

ПЕРВЫЕ ШАГИ К ОРГАНИЗАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДОЛИНЫ ГЕЙЗЕРОВ

Кугаенко Ю.А., Салтыков В.А.

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

Введение

Сейсмический мониторинг относится к технологиям уменьшения риска опасных природных явлений. Он базируется на организации сети непрерывных долговременных наблюдений на исследуемой территории. В современной трактовке мониторинг включает не только регистрацию, но и дальнейшую оперативную обработку и интерпретацию сейсмологических данных с выходом на прогнозные оценки. В зависимости от размеров охватываемой мониторингом территории он может подразделяться на уровни: мировой, региональный, локальный.

Особой актуальностью отличается организация сейсмического мониторинга в районах, обладающих высокой геодинамической активностью и высокой вероятностью проявления опасных природных процессов. Именно к таким регионам относится и Камчатка. На полуострове успешно функционирует разветвленная сеть региональных сейсмических станций, которая начала создаваться в 1961-1962 гг. Сеть неравномерна: наибольшую плотность она имеет в районах активных вулканов (Авачинская и Северная группы), которые традиционно являются объектом особого внимания камчатских ученых.

Район Долины Гейзеров значительно удален от пунктов ведения сейсмологических наблюдений. Ближайшей является сеймостанция в районе Карымского вулкана, расположенная в 70 км к югу. Имеющиеся данные по сейсмичности Долины гейзеров неполны, а отсутствие базовых инструментальных (геофизических, геодезических, сейсмологических) данных позволяет рассматривать район как малоизученный.

Подтверждением этому служат недавно опубликованные данные спутниковой интерферометрии (Lundgren et al., 2006) об активном поднятии примыкающего к Долине Гейзеров вулканического массива Кихпинич на 15 см в 2001-2003 гг. Также неожиданной для научной общественности явилась геологическая катастрофа – гигантский оползень 2007 г., изменивший привычный облик Долины (Пинегина и др., 2008).

Встает вопрос об организации в районе Долины Гейзеров современной системы комплексного локального сейсмического, геофизического, геодезического мониторинга. Это достаточно объемные, трудоемкие и дорогостоящие работы. Реализация такого проекта возможна лишь при наличии целевого финансирования и требует детальной предварительной проработки. Первыми шагами в этом направлении можно считать проведенные в 2007 и 2008 гг. сейсмологические наблюдения временными автономными сейсмическими станциями. Работы были выполнены в рамках экспедиционных проектов РФФИ.

Долина Гейзеров: геологическая обстановка

Долина Гейзеров – крутостенный каньон длиной около 4 км. Он проходит вдоль восточного края обширной Узон-Гейзерной вулкано-тектонической депрессии, представляющей собой сложную кольцевую структуру, наложенную на восточную грабен-синклиналь. Она рассматривается как крупный раздробленный блок сложного вулканического массива, обрушенного по кольцевому разлому. Депрессия, ограниченная хорошо сохранившимся кольцевым уступом, разделяется кислыми экструзивными куполами на две четко выраженные в рельефе впадины: западную – кальдеру Узон и восточную – Гейзерную. Глубина верхней кромки предполагаемого магматического очага под кальдерой и его диаметр оценены соответственно в 7-8 км и 10 км (Белоусов и др., 1983).

Узон-Гейзерная депрессия связана с узлом пересечения крупных разломов: магмо- и флюидопроводящего Вулканического раздвиг северо-восточного простирания и субширотного Узон-Валагинского глубинного сдвига. Выделена также сеть разломов, ориентированных по отношению к депрессии концентрически.

Над восточным бортом Узон-Гейзерной депрессии возвышается сложный разновозрастный вулканический массив Кихпиныч, который относится к активным вулканам Камчатки (Брайцева и др., 1991). Последняя активизация вулкана произошла менее 600 лет назад.

