

УДК 550.34

ЛОКАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНА ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ ПО ДАННЫМ ПОЛЕВЫХ НАБЛЮДЕНИЙ 2008-2009 гг.

© 2010 Ю.А. Кугаенко, В.А. Салтыков, А.А. Коновалова

*Камчатский филиал Геофизической службы РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006;
e-mail: ku@emsd.ru*

В 2008-2009 гг. в районе Долины Гейзеров на Камчатке (Кроноцкий государственный природный биосферный заповедник) впервые проведены полевые сейсмологические наблюдения. На основании обнаружения большого числа землетрясений, не регистрируемых Камчатской региональной сетью, выявлена локальная сейсмическая активность низкого энергетического уровня. Представлены результаты исследования локальных землетрясений.

Ключевые слова: Камчатка, Долина Гейзеров, сейсмичность, землетрясение, вулкан Кихпинич.

ВВЕДЕНИЕ

Как геофизическая изученность, так и охват инструментальными наблюдениями вулканических объектов Камчатки характеризуется заметной неоднородностью. В районах Авачинской и Северной групп вулканов, которые традиционно являются объектом особого внимания камчатских ученых, развернуты достаточно плотные сейсмологические сети, что позволяет следить за активностью вулканов, вести мониторинг, оценивать вулканическую опасность, а также использовать сейсмологические данные для изучения глубинной структуры. В то же время наши представления об основной части районов проявления вулканической активности Камчатки, их строении, конфигурации вулканических аппаратов и гидротермальных систем ограничены геологическими данными. Это относится и к обширной территории Кроноцкого заповедника, включая уникальные природные комплексы - Долину Гейзеров и кальдеру Узон. Отсутствие базовых инструментальных (геофизических, геодезических, сейсмологических) наблюдений заставляет рассматривать район как все еще малоизученный.

Благодаря финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в 2008-2009 гг. удалось организовать первые полевые сейсмологические наблюдения в районе Долины Гейзеров, результаты которых представлены в данной статье.

Территория, известная как Долина Гейзеров, является частью Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии и представляет собой крутостенный каньон, пролегающий вдоль ее восточного борта, где сосредоточены разнообразные термальные источники, в том числе гейзеры. Узон-Гейзерная вулканотектоническая депрессия (рис. 1) относится к Восточно-Камчатскому вулканическому поясу и представляет собой вулканическую структуру овальных очертаний, вытянутую в широтном направлении, имеющую размеры по кромке ограничивающих ее уступов 9×18 км, образовавшуюся в результате слияния нескольких кальдерных структур над неглубоким магматическим очагом (Леонов, Гриб, 2004; Леонов и др., 1991). Последние проявления кислого вулканизма в пределах Узон-Гейзерной депрессии произошли 15-20 тыс. лет назад, что связано, по-видимому, с закристаллизацией значительной части верхнекорового магматического очага (Леонов и др., 1991). Далее на восток располагается сложный вулканический массив Кихпинич, который состоит из нескольких слившихся разновозрастных вулканических сооружений (Брайцева и др., 1991). Последнее извержение произошло 500-600 лет назад. По (Белюсов, 1978) территория вулканического массива Кихпинич и восточная часть Узон-Гейзерной депрессии, где сосредоточены позднеплейстоценовые экструзивные комплексы, относятся к Кихпиничскому долгоживущему вулканическому центру.

