

УДК 550.83.04

А.С. ЗАКУПИН, И.П. ДУДЧЕНКО, Н.В. БОГИНСКАЯ,  
Д.В. КОСТЫЛЕВ, П.А. КАМЕНЕВ

## Изучение сейсмического режима на острове Матуа в комплексной экспедиции 2017 г.

*В комплексной научной экспедиции на о-в Матуа был исследован сейсмический режим с целью выявления сейсмической активности, проведен спектральный анализ сейсмического шума в различные периоды времени, определены регистрационные возможности сети полевых станций. Изучена сейсмическая обстановка в районе Центральных Курил. Составлены каталоги и карты эпицентров землетрясений. Эти новые данные позволили получить представление о пространственно-временном распределении сейсмичности и установить параметры ошибок в определении гипоцентров землетрясений.*

*Ключевые слова:* острове Матуа, сейсмичность, землетрясение, сейсмостанция.

**Study of seismic regime on the Matua Island in the part of a complex expedition in 2017.** A.S. ZAKUPIN, I.P. DUDCHENKO (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), N.V. BOGINSKAYA, D.V. KOSTYLEV (Geophysical Survey FRC RAS, Yuzhno-Sakhalinsk), P.A. KAMENEV (Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk).

*During a complex scientific expedition on the Matua Island we have carried out research of seismic regime to reveal seismic activity, spectral analysis of seismic noise in various periods of time, analysis of registration capabilities of the network of field seismic stations. Seismic situation in the Central Kuril has been analyzed. Catalogs and maps of earthquake epicenters have been compiled. Obtained data allowed getting an idea about space-time distribution of seismicity and ascertaining accuracy of earthquakes hypocenters definition.*

*Key words:* Matua Island, seismicity, earthquake, seismic station.

### Введение

В июне 2017 г. в рамках комплексных научных исследований по проекту «Комплексные вулканологические и геоэкологические исследования на о-ве Матуа (Центральные Курильские острова): сильные эксплозивные извержения влк. Пик Сарычева в верхнем плейстоцене–голоцене и оценка их воздействия на окружающую среду», по которому Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН) получил финансирование Русского географического общества, была реализована совместная экспедиция

---

\*ЗАКУПИН Александр Сергеевич – кандидат физико-математических наук, ученый секретарь, ДУДЧЕНКО Илья Павлович – кандидат технических наук, научный сотрудник, КАМЕНЕВ Павел Александрович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник (Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск); БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна – инженер, КОСТЫЛЕВ Дмитрий Викторович – начальник отдела сейсмических стационаров (Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Южно-Сахалинск). \*E-mail: a.zakupin@imgg.ru

Экспедиция и полевые исследования выполнены при поддержке гранта РГО (№ 09/2017-Р) и центра коллективного пользования ИМГиГ ДВО РАН «Комплексные исследования природных и техногенных систем» с непосредственным участием специалиста ЦКП, одного из соавторов.



Рис. 1. Загрузка оборудования полевого отряда на БДК «Адмирал Невельской». Июнь 2017 г.

ИМГиГ, Тихоокеанского флота Министерства обороны Российской Федерации, Русского географического общества.

Основными задачами экспедиции были палеовулканологические исследования (включая тейхронологические и геохимические работы), геолого-вулканологическое картирование, оценка вулканической опасности, геоботаническое, сейсмологическое и экологическое изучение островов Матуа и Топорковый. Доставка полевого отряда осуществлялась на большом десантном корабле «Адмирал Невельской» Тихоокеанского флота РФ (рис. 1), возвращался отряд на килекторном судне КИЛ-168, также входящем в состав ТОФ. От ИМГиГ в экспедиции принимали участие сотрудники лаборатории вулканологии и вулcanoопасности и Центра коллективного пользования. В первые дни проведения полевых работ на о-ве Матуа сейсмологическим отрядом была развернута сеть из четырех сейсмостанций, осуществлявших непрерывную регистрацию сейсмических сигналов вплоть до окончания экспедиции. В задачи этого исследования входили: спектральный анализ сейсмического шума в различные периоды времени, анализ регистрационных возможностей сети полевых станций на о-ве Матуа, оценка потенциала развертывания непрерывных сейсмологических наблюдений в районе Центральных Курил.