Для Узон-Гейзерной депрессии характерна активная гидротермальная деятельность как в прошлом, так и в настоящее время. В Долине Гейзеров, в узком ущелье кольцевого разлома, ограничивающего депрессию с востока, идет интенсивная разгрузка термальных вод. Предполагаемая область теплового питания Гейзерной гидротермальной системы – вулканический массив Кихпиныч (Леонов и др., 1991).

Долина Гейзеров в региональном поле сейсмичности

Основное количество землетрясений Камчатки 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 восточным полуостровам. Непосредственно под сушей Камчатки поверхностных землетрясений происходит значительно меньше, чем в сейсмофокальной зоне. Они связаны как с вулканизмом, так и с тектоническими процессами. В целом по региональному каталогу для полосы суши Восточное побережье – Срединный хребет уровень надежной регистрации землетрясений $K=8.5-9$ (Гордеев и др., 2006). Класс соответствует энергетической классификации С.А. Федотова для Курило-Камчатских землетрясений. При существующей конфигурации сети этот параметр для исследуемого района $K=7.5$.

В соответствии с вероятностной картой общего сейсмического районирования ОСР-97-А, Долина Гейзеров относится к зоне, где интенсивность колебаний в результате сильных землетрясений может достичь 9 баллов. За последнее столетие Долина Гейзеров 3 раза испытывала сотрясения с интенсивностью 7-8 баллов (1923, 1927, 1959 гг.) и 3 раза - 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 $M=7.5-9$. Последнее наиболее сильное сейсмическое воздействие связано с Кроноцким землетрясением 05.12.1997, $M_w=7.8$, интенсивность колебаний оценена в 6 баллов.

Району Узон-Гейзерной депрессии присуща локальная мелкофокусная сейсмическая активность низкого энергетического уровня. За время детальных сейсмологических наблюдений региональной сетью зафиксировано несколько поверхностных землетрясений из этого района. Для них характерна неравномерность распределения событий во времени, что указывает на нестационарность процесса. В силу ограниченных технических возможностей региональной сети регистрируются только наиболее сильные землетрясения, некоторые из которых – ощутимые. Наличие локальных землетрясений в районе Долины Гейзеров было инструментально подтверждено в ходе проведенных здесь в конце 2007 г. кратковременных наблюдений временной сейсмической станцией (Кугаенко, 2008; Кугаенко и др., 2008).

Имеются данные об ощутимых землетрясениях из района Долины Гейзеров в последние дни перед оползнем, который произошел 3 июня 2007 г. Одно сообщение относится непосредственно к Долине Гейзеров (Пинегина и др., 2008). Два других поступили из ближайших к ней мест, где в это время находились сотрудники Кроноцкого заповедника. Сообщается о слабых ощутимых ($I=2-3$) сейсмических событиях 30 мая – 1 июня 2007 г. Не исключено, что эти слабые землетрясения оказали влияние на заключительный этап подготовки геологической катастрофы 3 июня 2007 г. По

имеющимся данным процесс развития оползня и склоновой неустойчивости длился достаточно долго, в течение нескольких десятков лет. В частности, тектоническая трещина, по которой произошел отрыв блока пород, сформировавших оползень, видна на аэрофотоснимках 1973 г. При обследовании в 1974 г. трещина выглядела свежей, на ней были провальные воронки, свидетельствующие о недавней активизации движений и раскрытии трещины (Леонов, 2008). Возможно, эта активизация трещины связана с сейсмическим воздействием землетрясения 1971 г. ($M_w=7.5$, $I=6$). Однако ее образование (зарождение) могло произойти значительно раньше, в частности, при более интенсивных сотрясениях массива (1923, 1927, 1959 гг., $I=7-8$).