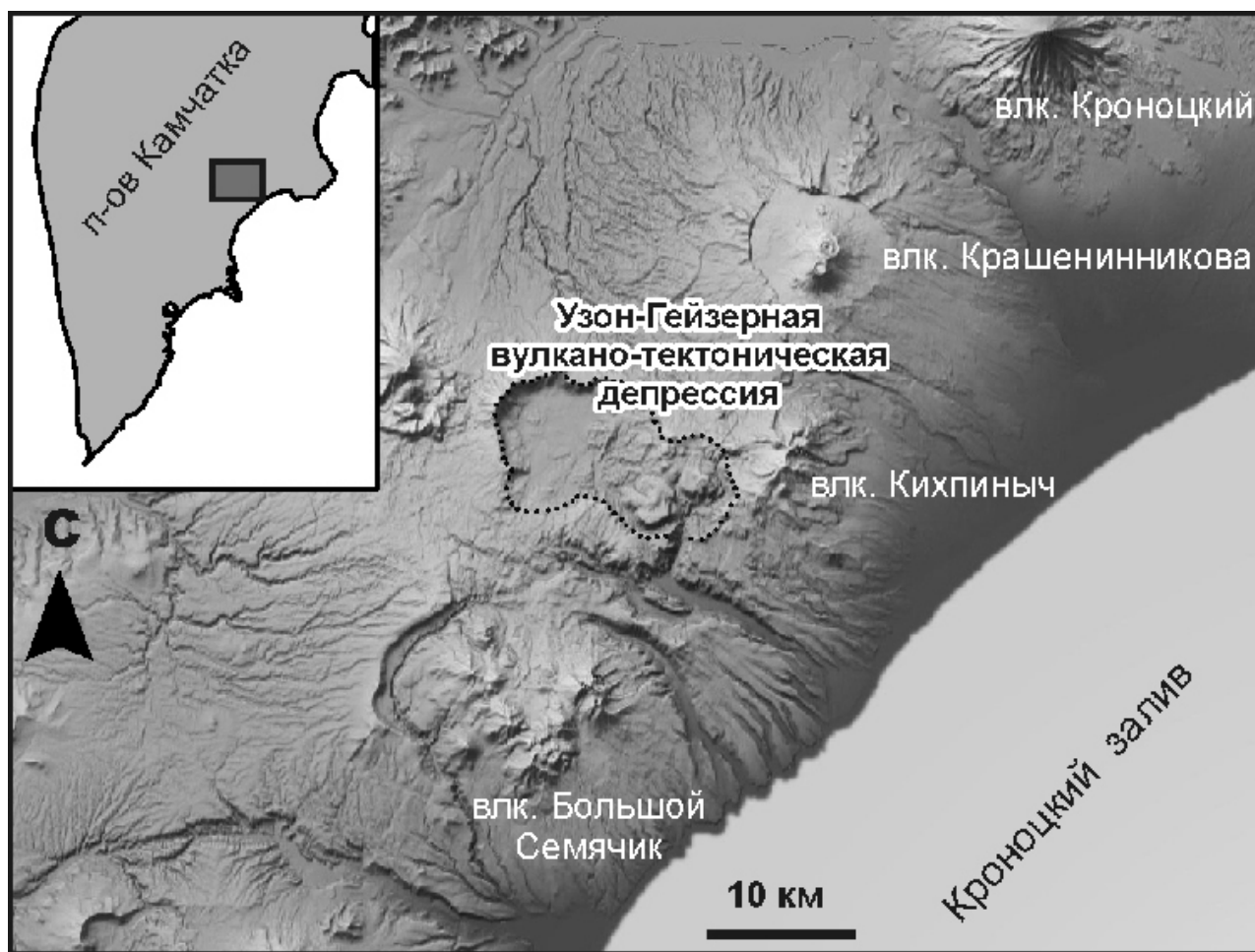


Рис. 1. Узон-Гейзерная вулканно-тектоническая депрессия в центральной части Восточной Камчатки.

В 1970-1990-х гг. в районе депрессии был выполнен большой объем геологических, петрологических и гидрогеологических работ, обобщенных в (Белоусов и др., 1983; Вулканизм..., 1974; Леонов, 1982, 1989, 2001; Леонов, Гриб, 2004; Леонов и др., 1991; Сугробов и др., 2009; и др.). Подробная библиография по этим вопросам представлена в (Леонов, 1989; Леонов, Гриб, 2004). Геофизическая изученность ограничивается среднемасштабным региональным геолого-геофизическим картированием магнитного и гравитационного поля Камчатки. Важным направлением исследований Долины Гейзеров явилась аэрофотосъемка, неоднократно проводившаяся с 1978 г. Последняя съемка была организована в июле 2007 г. для фиксации последствий катастрофических обвально-оползневых событий 03.06.2007 г. (Двигало, Мелекесцев, 2009). В последние годы ряд интересных результатов был получен по данным дистанционного зондирования Земли со спутников (Allen, 2007; Lundgren, Lu, 2006). Ведется разработка цифровой модели Долины Гейзеров на базе методов и подходов неогеографии (<http://www.valleyofgeysers.com/model.php>; http://www.scanex.ru/ru/news/News_Preview.asp?id=n22724113).

Как уже было сказано, постоянно действующие сейсмические станции и GPS-пункты в рассматриваемом районе все еще отсутствуют. Ближайшая сейсмическая станция Камчатской региональной сети «Карымский» расположена в районе одноименного вулкана на расстоянии около 70 км к югу от исследуемого района. В целом по камчатскому каталогу землетрясений для полосы суши восточное побережье – Срединный хребет, включая Узон-Гейзерную вулканно-тектоническую депрессию и вулкан Кихпинич, уровень надежной регистрации $K = 8.5-9.0$ (Гордеев и др., 2006). Класс соответствует энергетической классификации С.А. Федотова для курило-камчатских землетрясений (Федотов, 1972). При существующей конфигурации сети для исследуемого района $K = 7.5-8.0$, в то время как для Северной и Авачинской групп вулканов он достигает 3.5-4.0, что позволяет детально изучать сейсмический процесс на значительно более низком энергетическом уровне. Таким образом, имеющаяся информация о локальной сейсмичности в районе Долины Гейзеров будет неполной из-за его значительной удаленности от пунктов регистрации сейсмических сигналов.

В настоящее время территория Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии обладает особым статусом государственного биосферного заповедника, удалена от основной инфраструктуры полуострова, труднодоступна. Организация и проведение в этом районе первых локальных сейсмологических наблюдений является заметным научным событием и источником информации для формирования новых знаний и представлений о современной геодинамической обстановке.

ДОЛИНА ГЕЙЗЕРОВ И РЕГИОНАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ

В соответствии с вероятностной картой общего сейсмического районирования ОСР-97-А (Страхов и др., 1998) Узон-Гейзерная вулcano-тектоническая депрессия относится к зоне, где интенсивность колебаний в результате сильных землетрясений может достичь 9 баллов по шкале MSK-64. Это означает, что колебания с указанной интенсивностью могут произойти с вероятностью 10% в течение 50 лет (средний период повторения – 500 лет). За последнее столетие Долина Гейзеров три раза испытывала сотрясения с интенсивностью 7-8 баллов (1923, 1927, 1959 гг.) и три раза – с интенсивностью 6 баллов (1952, 1971, 1997 гг.) по шкале макросейсмической интенсивности MSK-64. Эти сотрясения были связаны с сильнейшими за годы инструментальных наблюдений региональными землетрясениями с магнитудами $M = 7.5-9$, которые произошли вдоль восточного побережья Камчатки (Гусев, 2006).

