскими волнами (имеет место преломление, обмен, рассеяние), и, соответственно, искажают в своей окрестности амплитудный спектр микросейсмического поля. На поверхности Земли над высокоскоростными неоднородностями спектральные амплитуды определенной частоты f уменьшаются, а над низкоскоростными неоднородностями возрастают. Установлено экспериментально и в модельных расчетах, что частота f связана с глубиной залегания неоднородности H и скоростью фундаментальной моды волны Рэля $V_R(f)$ соотношением $H = 0.4V_R(f) / f$. Метод реализован в виде принципиально новой технологии микросейсмического зондирования глубинных (до 40–50 км) структур земной коры. Технология прошла успешное тестирование на геологических объектах различного масштаба и генезиса [5].

Горизонтальное разрешение метода оценивается величиной 4% от длины зондирующей волны, или, соответственно, 10% от глубины залегания неоднородности. Вертикальное разрешение оценивается как 15% от глубины залегания.

Аппаратура

Для регистрации использовались портативные широкополосные цифровые велосиметры Guralp CMG-6TD, одновременно сочетающие в себе функции сейсмического датчика и цифрового регистратора. Цифровые данные, полученные на выходе трехкомпонентного блока сейсмоприемников, могут передаваться во внешнюю систему регистрации или сохраняться на встроенной флэш-карте памяти. Основные технические характеристики Guralp CMG-6TD: частотный диапазон от 0.03 до 100 Гц; чувствительность 2×1200 В/м/с; 3-канальный 24-разрядный АЦП; частота оцифровки: до 200 отсч./сек.; встроенная флэш-карта 2–16 Гб; дополнительные функции: Wi-Fi, Ethernet. Точная временная привязка информации обеспечивается благодаря GPS-приемнику, связанному с CMG-6TD через коммутационный блок. Управление сейсмометром осуществляется с помощью портативного компьютера. Электропитание осуществлялось от аккумулятора.

Результаты и их интерпретация

На рис. 2 представлены полученные в результате расчетов вертикальные разрезы, отражающие распределение относительных скоростей поперечных сейсмических волн. Изображения, построенные для профилей **II** (северная часть) и **II-а**, демонстрируют хорошую согласованность результатов, что свидетельствует об их достоверности. Ниже отмечены и проинтерпретированы видимые особенности разрезов (нумерация соответствует визуально выделенным объектам на рис. 2).

1. В первую очередь остановимся на верхней части разреза (верхняя часть рис. 2). Рассмотрим профиль **I**, проходящий вкост Долины гейзеров и восточного борта депрессии. Полученное распределение скоростей для глубин до 1 км детально отражает основные черты сложного контрастного геологического разреза восточной части структуры. С запада на восток прослеживаются:

- высокоскоростная зона **1а**, которая ввиду ее приуроченности к экстрезии г. Белой (рис. 1) может быть интерпретирована, как затвердевший лавовый массив, перекрытый озерными отложениями под западным окончанием профиля **I**;

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПОД РАЙОНОМ УЗОН-ГЕЙЗЕРНОЙ ВУЛКАННО-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ДЕПРЕССИИ МЕТОДОМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