Проблемы полевых сейсмологических наблюдений на Камчатке

Проведение временных полевых сейсмологических наблюдений в наиболее интересных и геодинамически активных районах остается одним из важнейших направлений геофизических исследований. Сохраняют актуальность локальные временные сети в эпицентральных зонах сильных землетрясений, на активных вулканах, в районах проявления естественной и наведенной локальной микросейсмичности. Также рекогносцировочные сейсмологические наблюдения целесообразно проводить на малоизученных территориях, где планируется организация стационарных станций.

Ранее на Камчатке развитию этого вида наблюдений уделялось значительное внимание. Интересные результаты были получены при исследовании Большого трещинного Толбачинского извержения, на Ключевском вулкане, в районах повышенной сейсмической активности. Регистрация велась станциями с аналоговой записью сигналов. Со временем это оборудование устарело и пришло в негодность, а финансовые проблемы не позволяли обновить парк аппаратуры. В итоге на рубеже веков на Камчатке были прекращены временные полевые сейсмологические наблюдения.

В настоящее время ситуация с аппаратурой изменилась в лучшую сторону: начали использоваться цифровые регистраторы GeoSig GSR-24 (<http://www.geosig.com>), а в 2007-2008 гг. Камчатским филиалом Геофизической службы РАН были приобретены 7 современных портативных широкополосных сейсмометров с обратной связью CMG-6TD производства Guralp Systems Ltd. (<http://www.guralp.com>).

В 2008 г. эти приборы впервые не только на Камчатке, но и в России были опробованы в полевых условиях в районе Долины Гейзеров. Сейсмометры CMG-6TD составят основу временных полевых сейсмологических наблюдений на Камчатке в ближайшие годы.

Характеристики аппаратуры

В качестве полевой сейсмической станции в Долине Гейзеров в 2007 г. использовался регистрирующий комплекс, в состав которого включен трехкомпонентный блок короткопериодных сейсмометров CM-3 с периодом собственных колебаний 2 сек. и цифровой 24-разрядный регистратор GSR-24. Параметры комплекса:

- регистрируемый параметр: скорость смещения грунта;
- частота оцифровки: 100 отсч./сек.;
- частотный диапазон регистрации: $0.5 \div 25$ Гц;
- разрядность АЦП: 23+знак;
- динамический диапазон регистрации: не хуже 120 дБ;
- емкость флэш-карты: 2 Гб;
- срок автономности по емкости памяти флэш-карты: 14 суток.

В 2008 г. наблюдения базировались на сейсмометрах CMG-6TD, которые относятся к категории портативных широкополосных приборов со встроенной флэш-картой и могут одновременно сочетать в себе функции сейсмического датчика и цифрового регистратора (рис. 1). Основные характеристики CMG-6TD:

- частотный диапазон от 0.03 до 100 Гц;

- чувствительность 2×1200 В/м/с;
- 3-канальный 24-разрядный АЦП;
- частота оцифровки: 100 отсч./сек.;
- встроенная флэш-карта 2Гб;
- срок автономности по емкости памяти флэш-карты: 14 суток;
- Options: Wi-Fi, Ethernet, Fi-Wi.



Рис. 1 Лабораторные испытания сейсмометров SMG-6TD.

1 – сейсмометр SMG-6TD, 2 – портативный компьютер для полевого обслуживания сейсмометра; 3 - коммутационный блок; 4 – внешний винчестер для скачивания данных из внутренней памяти сейсмометра; 5 – лабораторный блок питания сейсмометра.

Широкий частотный диапазон частот обеспечивается благодаря применению современной технологии форс-балансных датчиков с петлей обратной связи. Встроенный цифровой преобразователь с разрешающей способностью 24 бита с высокой точностью конвертирует полученные на выходе датчиков сигналы в цифровые данные. При подключении питания SMG-6TD начинает работать автоматически. Полученные данные могут передаваться во внешнюю систему регистрации или сохраняться на встроенной флэш-карте памяти. Точная временная привязка информации обеспечивается благодаря GPS-приемнику, связанному с SMG-6TD через коммутационный блок. Для энергопитания аппаратуры использовались блоки батарей «Лиман».