Основное количество землетрясений, происходящих на Камчатке, сосредоточено в сейсмофокальной зоне, наклонно уходящей под полуостров. Под Долиной Гейзеров сейсмофокальная зона находится на глубине 120-140 км. Западная граница мелкофокусных субдукционных землетрясений проходит по полуостровам восточного побережья. Непосредственно под сушей Камчатки поверхностных землетрясений происходит значительно меньше, чем в сейсмофокальной зоне. По данным Камчатской региональной сейсмологической сети, району Узон-Гейзерной вулcano-тектонической депрессии присуща локальная мелкофокусная сейсмическая активность низкого энергетического уровня (Кугаенко, 2008). В силу ограниченных технических возможностей региональной сети регистрируются только наиболее сильные землетрясения. За время детальных сейсмологических наблюдений, которые начаты на Камчатке в 1961 г., из этого района был зафиксирован ряд поверхностных землетрясений, максимальное из которых имело класс $K = 9.3$ и ощущалось в Долине Гейзеров как

«очень высокочастотное» (по сообщению очевидцев). Сообщения об ощутимых землетрясениях, поступающих со стационаров Кроноцкого заповедника, не всегда совпадают с данными каталога Камчатской сети сейсмических станций (Кугаенко, 2008). Это также свидетельствует о наличии в исследуемом районе источников сейсмической активности, которая достаточно интенсивно ощущается в местных условиях, но по своим энергетическим параметрам не регистрируется региональной сетью.

АППАРАТУРА

Проведение временных полевых сейсмологических наблюдений в наиболее интересных и геодинамически активных районах остается одним из важнейших направлений исследования сейсмичности. Ранее на Камчатке развитию этого вида наблюдений уделялось значительное внимание (Гордеев и др., 2004). Регистрация велась в основном на магнитную ленту. Со временем это оборудование устарело и пришло в негодность, а финансовые проблемы не позволяли обновить парк аппаратуры. В итоге на рубеже веков были прекращены временные полевые сейсмологические наблюдения на Камчатке.

В 2007-2009 гг. Камчатским филиалом Геофизической службы РАН приобретены современные портативные широкополосные цифровые сейсмометры CMG-6TD производства Guralp Systems Ltd. (www.guralp.com), которые составят основу временных полевых сейсмологических наблюдений на Камчатке в ближайшие годы (рис. 2). Цифровые сейсмометры Guralp CMG-6TD относятся к категории современных портативных широкополосных приборов со встроенной флэш-картой и одновременно сочетают в себе функции сейсмического датчика и цифрового регистратора. Основные технические характеристики:

- частотный диапазон: от 0.03 до 100 Гц;
- чувствительность: 2×1200 В/м/с;
- 3-канальный 24-разрядный АЦП;
- частота оцифровки: 100 отсч./с;
- встроенная флэш-карта: 2 Гб;
- срок автономности по емкости памяти флэш-карты: 20 суток;
- дополнительные функции: Wi-Fi, Ethernet.

Широкий частотный диапазон частот обеспечивается благодаря применению современной технологии форс-балансных датчиков с петлей обратной связи. Встроенный цифровой преобразователь с высокой точностью конвертирует полученные на выходе датчиков сигналы в цифровые данные, которые могут передаваться во внешнюю систему регистрации или сохраняться на встроенной флэш-карте

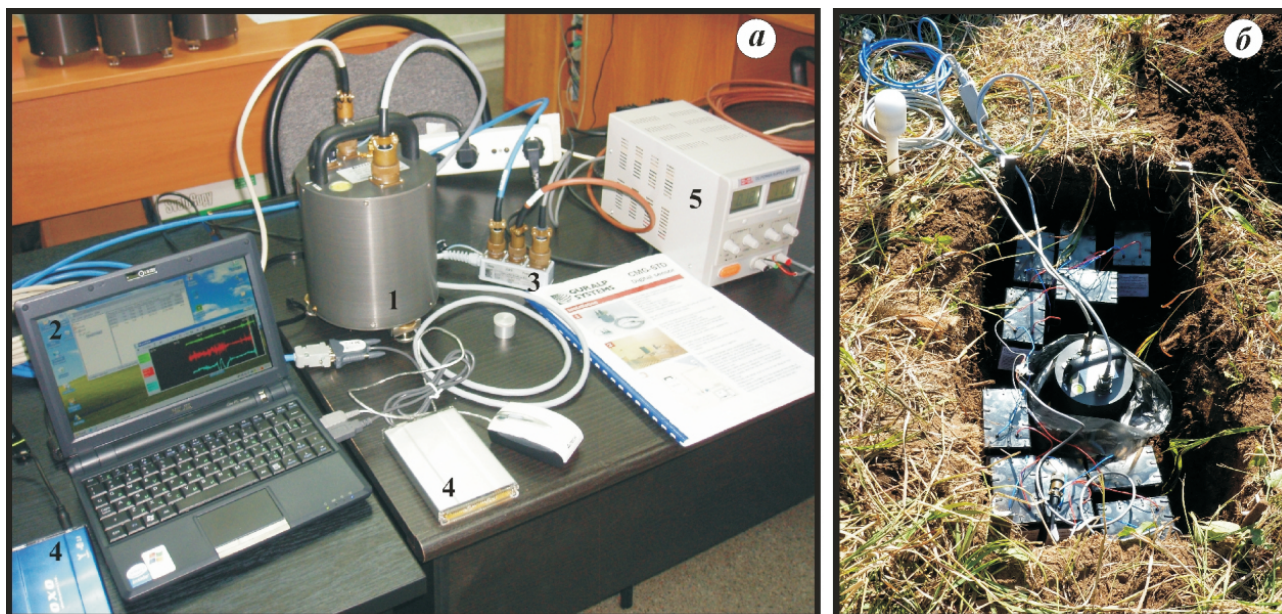


Рис. 2. Сейсмометры Guralp CMG-6TD: *а* – лабораторные испытания: 1 – сейсмометр, 2 – портативный компьютер для полевого обслуживания сейсмометра, 3 – коммутационный блок, 4 – внешний цифровой накопитель для скачивания данных из внутренней памяти сейсмометра, 5 – лабораторный блок питания сейсмометра; *б* – полевые работы: сейсмометр CMG-6TD установлен в сейсмояму в окружении батарей питания и подготовлен для автономной регистрации. Далее аппаратура будет закрыта защитной металлической крышкой и засыпана землей. GPS-антенна (вверху снимка, слева) останется снаружи.