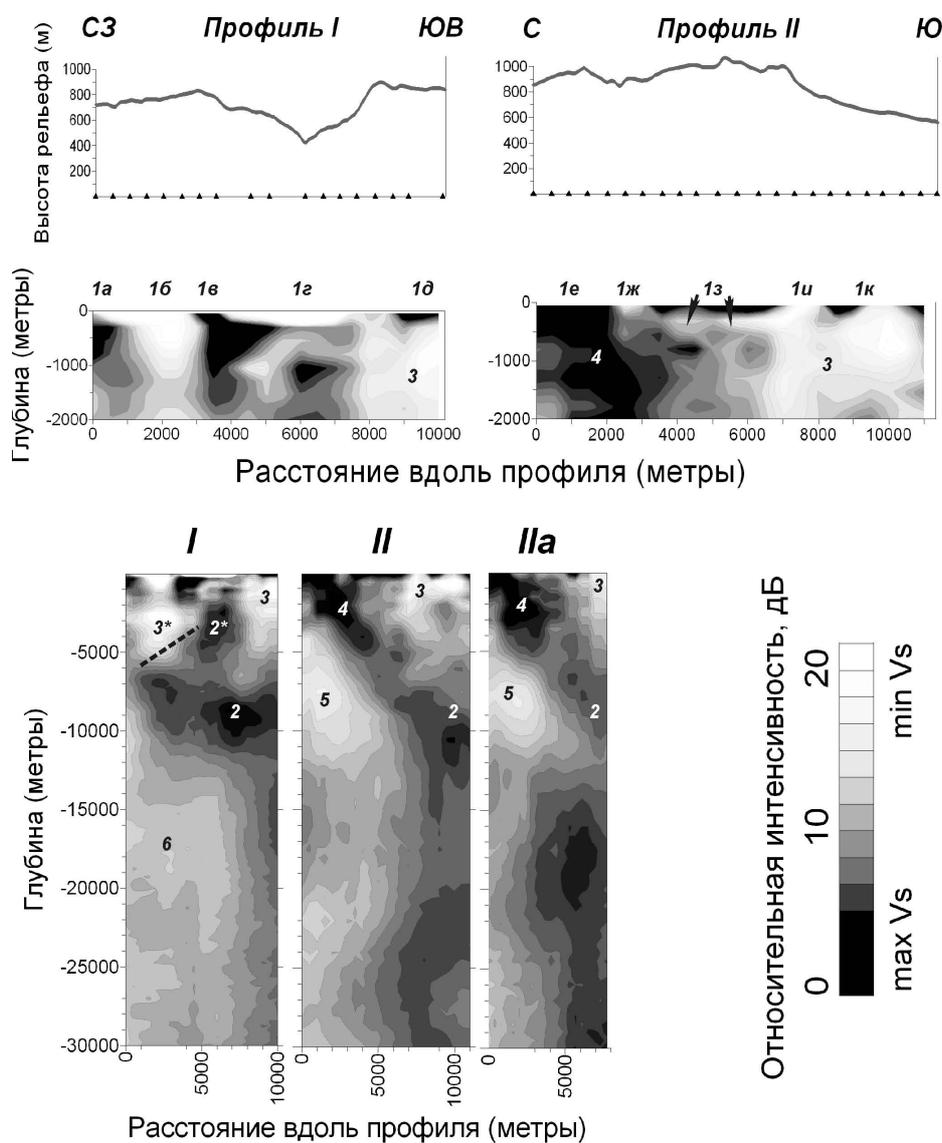


Рис. 2. Вертикальные разрезы, отражающие распределение относительных скоростей сейсмических волн по глубине вдоль микросейсмических профилей (с элементами интерпретации). Вверху – верхняя часть разрезов вдоль профилей I и II до глубины 2 км и графики высот измерительных пунктов. Внизу – разрезы вдоль профилей I, II, IIa до глубины 30 км. На профиле I пунктирной линией отмечено возможное положение области внедрения магмы. 1 – геологические элементы верхней части разреза (их описание приведено в тексте); 2 – связанные между собой части предположительно закристаллизовавшегося верхнекорового магматического очага; 3 – блоки нерасчлененных отложений докальдерного комплекса (вулканогенно-осадочный чехол); 4 – пути распространения магмы по системе субширотных разрывных нарушений, контролируемых региональным Узон-Валагинским разломом; 5 – периферический очаг, питающий голоценовые базальтоидные извержения Кихпиньчского вулканического центра; 6 – область скопления базальтовых расплавов в результате экранирующей роли кислого интрузива 2, расположенного выше.

- низкоскоростная зона озерных отложений **1б** в центральной части депрессии,
- высокоскоростная зона **1в**, совпадающая с областью вышедших на поверхность и скрытых озерными отложениями экструзий в восточной части депрессии;
- низкоскоростная зона **1г** – Долина Гейзеров, заполненная обводненными и гидротермальноизмененными озерными отложениями;
- высокоскоростная зона **1д** – восточный борт депрессии.