Наблюдения 2007 г.

В конце 2007 г. в районе Узон-Гейзерной вулканотектонической депрессии были выполнены сейсмологические наблюдения на базе временных сейсмических станций (Кугаенко и др., 2008). Использовались описанные выше комплексы, включающие трехкомпонентный блок сейсмометров SM-3 и цифровой регистратор GSR-24. Регистрация проведена в двух пунктах: непосредственно в Долине Гейзеров и в 10 км к северо-западу, в кальдере Узон, которые относятся к единой активной вулканической структуре.

Работы 2007 г. носили разведочный характер. Необходимо было определить уровень фонового микросейсмического излучения, проанализировать записи региональных землетрясений, проверить наличие источников локальных сейсмических сигналов.

Наблюдения осуществлялись в сложных зимних условиях. Сейсмометры были установлены в зимнем полевом варианте: на мерзлый грунт. Аппаратура (сейсмометры, регистратор, блок батарей питания) были помещены в портативные защитные металлические корпуса. Для привязки записи к точному времени использовались GPS-антенны, которые были закреплены на мачтах на высоте 1.5 м над уровнем снега.

В результате проведенных наблюдений впервые в Долине Гейзеров и кальдере Узон были получены цифровые сейсмические записи фонового шума, региональных землетрясений, локальных сейсмических событий, связанных с геодинамической активностью района и, возможно, гидротермальной активностью. Показано, что пункт регистрации в Долине Гейзеров подходит для организации здесь региональной сейсмической станции и по уровню фонового микросейсмического сигнала соответствует мировым требованиям (Peterson, 1993). Подтверждена локальная сейсмическая активность. В кальдере Узон в частотном диапазоне 3-4 Гц выявлен устойчивый максимум в спектре фонового микросейсмического излучения, источник которого, возможно, имеет эндогенное происхождение. Зарегистрированы нетектонические сейсмические сигналы, имеющие сходную форму и спектральные характеристики.

Экспедиционные работы 2008 г.

В октябре-ноябре 2008 г. в районе Долины Гейзеров работала временная микрогруппа с апертурой около 7 км из 8 временных сейсмических станций (рис. 2). Основу составили широкополосные сейсмометры CMG-6TD.



Рис. 2. Схема расстановки временных сейсмических станций в районе Долины Гейзеров в 2008 г. Использована топографическая карта района Долины Гейзеров, составленная НИИГАиК по заказу Института вулканологии ДВО РАН на основе стереотопографической съемки 1978 г.

Центральная станция группы располагалась в центральной части Долины, где в 2007 г. уже была проведена регистрация. Она дублировалась короткопериодным комплексом CM-3 + GSR-24. Остальные точки были вынесены на борта каньона. Микрогруппа захватила участки повышенной оползнеопасности: сопку Гейзерную, восточный борт кальдеры. Наиболее удаленный пункт наблюдений был установлен в верховьях реки Гейзерной, в Долине смерти, у подножью вулканического массива Кихпинич.

Основные цели работ 2008 г.:

- получение микрогруппой синхронных многоканальных цифровых записей сейсмических сигналов;

- определение локальных источников микросейсмической эмиссии и слабых землетрясений;
- апробация новых технических средств исследования микросейсмичности;
- первые исследования сейсмических событий, приуроченных к вулкану Кихпинич.

Предварительно по имеющейся геологической информации необходимо было выбрать точки регистрации и в дальнейшем по материалам полевых наблюдений оценить возможность их потенциального использования при организации долговременного сейсмического мониторинга.

Важной частью полевых работ явилась разработка и прохождение пешеходных маршрутов, связывающих места установки аппаратуры с кордоном «Долина Гейзеров», где базировалась экспедиция (рис. 3). Несмотря на незначительные линейные размеры исследуемой территории, ее сложный рельеф превращает каждый полевой выход в трудоемкое мероприятие. Поток грубообломочного материала, перегородивший Долину в результате оползня 3 июня 2007 г., еще более усложнил пешеходное перемещение в этом районе. В ходе экспедиции были опробованы и с помощью портативного GPS-приемника закартированы 6 радиальных маршрутов, безопасных и доступных для прохождения, которые в будущем могут использоваться для обслуживания стационарных пунктов сети мониторинга.