памяти. Точная временная привязка информации обеспечивается благодаря GPS-приемнику, связанному с CMG-6TD через коммутационный блок. Управление сейсмометром осуществляется с помощью портативного компьютера.

СИСТЕМА НАБЛЮДЕНИЙ

Вопрос об организации в районе Долины Гейзеров полевых сейсмологических исследований начал рассматриваться в 2007 г. после катастрофического оползня, изменившего ландшафт этого всемирно известного природного комплекса. Имеются сведения, что в последние дни перед катастрофой в Долине Гейзеров ощущались слабые сейсмические толчки (Пинегина и др., 2008), данные о которых отсутствуют в региональном каталоге землетрясений. Как региональные, так и локальные сейсмические события являются факторами, повышающими вероятность развития процессов склоновой неустойчивости.

Рекогносцировочная кратковременная регистрация одной станцией, которая была установлена в центральной части Долины Гейзеров, проведена в декабре 2007 г. (Кугаенко и др., 2007). Были зарегистрированы первые слабые локальные землетрясения, не фиксируемые региональной сетью, что явилось обоснованием для организации дальнейших полевых исследований.

В 2008 г. в районе Долины Гейзеров был разбит полевой сейсмологический полигон (рис. 3, табл.),

наблюдения на котором были продолжены и в 2009 г. Станции локальной сети работали в автономном режиме. Базовая станция сейсмической группы («Долина Гейзеров») располагалась в центральной части Долины. Остальные точки были вынесены на борта каньона. Наиболее удаленный пункт наблюдений («Долина Смерти») был установлен в верховьях реки Гейзерной, у западного подножья вулканического массива Кихпиныч (рис. 3, 4).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Основным результатом полевых сейсмологических наблюдений в районе Долины Гейзеров в 2008–2009 гг. стало выявление локальной сейсмической активности на основании обнаружения большого числа землетрясений низкого энергетического уровня ($K = 3-7$), не регистрируемых региональной сетью (рис. 4). Записи землетрясений характеризуются четкими вступлениями продольных и поперечных волн, что позволяет рассматривать зарегистрированные события как тектонические.

В 2009 г. число зарегистрированных сейсмических событий было значительно больше, чем в полевом сезоне 2008 г. Глубина землетрясений не превышала 5 км. Наиболее глубокие из зарегистрированных событий располагаются под зоной экструзий в восточной части депрессии. Наибольшее число сейсмических событий связано с областью гидротермальных проявлений запад-

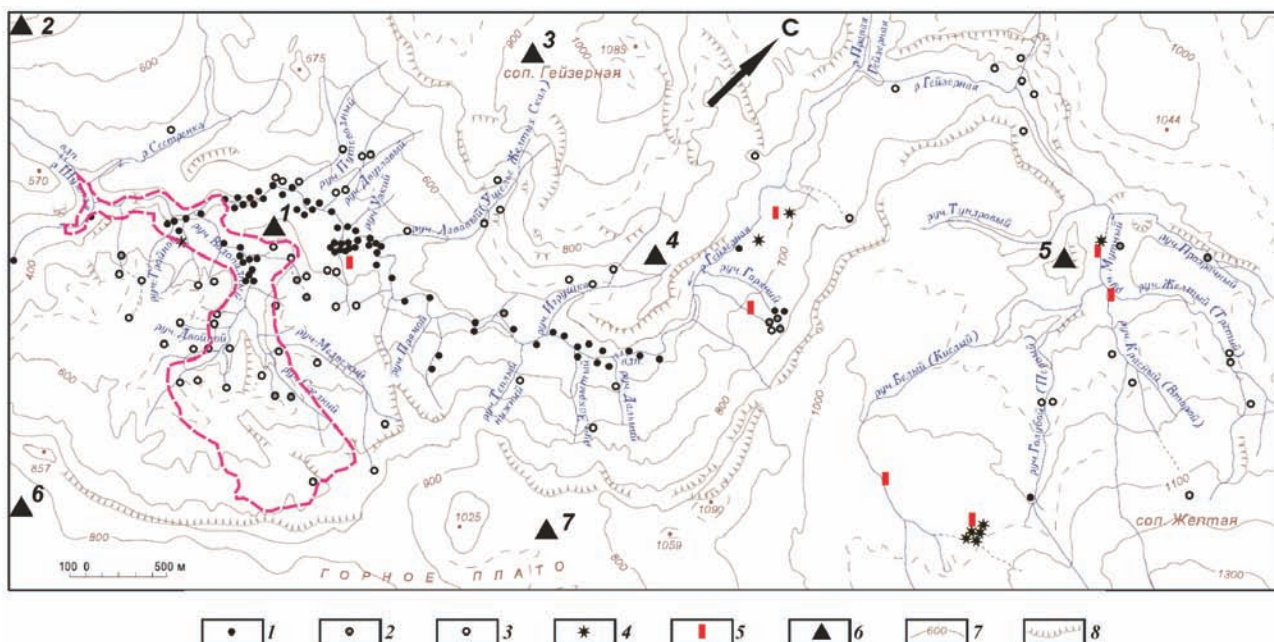


Рис. 3. Схема сейсмологического полигона в районе Долины Ге́йзеров. В качестве основы использована обзорная карта района Долины Ге́йзеров (Сугробов и др., 2009) по состоянию до геологической катастрофы — оползня, произошедшего 03.06.2007 г.: 1 — геи́зеры, кипящие и горячие источники (температура более 70°C); 2 — горячие и теплые источники (температура 20-70°C); 3 — источники с температурой воды менее 20°C; 4 — горячие грязевые и водяные котлы; 5 — парогазовые струи; 6 — временные сейсмические станции; 7 — изолинии рельефа; 8 — обрывы, уступы бортов долины р. Ге́йзерная. Границы оползня, произошедшего 03.06.2007 г., околтурены пунктирной линией. Информация о временных сейсмических станциях приведена в таблице.