### **Характеристика района исследований**

Остров Матуа, расположенный в центральной части Курильских островов, сформирован влк. Сарычева, одним из самых активных в этом регионе. Приблизительно с 1660-х годов на острове зафиксировано 12 извержений разной интенсивности, 4 из них произошло начиная со второй половины XX в. Активная вулканическая деятельность на этом небольшом острове имела первостепенное значение в формировании его ландшафтной структуры [5]. Помимо высокой вулканической активности для острова также характерны повышенная сейсмическая активность и цунамиопасность [8].

Остров Матуа представляет собой в плане контур длиной около 12 км, шириной до 6 км и площадью 52 км<sup>2</sup>. Северо-западную, расширенную часть острова занимает активный стратовулкан Пик Сарычева (высота 1446 м). Его склоны ограничены морем со всех сторон, кроме юго-восточной, где находятся остатки кальдеры древнего вулкана. Юго-восточная окраина острова – низкая древняя терраса; такой же рельеф и у примыкающего здесь к Матуа небольшого островка Топорковый [1, 5].

Из рис. 2 следует, что на расстоянии приблизительно 800 км вдоль Курильской гряды нет возможности вести систематический инструментальный сейсмологический мониторинг, что существенным образом влияет на детальность и качество сейсмологических наблюдений Охотоморского региона [7, 13]. Регулярные исследования такого рода на о-ве Матуа проводились с 1965 по 1974 г. Сахалинским комплексным научно-исследовательским институтом, а с 1982 по 1992 г. Сахалинской опытно-методической сейсмологической партией [3]. Авторы надеются, что настоящей работой положено начало нового этапа регулярных сейсмологических наблюдений на Центральных Курилах.

### Методика и результаты исследований

Временная сеть стационарных станций сейсмического мониторинга на о-ве Матуа была развернута 11 июня и закончила свою работу 29 июня 2017 г. Станции размещались в разных частях острова (рис. 2А, врезка) на максимально возможном расстоянии друг от друга, преимущественно в оставшихся от японцев долговременных огневых точках (рис. 3) времен Второй мировой войны. Аппаратная часть сети была представлена наземными цифровыми сейсмическими станциями, каждая из которых укомплектована 3-компонентным короткопериодным сейсмоприемником СПВ-3К (ООО «Логис-Геотех», Россия) [6]. В качестве цифровых регистраторов использовали сейсмические станции «Дельта 03» и «Дельта 03М» (ООО «Логические Системы», Россия) [10]. Станции работали в режиме непрерывной регистрации, шаг дискретизации составил 100 отсчетов в секунду. Синхронизация времени происходила при помощи встроенного GPS-приемника. Данные измерений сохранялись на РСМСА-карты объемом 8 и 16 ГБ. Для обеспечения электропитания оборудования использовали свинцово-кислотные аккумуляторы емкостью 65 А·ч, которые заменяли каждые 6 дней. После замены аккумулятора станций проверяли, ведется ли работа станций в правильном режиме, для чего использовался нетбук Samsung NC-110 со встроенной сетевой картой.

В основе системы обработки сейсмологических данных лежит программа DIMAS (Display, Interactive Manipulation and Analysis of Seismograms), разработанная в Камчатском филиале Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН). Программа предназначена для детальной обработки и визуального анализа цифровых сейсмических сигналов, поступающих от