Рис. 3. Возвращение из пешеходного радиального маршрута на кордон Кроноцкого заповедника «Долина Гейзеров». Вид с восточного борта сопки Гейзерной. В правой части фотографии – новый элемент ландшафта: живописное озеро, образовавшееся в результате запруживания реки Гейзерной крупнообломочной лавиной 3 июня 2007 г. Фото В.А. Салтыкова.

Первые результаты обработки данных 2008 г. иллюстрируют пригодность выбранных точек наблюдения для организации долговременных пунктов. Спектры сигналов характеризуются разнообразием, но по уровню фонового микросейсмического излучения соответствуют мировым требованиям. Применение современных цифровых средств регистрации обеспечило высокое качество полученного материала.

Проблемы организации автономных наблюдений на территории Кроноцкого биосферного заповедника

Долина Гейзеров расположена на территории Кроноцкого государственного биосферного заповедника. С 1996 г. наряду с другими особо охраняемыми территориями Камчатки она входит в состав комплексного объекта Всемирного природного наследия ЮНЕСКО «Вулканы Камчатки».

Режим особо охраняемой территории подразумевает отсутствие любых антропогенных воздействий на природу. Запрещено передвижение по территории заповедника и нарушение растительного покрова. Проведение сейсмологических наблюдений и все действия, необходимые для установки датчиков в грунт, были заранее согласованы с администрацией заповедника. Отсутствие вандализма на ненаселенной заповедной территории позволило отказаться от защитных мероприятий. В соответствии с руководством по установке сейсмических датчиков были подготовлены сейсмоямы, на дно которых засыпался сухой песок, на него укладывали временный сейсмопостамент – строительный шлакоблок. На постамент устанавливался сейсмометр, после чего яма засыпалась землей. На поверхности оставалась GPS-антенна, соединительные провода, коммуникационный блок для связи с сейсмометром, блок батарей питания. Такая схема установки обеспечила минимальное воздействие на окружающую среду, однако аппаратура осталась практически незащищенной.

Это привело к значительным неприятностям. Биоразнообразие заповедника включает крупных сильных хищников: медведя и росомаху. Животные любопытны и изобретательны. Появление на их территории незнакомых предметов не прошло незамеченным. На большинстве регистрирующих точек наблюдались следы посещения их животными: от надорванного защитного полиэтилена до многократно перевернутых и значительно перемещенных блоков батарей питания, вес которых превышает 15 кг. На станции в районе Долины Смерти был перекушен кабель GPS-антенны, а саму антенну найти так и не удалось. Станция на восточном склоне сопки Гейзерной была практически уничтожена: сейсмометр выворочен на поверхность, разорваны провода, следы зубов хищника остались на GPS-антенне и пластиковом транспортировочном контейнере для сейсмометра. Станция была досрочно снята и требует ремонта на уровне изготовителя. На сейсмических записях легко идентифицируются сигналы, связанные с посещением станций крупными представителями биоразнообразия, что само по себе достаточно интересно. Однако потери данных и повреждение аппаратуры не внушают оптимизма.

Таким образом, появление на территории заповедника незнакомых предметов и аппаратуры является фактором беспокойства для животных. Реакция колеблется от безобидного любопытства до агрессивного поведения, при этом высока вероятность отключения питания станций, потерь информации, поломки аппаратуры. В таких условиях проведение на территории заповедника любых автономных инструментальных наблюдений без применения сооружений, защищающих аппаратуру, нецелесообразно. Необходимо в дальнейшем при планировании сейсмологического и любого геофизического мониторинга специально заниматься этой проблемой, согласовывая защитные конструкции с руководством заповедника.