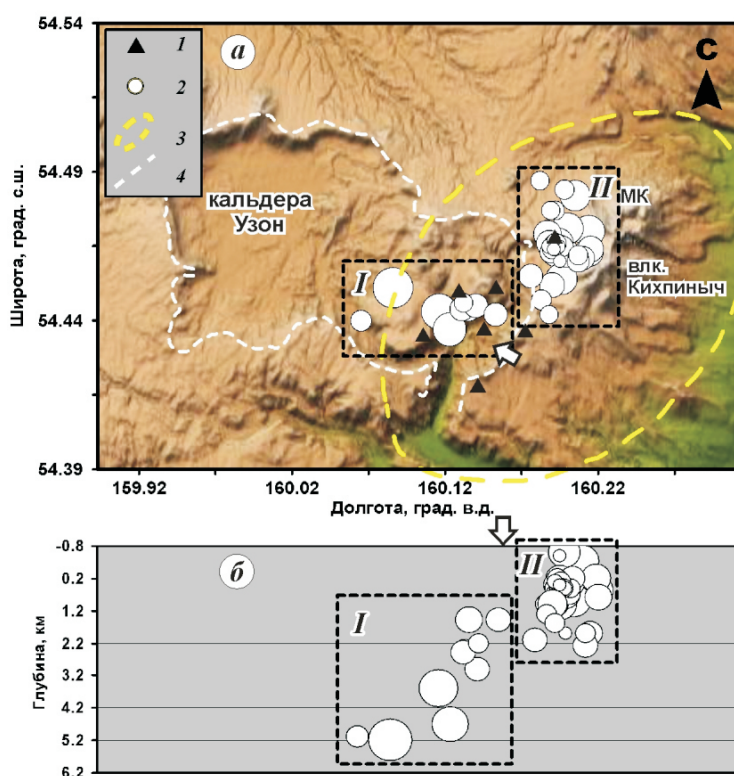


Рис. 4. Локальная сейсмичность района по данным полевых наблюдений 2008-2009 гг.: *а* — карта эпицентров, *б* — вертикальный широтный разрез; *I* — временные сейсмические станции; 2 — эпицентры локальных землетрясений ($K = 4\div 7$); 3 — граница Кихпиничского долгоживущего вулканического центра; 4 — эрозивный уступ, ограничивающий Узон-Ге́йзерную депрессию. Стрелкой отмечен район формирования катастрофического оползня 03.06.2007 г. МК — вулкан Молодой Кихпинич, относящийся к Кихпиничскому вулканическому комплексу. Группы землетрясений *I, II* описаны в тексте.

ЛОКАЛЬНАЯ СЕЙСМИЧНОСТЬ РАЙОНА ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ

Информация о временных сейсмических станциях. Местоположение станций показано на рис. 3.

Название станции	Координаты	Описание места установки
1 «Долина Гейзеров»	54.4355° с.ш. 160.1352° в.д. Н = 526 м	Кордон «Долина гейзеров». Водораздел р. Гейзерная и руч. Водопадный. Безымянная возвышенность. У склона каньона над озером, образовавшимся после схода оползня. На склоне – многочисленные парящие термопроявления. Грунт: почвенно-пирокластический чехол. Подстилающие породы: озерные отложения позднеплейстоценового возраста (мощностью более 100 м).
2 «Круглое плато»	54.4328° с.ш. 160.1018° в.д. Н = 876 м	Плато Круглое. Лавовый поток, связанный с экструзивным куполом позднеплейстоценового возраста. Ландшафт: верхняя тундра с кустарниками. Грунт: почвенно-пирокластический чехол. Подстилающие породы: лавы риолитового состава (мощностью около 100 м).
3 «Медвежья»	54.4491° с.ш. 160.1279° в.д. Н = 861 м	Сопка Гейзерная. Лавовый поток, связанный с экструзивным куполом позднеплейстоценового возраста. Ландшафт: верхняя тундра с кустарниками. Грунт: почвенно-пирокластический чехол. Подстилающие породы: лавы риолитового состава (мощностью около 100 м).
4 «Игрушка»	54.4540° с.ш. 160.1562° в.д. Н = 840 м	К востоку от экструзивного купола сопки Гейзерная. Ландшафт: верхняя тундра с кустарниками. Грунт: почвенно-пирокластический чехол. Подстилающие породы: озерные отложения позднеплейстоценового возраста (мощностью более 100 м).
5 «Долина Смерти»	54.4681° с.ш. 160.1877° в.д. Н = 942 м	Кордон «Долина смерти». Верховье р. Гейзерная. Западный склон вулканического массива Кихпинич. Лавовый поток позднеплейстоценового возраста, связанный с экструзивным куполом соп. Желтая (влк. Кихпинич). Ландшафт: верхняя тундра. Грунт: почвенно-пирокластический чехол. Подстилающие породы: лавы риолитового состава (30 м).
6 «Горное плато»	54.4140° с.ш. 160.1341° в.д. Н = 776 м	Юго-восточный борт Узон-Гейзерной депрессии. Ландшафт: верхняя тундра с кустарниками. Грунт: почвенно-пирокластический чехол с камнями. Подстилающие породы: нерасчлененные отложения докальдерного комплекса (преимущественно лавы и туфы андезитового и дацитового состава). Мощность – более 400 м.
7 «Борт кальдеры»	54.4368° с.ш. 160.1736° в.д. Н = 995 м	Восточный борт Узон-Гейзерной депрессии. Уступ депрессии в 100 м к северо-западу от станции. Ландшафт: верхняя тундра. Грунт: почвенно-пирокластический чехол. Подстилающие породы: - нерасчлененные отложения докальдерного комплекса (преимущественно лавы и туфы андезитового и дацитового состава). Мощность – более 200 м.