Отчетливо выделяется вертикальная граница между зонами **1г** и **1д**, совпадающая с восточным бортом (кольцевым разломом) депрессии и иллюстрирующая неоднородность свойств среды в зоне прорыва на поверхность лав бортового комплекса на этапе формирования депрессии в верхнем плейстоцене. Отметим, что выделенная граница соответствует зоне формирования оползня 03.06.2007.

Рассмотрим верхнюю часть разреза по профилю **II**, проходящего вдоль восточного борта депрессии. С севера на юг выделяются:

- высокоскоростная зона **1е**, пространственно связанная с базальтовым вулканом Старый Кихпиныч;
- низкоскоростная зона **1ж**, совпадающая с областью Кихпинычских термальных полей;
- отмеченная стрелками залегающая под зоной **1з** узкая субгоризонтальная низкоскоростная зона, которую мы предположительно связываем с водоносным комплексом термальных вод Гейзерной гидротермальной системы [15] и вмещающими его трещиноватыми лавами и туфами докальдерных образований;
- низкоскоростная зона **1и** пространственно совпадает с зоной формирования оползня 03.06.2007 г. и, возможно, является результатом паро-гидротермальной переработки массива горных пород восходящим потоком паровой фазы глубинного теплоносителя [7];
- зона **1к** – южный склон Горного плато, чередование пород посткальдерного и докальдерного комплексов.

Столь высокая согласованность результатов микросейсмического зондирования с геологическим строением этого участка подтверждает достоверность метода и возможность его использования для исследования аналогичных сложных структур в районах активного вулканизма и гидротермальной активности.

2. Высокоскоростные элементы, выделенные на разрезах под номером **2**, интерпретируется нами как связанные между собой части верхнекорового магматического очага, по геологическим данным существующего в недрах под депрессией предположительно с нижнечетвертичного времени и находящегося в стадии закристаллизации [3, 8, 11, 12]. Глубина залегания его основной части соответствует границе кристаллического фундамента и толщи слабопроницаемых вулканогенно-осадочных пород, проходящей под Узон-Гейзерной депрессией на глубине 6–7 км [13]. Положение очага в конце средне-верхнечетвертичного времени фиксируется выходами системы дуговых даек на поверхность; по геолого-структурным данным его размеры и глубина залегания составляли в 7–8 и 10 км, соответственно [8]. Пространственное ограничение очага с севера и запада согласуется с расположением центров извержений кислых магм на посткальдерном этапе развития структуры [3, 11]. Наши результаты не противоречат имеющимся геологическим представлениям

и подтверждают предположения о том, что обширный кислый очаг под депрессией к настоящему времени полностью закристаллизовался и представляет собой интрузив сложной формы, проявляющийся на разрезе как наиболее высокоскоростная область. На разрезе вдоль профиля **I** интрузивный комплекс **2** имеет тенденцию к воздыманию под районом Долины Гейзеров. Его восходящая часть (**2***) связана с полем позднеплейстоценовых экструзий **1в** (последних проявлений кислого вулканизма в пределах депрессии), и, возможно, она являлась зоной питания этих вулканических аппаратов. Расположение зоны **2*** непосредственно под Долиной Гейзеров (**1б**) позволяет предположить, что именно этот периферический очаг связан с процессом формирования в восточной части Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии Гейзерной кальдеры – наиболее древней части депрессии, возраст которой, по последним данным, оценивается в 80 тыс. лет [10].

3. Низкоскоростные зоны **3** мы рассматриваем как нерасчлененные отложения докальдерного комплекса (вулканогенно-осадочный чехол). По геологическим данным в верхней части разреза это преимущественно лавы базальтового, андезитового, дацитового, риодацитового состава.

4. Под северной частью профилей **II**, **II-а** выделяется еще одна высокоскоростная область **4**, которая выходит на дневную поверхность в зоне субширотных разрывных нарушений, простирание которых соответствует Узон-Валагинскому глубинному региональному разлому. Эта система прослеживается на поверхности (как в пределах депрессии, так и на вулкане Кихпиньч) серией сбросов с опущенным южным крылом, амплитуда вертикальных смещений по которым достигает 50–70 м, а длина – 3–4 км [8]. Вероятно, субширотные сбросы играют большую структурообразующую роль: именно они в основном сформировали уступ северного ограничения Узон-Гейзерной депрессии, и именно по системе субширотных сбросов произошло внедрение магмы в период последней вулканической активизации в восточной части депрессии. Мы предполагаем, что зона **4** отражает пути распространения магмы по системе субширотных разрывных нарушений, контролируемых региональным Узон-Валагинским разломом, который в четвертичное время проявляет себя как структура растяжения.