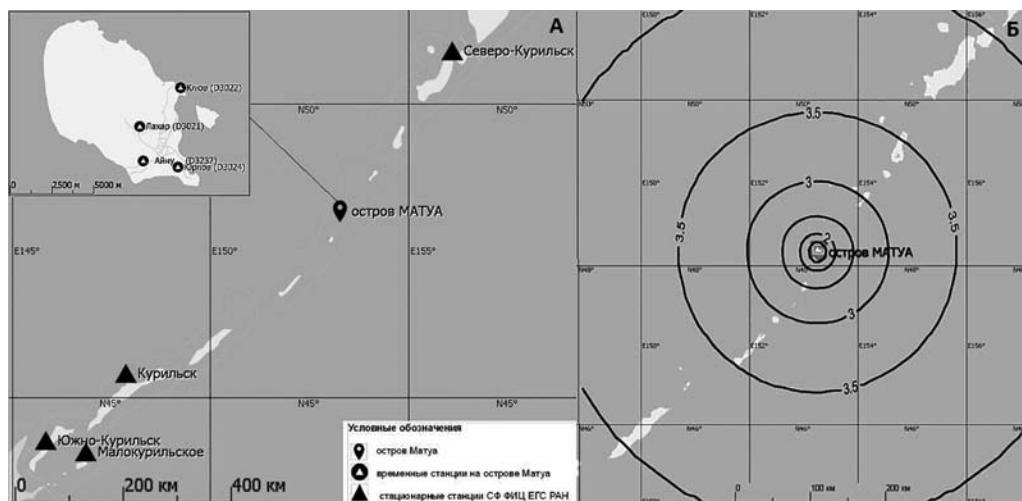


Рис. 2. Расположение сетей постоянно действующих и развертываемых станций на Курильских островах, в том числе на о-ве Матуа (А), и регистрационные возможности временной сети станций, установленных на о-ве Матуа (Б)



Рис. 3. Один из дотов на о-ве Матуа, где была расположена сейсмостанция

различных систем сбора [2, 9]. Для анализа сигнала во временной области существует возможность удаления постоянной составляющей сигнала, дифференцирования и интегрирования сигнала разными способами. Программа позволяет производить рекурсивную и нерекурсивную фильтрацию, проектировать БИХ-фильтры Бесселя, Баттерворда и КИХ-фильтры низких частот, высоких частот, полосовые и режекторные, строить огибающую сигнала и сглаживать сигнал во временной области скользящим временным окном.

Обработка данных в частотной области ведется с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье и включает в себя следующие операции над исходным сигналом: дифференцирование и интегрирование сигнала в частотной области, вычисление огибающей, оценка спектра мощности сигнала [12]. Для визуального анализа спектра мощности в программе производится построение графика в логарифмическом масштабе частот, где по вертикальной оси откладывается величина спектра мощности в децибелах. При наличии информации о характеристиках регистрирующей аппаратуры по желанию пользователя в спектр мощности можно внести соответствующую поправку. Наличие информации о характеристиках прибора необходимо для восстановления истинных движений грунта (смещения, скорости, ускорения). Также в программе имеется возможность эмуляции стандартных сейсмометров.

Анализ сигнала в частотно-временной области сводится к изучению изменения его частоты во времени. Сигнал пропускается через набор полосовых фильтров [14], затем вычисляется огибающая сигнала в каждой полосе частот. В результате имеем уровень изменения амплитуды сигнала во времени на разных частотах, по которому и ведется построение цветных изолиний – спектрограммы. Для выделения сигнала, имеющего слабое отношение сигнал/шум, путем анализа спектральных составляющих шума и шум + сигнал можно подобрать оптимальный фильтр для лучшего выделения сигнала на уровне шума. В программе имеется возможность производить арифметические операции между каналами и оценивать инструментальную сейсмическую интенсивность.

За период с 11 по 29 июня 2017 г. в зоне мониторинга идентифицировано 64 события с магнитудой  $M_w \geq 2,7$  (сводную карту эпицентров землетрясений см. на рис. 4).

Данные по эпицентрам и гипоцентрам крупных землетрясений были уточнены с помощью данных, полученных станциями Сахалинского филиала (СФ) ФИЦ ЕГС РАН, установленных на островах Парамушир и Итуруп, а также сети японских станций, расположенных на о-ве Хоккайдо.