ной части вулканического массива Кихпинич. В период наших наблюдений действующий вулкан Молодой Кихпинич, относящийся к Кихпиничскому вулканическому комплексу (рис. 4), сейсмической активности не проявил.

На рис. 4 представлены эпицентры землетрясений, зарегистрированных при полевых работах в 2008-2009 гг., которые определены по данным не менее трех полевых сейсмических станций. При этом выделяются две группы событий.

События группы I немногочисленны. Они попадают в диапазон глубин 1-5 км, погружаясь от Долины Гейзеров на запад, под зону экструзивных куполов в восточной части депрессии, где был выделен последний центр извержения кислых лав (возраст прорыва – 15-20 тыс. лет).

Наклонная плоскость, очерченная гипоцентрами группы I, выходит на дневную поверхность в районе бортового уступа кальдеры, в зоне формирования катастрофического оползня 03.06.2007.

Группа II пространственно связана с западной частью вулканического комплекса Кихпинич и захватывает диапазон глубин до 2 км. На рис. 4 нанесены эпицентры 54 событий группы II. Кроме этого, станцией 5 («Долина Смерти») зафиксировано еще более 100 слабых землетрясений. Они имеют $T_s-p < 1$ с, сконцентрированы в окрестностях станции и относятся к группе II. Распределение локальных землетрясений, зафиксированных станцией 5, по T_s-p представлено на рис. 5. Следует отметить, что

землетрясения группы II происходят в области современных гидротермальных проявлений, однако по характеру записей они относятся к тектоническим, с четкими вступлениями объемных волн. Сейсмичность этой зоны неравномерно распределена во времени и носит роевой характер (рис. 5). Примерно половина событий, отнесенных к группе II, произошла в течение одних суток, разбившись на менее существенные рои. Роевой характер сейсмичности говорит о том, что мы имеем дело не с отдельными единичными событиями, а с объединением слабых землетрясений в группы зависимых событий, имеющих единый спусковой механизм. Возможно, здесь проявляется активность зоны питания гидротермальных проявлений, связанная в восходящими потоками флюида в недрах вулкана Кихпиныч. Эта проблема требует дальнейшей проработки и организации более длительной регистрации сейсмичности в комплексе с измерениями газового состава термопроявлений.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Эпицентры землетрясений (рис. 4) расположены компактно и в основном попадают под восточную часть Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии и вулканический массив Кихпиныч. Анализ распределения гипоцентров локальных землетрясений в пространстве показал, что оно хорошо согласуется с глубинной моделью источника поверхностной деформации, которая была разработана в (Lundgren, Lu, 2006) по данным SAR-интерферометрии (предложенная в этой публикации модель новообразования — наклонное магматическое тело неправильной формы на глубине 4-8 км с заглублением на северо-запад). Выявленные нами землетрясения не разбросаны случайным образом, а сосредоточены в двух пространственно раз-

общенных группах событий, связанных с областями максимальных модельных глубинных подвижек, рассчитанных в (Lundgren, Lu, 2006). Это позволяет рассматривать зарегистрированные сейсмические события как одно из проявлений активности Кихпинычского долгоживущего вулканического центра.

Обсудим полученные в ходе полевых работ данные о микросейсмичности в контексте их влияния на развитие процессов склоновой неустойчивости. Сейсмические воздействия можно рассматривать как два независимых фактора, влияющих на процессы формирования и развития оползнеобразования.

1. *Каждое отдельно взятое землетрясение.* Время воздействия — от нескольких секунд до нескольких десятков минут. В течение этого времени сейсмические колебания способствуют механическому разрушению склона. Кроме прямого воздействия сейсмических ускорений на величину сил, вызывающих разрушение, колебания грунта могут способствовать понижению его прочности вдоль поверхности, где проявляется сопротивление скольжению. Динамическая прочность некоторых материалов на сдвиг значительно меньше, чем статическая. При наличии водонасыщенного слоя, отделяющего тело оползня от основного массива, при циклическом деформационном воздействии возможен локальный эффект разжижения грунта. Возможен триггерный эффект единичного сейсмического события: землетрясение непосредственно инициирует сходжение оползня на склонах, состояние которых близко к неустойчивости.

2. *Региональный сейсмический процесс.* Влияет на развитие склоновой неустойчивости в течение всего времени формирования оползня: от нескольких лет до нескольких десятилетий и даже столетий. Оказывает деструктивное действие на склон: активизирует появление и

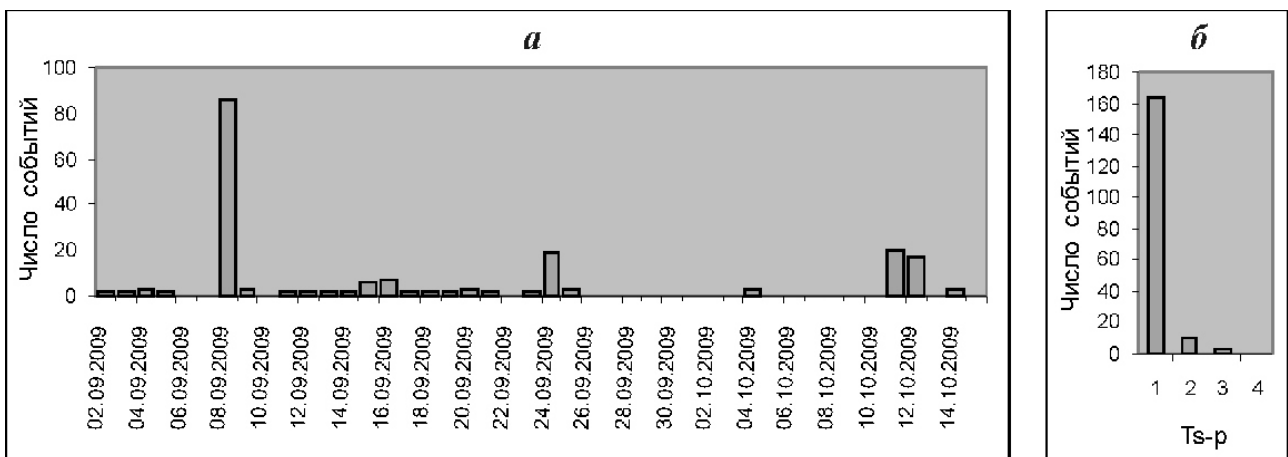


Рис. 5. Распределение землетрясений, зарегистрированных в сентябре-октябре 2009 г. станцией 5 (район Долины Смерти, западное подножье вулканического массива Кихпиныч) по времени (а) и по Ts-p (б).