Обобщение результатов работ и заключение

В ходе полевых работ 2007-2008 гг. получены первые сейсмологические записи из района Долины Гейзеров. Полное отсутствие антропогенных помех позволяет регистрировать здесь широкий набор естественных сигналов: землетрясения (рис. 4), микросейсмическое излучение, неструктивную активность гидротермальной системы. В таких благоприятных условиях возможно получение уникальных микросейсмических данных, связанных с динамическими процессами в наиболее оползнеопасных участках Долины.

Результаты наблюдений будут использованы для обоснования целесообразности дальнейшего исследования этого района. В частности, выбранные точки наблюдений, на которых проведена пробная регистрация, могут быть рекомендованы в качестве пунктов для долговременного сейсмического мониторинга. Для организации стационарной сейсмической станции наиболее подходящим местом представляется территория, примыкающая к кордону «Долина Гейзеров» Кроноцкого заповедника. Подготовлен проект создания сейсмической микрогруппы в комплексе с пунктами GPS-мониторинга в районе Долины Гейзеров.

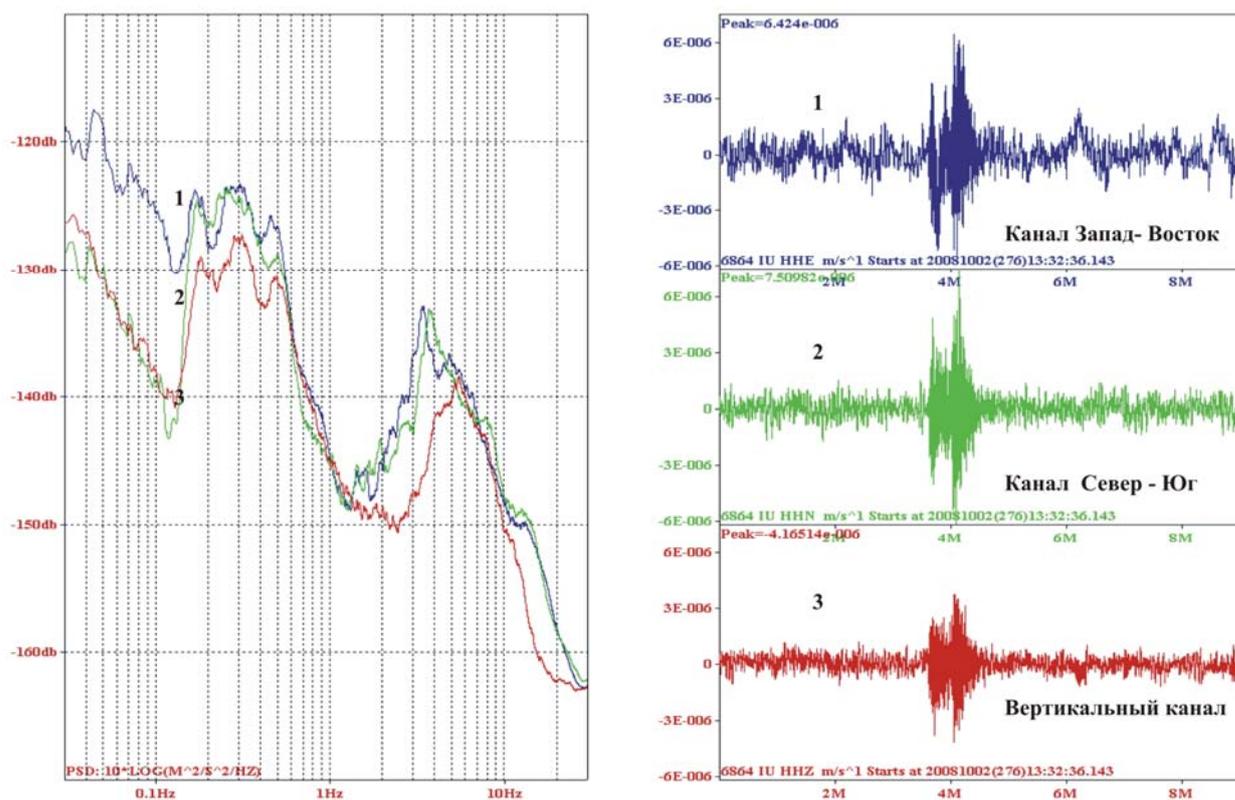


Рис. 4. Пример сейсмической записи со станции «Горное плато»: региональное землетрясение (2 октября 2008 г. 13 час.35 мин. 39.7 сек., класс $K=8.7$, эпицентральное расстояние порядка 220 км) и участок фонового сейсмического сигнала. Слева приведен спектр записи. Максимум в диапазоне частот 3-5 Гц соответствует землетрясению. В диапазоне частот 0.1-0.6 Гц основной вклад в уровень сигнала вносят микросейсмы. В низкочастотной части спектра обращает на себя внимание значительное превышение интенсивности колебаний на канале «запад-восток» над двумя другими каналами. Возможно, это связано с особенностями рельефа.