5. Низкоскоростная зона **5**, выделяемая на профилях **II**, **II-а** в диапазоне глубин 5–10 км, может интерпретироваться как область с повышенной концентрацией базальтовой магмы, являющаяся, возможно, периферическим очагом, питавшим голоценовые базальтоидные центры извержений Кихпиньчского вулканического центра (рис. 1) [1, 9]. В пользу этого предположения говорит ярковыраженная бимодальность проявления вулканизма (кислого и основного) на посткальдерном этапе развития Узон-Гейзерного кальдерного комплекса с одновременным развитием разобщенных в пространстве риодацитов и базальтоидов. Глубина формирования очага **5** (как и интрузива **2**) соответствует границе кристаллического фундамента и вулканогенно-осадочного покрова. В соответствии с [11] именно близость базальтового очага наряду с кислым интрузивом, а также эпизодические инъекции базальтов обеспечивают длительное существование Гейзерной гидротермальной системы и ее тепловое питание.

6. На разрезе вдоль профиля **I** в диапазоне глубин 15–20 км выделяется крупная низкоскоростная зона **6** (возможно, магматическая камера) непосредственно под интрузивом. Ее формирование может быть связано с невозможностью свободного распространения магмы к поверхности из-за экранирующей роли закристаллизовавшегося кислого очага **2**.

Сопоставление выделенных структур с результатами InSAR

Сопоставим структуры, выделенные нами в верхней части земной коры, с результатами спутниковой интерферометрии (InSAR) [16]. По [16] в 2000–2003 гг. в районе восточного борта Узон-Гейзерной депрессии зафиксировано поднятие примерно на 15 см (в 1999, 2004 г. движений поверхности не выявлено). В результате математического моделирования в качестве глубинного источника, обеспечивающего наилучшее согласование с выявленной поверхностной деформацией, предложена модель наклонного магматического тела (силла, плоского источника) неправильной формы на глубине 4–8 км, заглубляющегося на северо-запад. Решение получено с использованием модельного набора взаимосвязанных трещин с максимальным раскрытием около 0.5 м при избыточном давлении 1.6 МПа. Отметим, что предложенная в [16] модель плоского источника является упрощением модели возможного объемного источника – расширяющейся магматической камеры. Максимальные рассчитанные глубинные подвижки сконцентрированы под центральной частью поля экструзий (**1в**) в восточной части депрессии. Эта область пространственно соответствует низкоскоростной зоне **3*** на разрезе **I**. В настоящее время нет никаких экспериментальных данных, указывающих на существование в этой области депрессии столь обширной близповерхностной зоны, насыщенной магматическим расплавом. Поэтому мы предполагаем, что имеет место внедрение магматического тела в нижней части зоны **3*** с возможным его продвижением к поверхности по наклонной границе тел **3*** и **2***. На рис. 2 возможное положение магматического новообразования отмечено пунктирной линией. Зона контакта интрузива **2*** и вмещающей вулканогенно-осадочной толщи **3*** представляется наиболее предпочтительным путем распространения магматического расплава в неоднородной среде. Областью магматического питания развивающегося силла может быть низкоскоростная зона **5** или другие более заглубленные источники (например, **6**), магма из которых поднимается по периферии закристаллизовавшегося кислого очага **2**.

Сопоставление геометрии обнаруженных глубинных структур с модельным источником деформации земной поверхности, выявленной по данным спутниковой интерферометрии, позволило определить форму области современного внедрения магмы как тонкий силл, распространяющийся по ослабленным зонам земной коры.