рост трещин, меняет конфигурацию трещинно-порового пространства, что способствует постепенному прониканию холодных и геотермальных вод в массив горных пород. В зонах современных активных разломов при достаточно сильных землетрясениях возможны интенсивные деформации земной коры. Таким образом, сейсмические воздействия выступают начальным элементом «эффекта домино», обуславливая дальнейшую последовательность деструктивных событий.

Связь сейсмичности с основной причиной обрушения склона в Долине Гейзеров может рассматриваться в контексте многоступенчатого «эффекта домино» через цепочку последовательных изменений в массиве горных пород. Подготовка оползня начинается с формирования границы, отделяющей некоторый объем горной массы от массива. Формирование границы связано с локализацией сдвиговой деформации. Вдоль границы повышается пористость и проницаемость. В случае насыщения этой зоны водой сопротивление сдвигу резко снижается, что и вызывает оползень. Каждое сейсмическое воздействие повышает вероятность его возникновения, воздействуя на скрытые механизмы обводненности в основании тела оползня. Известна высокая чувствительность гидротермальных систем к сейсмическим воздействиям удаленных землетрясений (например, (Manga, Brodsky, 2006)). Непосредственно для Кихпиньчского долгоживущего вулканического центра попытки связать морфологические изменения в структуре термопроявлений с сейсмичностью проведены в работе (Карданова, Дубровская, 2005): предполагается, что характеристики поверхностных термопроявлений могут меняться при сейсмических воздействиях региональных землетрясений. Следовательно, внутренняя конфигурация Гейзерной гидротермальной системы тоже обладает чувствительностью к влиянию сейсмичности. В работе (Пинегина и др., 2008) сформулирована основная причина геологической катастрофы, произошедшей в Долине Гейзеров 03.06.2007 г.: эрозионные и нивальные процессы подрезки склона в сочетании с его ослаблением гидротермальной проработкой. В обрушение были вовлечены разогретые породы, слагавшие ранее горный массив. Авторам работы (Пинегина и др., 2008) наиболее вероятным представляется ослабление полускальных пемзовых грунтов (снижение коэффициента сцепления и угла внутреннего трения) за счет их пропаривания при скрытой разгрузке терм, рассмотренного в работе (Кирюхин, 2009). Еще в конце 1997 г. устойчивость склона, обрушившегося 03.06.2007 г., была достаточно, чтобы выдержать сотрясения с интенсивностью 6 баллов, вызванные Кро-

ночким землетрясением 05.12.1997 г. с $M_w = 7.8$ (Левина и др., 2003). Однако само обрушение произошло при отсутствии заметной сейсмической и тектонической активности как в районе Долины Гейзеров, так и в окрестностях. Это позволяет предположить, что условия на склоне все же изменились. Зафиксированные в ходе полевых работ локальные мелкофокусные землетрясения и поднятие восточного борта Узон-Гейзерной депрессии (Lundgren, Lu, 2006) свидетельствуют о скрытой эндогенной активности района, возможно, усилившейся в последнее десятилетие, что и привело к ускорившемуся развитию склоновой неустойчивости в Долине Гейзеров. К сожалению, пока в нашем распоряжении имеется мало данных для подтверждения этой гипотезы.

Регистрируемая Камчатской региональной сетью локальная поверхностная сейсмическая активность в районе Узон-Гейзерной депрессии за время детальных сейсмологических наблюдений (1961–2009 гг.) проявила себя только на достаточно низком энергетическом уровне: максимальный класс зафиксированных здесь событий $K = 9.3$. Нельзя исключить вероятность возникновения и более сильных локальных сейсмических событий как проявлений сложной тектоники и геодинамики района. При оценке риска оползнеобразования в Долине Гейзеров требуется учитывать не только долговременные вероятностные характеристики сейсмического процесса (карта общего сейсмического районирования), но и текущие локальные землетрясения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ранее не изученном геофизическими методами районе Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии проведены полевые сейсмологические наблюдения. На основании обнаружения большого числа землетрясений, не регистрируемых региональной сетью, подтверждена локальная сейсмическая активность низкого энергетического уровня.

Пространственное распределение гипоцентров локальных сейсмических событий согласуется с глубинной моделью источника поверхностной деформации, которая была разработана в (Lundgren, Lu, 2006) по данным SAR-интерферометрии.

Землетрясения не разбросаны случайным образом, а сосредоточены в двух пространственно разобщенных группах событий, связанных с Кихпиньчским вулканическим центром. Первая группа слабых землетрясений очерчивает структуру в земной коре, которая пространственно связывает область последних внутрикальдерных проявлений кислого вулка-

низма и бортовой уступ Гейзерной кальдеры, где сформировался оползень 03.06.2007 г. Вторая группа связана с зоной наиболее активных гидротермальных проявлений на западном склоне вулканического массива Кихпиныч. Это свидетельствует о продолжающемся развитии Кихпинычского вулканического центра.

Как известно, Узон-Гейзерная вулканотектоническая депрессия является частью объекта Всемирного природного наследия ЮНЕСКО «Вулканы Камчатки» и уже много лет активно используется коммерческими туристическими структурами: ежегодно Долину Гейзеров посещают около 3000–3500 туристов. В связи с этим не следует забывать, что район Долины Гейзеров остается одним из самых потенциально опасных на Камчатке из-за интенсивного развития в его пределах обвально-оползневых процессов, вероятность которых непредсказуемо возрастает в условиях активизации современных коровых движений и локальных землетрясений.