В результате обработки данных получены следующие результаты изучения особенностей пространственно-временного распределения сейсмичности:

1) данный период времени, как видно из представленных каталогов, в исследуемом регионе отмечен весьма высокой сейсмической активностью, максимальная магнитуда составила  $M = 6,0$ . Параметры эпицентров многих мелких землетрясений удалось определить благодаря установке сейсмических станций на о-ве Матуа (рис. 2Б);

2) подавляющее большинство землетрясений, как следует из карт их эпицентров, в целом располагается в интервале глубин 31–70 км. Понижение сейсмической активности отмечается в интервалах глубин 0–30 км и 71–200 км. Отмеченные различия в распределении землетрясений по глубине очага объясняются, по-видимому, неоднородностями строения среды [8];

3) выполнен сравнительный анализ результатов определений параметров землетрясений, произошедших в отчетный период, по данным станций, установленных на о-ве Матуа, и станций СФ ФИЦ ЕГС РАН. Распределение эпицентров землетрясений по каталогу станций, установленных на о-ве Матуа, показало, что наиболее уязвимый параметр, помимо глубины очага, – долгота, что вызвано, вероятно, слишком близким расположением сейсмических станций. Однако при привлечении дополнительных станций разброс

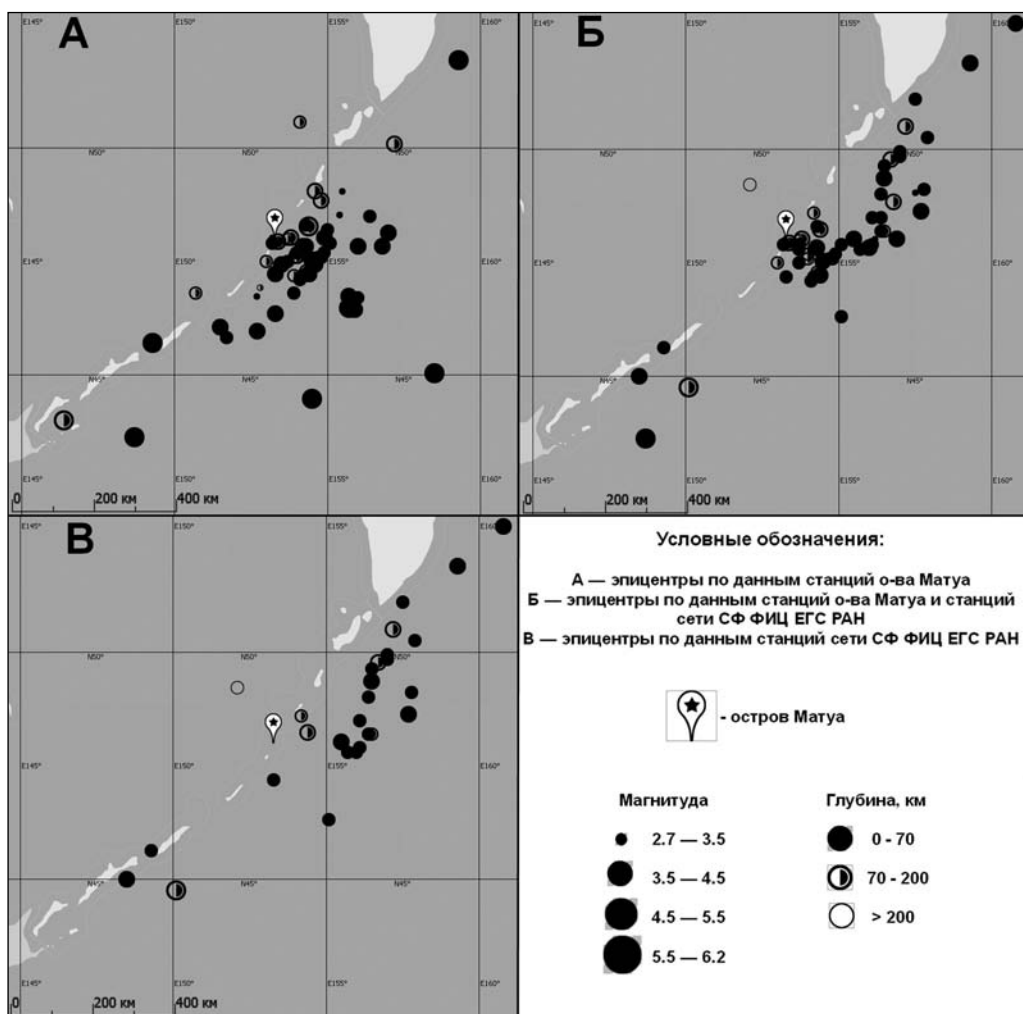


Рис. 4. Сводная карта эпицентров землетрясений на Курилах, произошедших 11–29 июня 2017 г., по данным: А – станций о-ва Матуа, Б – станций о-ва Матуа и сети станций Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН, В – сети станций Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН

ошибок заметно уменьшается. При хорошем азимутальном окружении очага землетрясения большим количеством станций можно увидеть устойчивость решений в задаче определения параметров гипоцентров. При небольшом количестве пунктов наблюдений гипоцентра оказывается неточна;

4) по каталогу землетрясений, полученному в результате обработки данных от станций, установленных на о-ве Матуа, а также станций СФ ФИЦ ЕГС РАН, за отчетный период был построен график повторяемости. Уровень представительности каталога начинается с  $M_w \geq 2,7$ ;