Благодарности. Авторы благодарны за всестороннюю поддержку специалистам Института вулканологии и сейсмологии ДВО РАН В.Л. Леонову и В.А. Дрознину. В подготовке аппаратуры и полевых работах принимали участие сотрудники Камчатского филиала Геофизической службы РАН В.И. Синицын, Е.С. Федоров, В.Н. Козлов, А.А. Коновалова, П.В. Воропаев, Д.В. Чебров. В подготовке материалов к обработке важная роль принадлежит Д.В. Дрознину. Полезные практические рекомендации по работе с сейсмометрами SMG-6TD авторы получили от Н.З. Захарченко, С.В. Захарченко и В.Н. Мишаткина (НПО «Вулкан», г. Обнинск). Хочется поблагодарить администрацию Кроноцкого государственного биосферного заповедника за понимание при согласовании работ и предоставление возможности полевому отряду базироваться на территории кордона «Долина Гейзеров». Полевые работы профинансированы Российским фондом фундаментальных исследований: экспедиционные проекты № 07-05-02107 и 08-05-10043.

Список литературы

- 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 Кихпинич // Действующие вулканы Камчатки. Том 2. М.: Наука, 1991. С. 74-93.
- Гордеев Е.И., Гусев А.А., Левина В.И. и др.* Мелкофокусные землетрясения п-ова Камчатка // Вулканология и сейсмология. 2006. № 3. С. 28-38.

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., Синицын В.И. Рекогносцировочные сейсмические наблюдения в Долине Гейзеров и кальдере Узон, декабрь 2007 г. // Материалы конференции, посвященной дню вулканолога, 27-29 марта 2008 г. Петропавловск-Камчатский: ИВиС ДВО РАН, 2008. С. 173-181.

Леонов В.Л. Геологические предпосылки оползня, произошедшего 3 июня 2007 г. в Долине Гейзеров // Геофизический мониторинг и проблемы сейсмической безопасности Дальнего Востока России. Т. 1. Петропавловск-Камчатский: ГС РАН, 2008. С. 91-95.

Леонов В.Л., Гриб Е.К., Карпов Г.А. и др. Кальдера Узон и Долина Гейзеров // Действующие вулканы Камчатки. М.: Наука, 1991. Т. 2. С.94-143.

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.

Peterson J. Observation and modeling of seismic background noise. Open-file report 93-322. Albuquerque, New Mexico: U.S. Department of Interior Geological Survey, 1993. 96 p.

Lundgren P., Lu Zh. Inflation model of Uzon caldera, Kamchatka, constrained by satellite radar interferometry observations // Geophysical Research Letters. 2006. V. 33. L06301, doi:10.1029/2005GL025181