Наши знания об эндогенных процессах, протекающих в районе Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии и вулканического массива Кихпиныч, в том числе и о сейсмичности, носят фрагментарный характер. Результаты временных полевых сейсмологических наблюдений подтверждают необходимость организации в исследуемом районе постоянно действующей системы инструментальных наблюдений.

Исследования проводятся при финансовой поддержке РФФИ (гранты 07-05-02107, 08-05-10043, 09-05-10067, 10-05-00139). Авторы выражают благодарность В.Л. Леонову за консультационную помощь при планировании и проведении наблюдений и интерпретации геологических данных. Участники работ благодарят администрацию Кроноцкого государственного биосферного заповедника за всестороннюю поддержку в ходе подготовки и проведения полевых работ.

Список литературы

Белоусов В.И. Геология геотермальных полей в областях современного вулканизма. М.: Наука, 1978. 174 с.

Белоусов В.И., Гриб Е.Н., Леонов В.Л. Геологические позиции гидротермальных систем Долины Гейзеров и кальдеры Узон // Вулканология и сейсмология. 1983. № 1. С. 65–79.

Брайцева О.А., Флоренский И.В., Вольнец О.Н. Вулкан Кихпиныч // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 74–93.

Вулканизм, гидротермальный процесс и рудообразование / Под ред. С.И. Набоко. М.: Недра, 1974. 262 с.

Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И. и др. Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка // Вул-

канология и сейсмология. 2006. № 3. С. 28–38.

Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Левина В.И. и др. Система сейсмологических наблюдений // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: «Камчатский печатный двор», 2004. С. 11–42.

Гусев А.А. Сильнейшие землетрясения Камчатки: расположение очагов в инструментальный период // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 39–42.

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.

Карданова О.Ф., Дубровская И.К. Морфологические изменения на термальных полях Кихпинычского долгоживущего вулканического центра // Материалы ежегодной конференции, посвященной Дню вулканолога, 30 марта–1 апреля 2005 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2005. С. 59–69.

Кирюхин А.В. Исследования теплопереноса в высокотемпературных гидротермальных системах // Материалы Всероссийской научной «100-летие Камчатской экспедиции Русского географического общества 1908–1910 гг.». Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2009. С. 140–149.

Кугаенко Ю.А. Сейсмичность как фактор риска оползня 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров // Материалы конференции, посвященной Дню вулканолога, 27–29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 163–172.

Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А., Сеницын В.И. Сейсмические наблюдения в Долине Гейзеров // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2007. № 2. Вып. 10. С. 171–172.

Левина В.И., Гусев А.А., Павлов В.М. и др. Кроноцкое землетрясение 5 декабря 1997 года с $M_w = 7.8$, $I_0 = 8$ (Камчатка) // Землетрясения Северной Евразии в 1997 году. Обнинск: ГС РАН, 2003. С. 251–271.

Леонов В.Л. Разрывные нарушения Узон-Гейзерной депрессии // Вулканология и сейсмология. 1982. № 4. С. 78–83.

Леонов В.Л. Структурные условия локализации высокотемпературных гидротерм. М.: Наука, 1989. 104 с.

Леонов В.Л. Региональные структурные позиции высокотемпературных гидротермальных систем на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2001. № 5. С. 32–47.

Леонов В.Л., Гриб Е.Н. Структурные позиции и вулканизм четвертичных кальдер Камчатки.

- Владивосток: Дальнаука, 2004. 189 с.
- Леонов В.Л., Гриб Е.К., Карпов Г.А. и др.* Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Действующие вулканы Камчатки. Т. 2. М.: Наука, 1991. С. 94-143.
- Пинегина Т.К., Делемень И.Ф., Дрознин В.А. и др.* Камчатская Долина Гейзеров после катастрофы 3 июня 2007 г. // Вестник ДВО РАН. 2008. № 1. С. 33-44.
- Сугробов В.М., Сугрובה Н.Г., Дрознин В.А. и др.* Жемчужина Камчатки – Долина Гейзеров. Петропавловск-Камчатский: Камчатпресс, 2009. 108 с.
- Страхов В.Н., Уломов В.И., Шумилина Л.С.* Общее сейсмическое районирование территории России и сопредельных стран // Физика Земли. 1998. № 10. С. 92-96.
- Федотов С.А.* Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Allen J.* Landslide Buries Valley of the Geysers. NASA Earth Observatory. 2007 (http://earthobservatory.nasa.gov/NaturalHazards/natural_hazards_v2.php3?img_id=14313).
- Lundgren P., Lu Zh.* Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. P. L06301, doi:10.1029/2005GL025181
- Manga M., Brodsky E.E.* Seismic triggering of eruptions in the far field: volcanoes and geysers // Ann. Rev. Earth Plan. Sci. 2006. V. 34. P. 263-291.

LOCAL SEISMICITY WITHIN THE VALLEY OF THE GEYSERS: RESULTS FROM THE 2008-2009 FIELD INVESTIGATION

Yu.A. Kugaenko, V.A. Saltykov, A.A. Konovalova

*Kamchatkan Branch of Geophysical Survey of RAS, Petropavovsk-Kamchatsky, 683006;
e-mail: ku@emsd.ru*

In 2008-2009 for the first time the authors carried out seismological field investigation within the Valley of the Geysers, Kamchatka. The investigation resulted in detection of numerous earthquakes remained undetected by the Kamchatkan regional seismic network which allowed revealing a local seismic activity with low-lying level. The paper provides results in investigation of the local earthquakes.

Keywords: Kamchatka, the Valley of the Geysers, seismicity, earthquake, Kikhpinych Volcano.