5) амплитудно-частотная характеристика грунтов определялась на основе анализа микросейсмических колебаний по методу Накамуры. Анализ проведен с использованием программы DIMAS, разработанной Д.В. Дрозниным в Камчатском филиале ФИЦ ЕГС РАН. Метод Накамуры основан на получении отношений спектров горизонтальных компонент микросейсмических колебаний к спектру их вертикальной компоненты (H/V отношений), которые представляют собой передаточную функцию разреза грунтов на всю толщу относительно несвязного геологического материала, представляющую аналог амплитудно-частотной характеристики грунта. Наблюдения выполняются одной трехкомпонентной станцией без потери качества результирующих материалов.

Проанализировав отношения спектров горизонтальной и вертикальной составляющих, можно сказать, что значительного увеличения значения ( $> 3$  Гц) за счет резонансных свойств грунтов в рассматриваемом диапазоне частот от 0,1 до 30 Гц не наблюдается. Усиление в диапазоне до 1 Гц, по всей видимости, связано с расположением станций в непосредственной близости от океана, являющегося источником микросейсм в данном диапазоне частот. В диапазоне частот от 1 до 5 Гц отмечается слабое усиление. Наибольшее усиление колебаний наблюдается для диапазона  $> 5$  Гц. Оно связано, вероятно, с результатами вулканической деятельности [4], так как станция № 3021 расположена у подножия влк. Пик Сарычева.

## Заключение

С 11 по 29 июня 2017 г. на о-ве Матуа была развернута сеть из четырех сейсмостанций, осуществлявших непрерывную регистрацию сейсмических сигналов.

Изложены сведения о состоянии сети сейсмического мониторинга на о-ве Матуа 11–29.06.2017 г. Описаны технологические аспекты и методология обработки сейсмических данных. Составлены карты регистрационных возможностей данной сети станций.

Проанализирована сейсмическая обстановка в районе о-ва Матуа и прилегающих к нему островов. Составлены каталоги и карты эпицентров землетрясений как по станциям, установленным на о-ве Матуа, так и в совокупности с привлеченными станциями СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Полученные данные позволили составить представление о пространственно-временном распределении сейсмичности, а также установить параметры ошибок в определении гипоцентров землетрясений. Представлены общие результаты расчетов амплитудно-частотной характеристики грунтов методом Накамуры.

К основным проблемам, с которыми пришлось столкнуться в первом сезоне сейсмологических наблюдений на о-ве Матуа, можно отнести отсутствие энергоснабжения, транспортной инфраструктуры, сотовой связи. Все эти проблемы были решены на этапе подготовки к экспедиции.