Заключение

Для реконструкции глубинной структуры среды применен метод низкочастотного микросейсмического зондирования, для чего проведено накопление спектра микросейсмического поля в широкой частотной полосе в 60–ти точках вдоль трех профилей общей длиной около 28 км. Построены глубинные разрезы земной коры до 30 км, отражающие распределения относительных скоростей поперечных сейсмических волн. Проведена их комплексная интерпретация с использованием известных ранее результатов геологических, геолого-морфологических, петрологических исследований. Идентифицирована и пространственно локализована область закристаллизовавшегося кислого очага под кальдерным комплексом на глубинах 6–10 км. Выявлены и локализованы предположительные области концентрации базальтовых расплавов. Отмечена высокая согласованность верхних частей полученных разрезов с геологией исследуемого района. Получено согласие геометрии обнаруженных глубинных структур с моделью внедрения магмы в верхние горизонты коры, предполагаемой по данным спутниковой интерферометрии. Подтверждена эффективность использования метода микросейсмического зондирования для исследова-

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ЗЕМНОЙ КОРЫ ПОД РАЙОНОМ УЗОН-ГЕЙЗЕРНОЙ ВУЛКАННО-ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ДЕПРЕССИИ МЕТОДОМ МИКРОСЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

ния сложных глубинных структур в районах активного вулканизма и гидротермальной активности.

Авторы выражают благодарность В.Л. Леонову за консультации и ценные замечания в ходе подготовки публикации. Неоценимую помощь при проведении наблюдений оказали И.Ф. Абкадыров, А.В. Патонин, А.А. Коновалова, Н.М. Кравченко. Участники работ благодарят администрацию Кроноцкого заповедника за интерес к исследованиям и поддержку в ходе организации работ. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-05-10067, 10-05-00139).

Список литературы

1. *Белоусов В.И.* Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 174 с.
2. *Брайцева О.А., Флоренский И.В., Волюнец О.Н.* Вулкан Кихпинич // Действующие вулканы Камчатки. Том 2. М.: Наука, 1991. С.74–93.
3. Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование. М.: Недра, 1974. 264 с.
4. *Горбатилов А.В., Ларин Н.В., Моисеев Е.И., Беляшов А.В.* // ДАН. 2009. Т. 428. № 4. С. 526–530.
5. *Горбатилов А.В., Степанова М.Ю., Кораблев Г.Е.* // Физика Земли. 2008, №7 с.66–84.
6. *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.
7. *Кирюхин А.В.* Исследования тепломассопереноса в высокотемпературных гидротермальных системах // Материалы Всероссийской научной конференции 22–27 сентября 2008 г. «100-летие Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908–1910 гг.». Петропавловск-Камчатский. ИВиС ДВО РАН. 2009. С. 140–149.
8. *Леонов В.Л.* Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с.
9. *Леонов В.Л.* Региональные структурные позиции высокотемпературных гидротермальных систем на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2001. № 5. С. 32–47.
10. *Леонов В.Л., Гриб Е.Н.* Кальдеры и игнимбриты Узон-Семячинского района, Камчатка: новые данные по результатам изучения разрез плато Широкое // Вулканология и сейсмология. 1998. №3. С.41–59.
11. *Леонов В.Л., Гриб Е.Н.* Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки. Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.
12. *Леонов В.Л., Гриб Е.К., Карнов Г.А. и др.* Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Действующие вулканы Камчатки. Том 2. М.: Наука, 1991. С.94–143.
13. *Мороз Ю.Ф.* Строение осадочно-вулканогенного чехла Камчатки по геофизическим данным // Тихоокеанская геология. 1991. №1. С.59–67.
14. *Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дроздин В.А. и др.* Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестник ДВО РАН. 2008. №1. С. 33–44.

15. *Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дроздин В.А., Карпов Г.А., Леонов В.Л.* Жемчужина Камчатки – Долина Гейзеров. Петропаловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.
16. *Lundgren P., Lu Zh.* Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // *Geophysical Research Letters*. 2006. VOL. 33, L06301, doi:10.1029/2005GL025181
17. *Pritchard M.E., Simons M.* Surveying Volcanic Arcs with Satellite Radar Interferometry: The Central Andes, Kamchatka, and Beyond // *GSA Today*. 2004. V.14, N.8, pp.4–11.