В настоящее время контроль за состоянием влк. Пик Сарычева проводится только на основе спутниковых данных. Непрерывные сейсмологические наблюдения позволяют выделить большое количество слабых сейсмических событий, представляющих значительный интерес для сейсмологии. Планируется дальнейшее развитие работ, направленных, прежде всего, на установку постоянно действующего стационарного пункта

сейсмологических наблюдений в рамках комплексного наблюдения за активностью вулкана. Для обеспечения мониторинга вулканической активности целесообразно создать постоянно действующую сеть стационарных сейсмических пунктов [11]. Согласно недавнему сообщению группы SVERT ИМГиГ ДВО РАН, на влк. Пик Сарычева, возможно, произойдет новое извержение [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дегтерев А.В., Рыбин А.В., Разжигаева Н.Г. Исторические извержения вулкана Пик Сарычева (о. Матуа, Курильские о-ва) // Вестн. КРАУНЦ. Серия: Науки о Земле. 2011. № 17. С. 102–119.
2. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 3. С. 22–34.
3. Каталог землетрясений Курило-Камчатского региона (1737–2005 гг.) / Ч.У. Ким, М.Ю. Андреева. Препринт. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2009. 126 с.
4. На вулкане Пик Сарычева, возможно, произойдет новое извержение. – <http://imgg.ru/ru/news/166> (дата обращения: 12.12.2017).
5. Рыбин А.В., Чибисова М.В., Дегтерев А.В., Гурьянов В.Б. Вулканическая активность на Курильских островах в XXI в. // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 1. С. 51–61.
6. Сейсмоприемник велосиметр трехкомпонентный СПВ-3К. – [http://www.geotech.ru/rss\\_delta\\_xtra/spv-3k/](http://www.geotech.ru/rss_delta_xtra/spv-3k/) (дата обращения: 12.12.2017).
7. Тараканов Р.З., Тихонов И.Н. Сахалинская сейсмология: развитие и некоторые результаты // Вестн. ДВО РАН. 2011. № 6. С. 34–42.
8. Тараканов Р.З. Уроки Симуширских землетрясений 15 ноября 2006 г. ( $M_w = 8.3$ ) и 13 января 2007 г. ( $M_w = 8.1$ ) // Вулканология и сейсмология. 2008. № 6. С. 41–54.
9. Чебров В.Н., Гусев А.А., Дрознин Д.В. и др. Развитие сейсмологических наблюдений на Дальнем Востоке России для службы предупреждения о цунами // Сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. С. 80–101.
10. Четырехканальный регистратор сейсмических сигналов «Дельта-03М». – [http://www.geotech.ru/market/katalog\\_oborudovaniya/sejsmorazvedka/rssdelta03\\_4ch/](http://www.geotech.ru/market/katalog_oborudovaniya/sejsmorazvedka/rssdelta03_4ch/) (дата обращения: 12.12.2017).
11. Шапиро Н.М., Гордеев Е.И., Абкадыров И.Ф. и др. Широкомасштабный полевой сейсмологический эксперимент для изучения Ключевской группы вулканов // Вестн. ДВО РАН. 2017. № 1. С. 75–78.
12. Embree P., Kimball B. Language Algorithms for Digital Signal Processing. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1991. 456 с.
13. Shigefuji M., Takai N., Sasatani Ts. et al. Characteristics of strong motion records from the 2006–2007 great earthquake sequence in the central Kurile islands // Geodynamical Processes and Natural Hazards. Lessons of Neftegorsk: Intern. Sci. Conf., Yuzhno-Sakhalinsk, May 26–30, 2015: Proc. in 2 volumes / Eds B.W. Levin, O.N. Likhacheva. Vladivostok: Dalnauka, 2015. Vol. 1. С. 52–55.
14. Stearns S.D., David R.A. Signal Processing Algorithms Using Fortran and C. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1992. 331 с.