УДК 550.34.038.8

doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402

Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования

© 2019 П. А. Каменев^{*1}, Д. В. Костылев^{1,2}, Н. В. Богинская¹, А. С. Закупин¹

¹Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия ²Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия *E-mail: p.kamenev@imgg.ru

Реферат. В окрестности активного разлома южного Сахалина развернут комплекс для геофизических исследований, представленный сейсмическими станциями (широкополосной и короткопериодными), гидрофоном и сетью регистрации концентрации подпочвенного радона. Создана база данных сейсмологических наблюдений, включающая записи широкополосного и короткопериодных сейсмометров, гидрофона и вариаций объемной активности подпочвенного радона (OA Rn). Проведена оценка уровня шумов и регистрационных возможностей сейсмического оборудования. Выделена аномалия вариаций ОА Rn после сейсмического события в наблюдаемом регионе. Показана необходимость сейсмологических наблюдений за разработкой Анивских газовых месторождений, находящихся в зоне регистрации развернутого оборудования. В ходе работ осуществляется апробация инновационного оборудования, основанного на молекулярно-электронной технологии.

Ключевые слова: сейсмичность, мониторинг, активный разлом, инновационное геофизическое оборудование, геофизические наблюдения, сейсмическое событие.

Для цитирования: Каменев П.А., Костылев Д.В., Богинская Н.В., Закупин А.С. Геофизические исследования в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием нового комплекса оборудования. *Геосистемы переходных зон.* 2019. Т. 3, № 4. С. 390–402. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402

Geophysical surveys in the southern part of the Central Sakhalin Fault based on new integrated network

Pavel A. Kamenev*¹, Dmitriy V. Kostylev^{1,2}, Natalya V. Boginskaya¹, Alexander S. Zakupin¹

¹Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia ²Sakhalin Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia *E-mail: p.kamenev@imgg.ru

Abstract. A surveys system involved seismic stations (broadband and short-period), a hydrophone and a network for recording the level of subsurface radon has been deployed in the vicinity of the active fault of southern Sakhalin. A database on these geophysical fields has been created. The noise level and registration capabilities of seismic equipment have been assessed. The anomaly of variations OA Rn of subsurface radon after a seismic event in the observed region is highlighted. It is shown that the deployed geophysical system can control the Aniva gas field located in the registration zone and the seismological monitoring of gas production is proper. During the period of surveys the approbation of the modern, innovative equipment based on molecular-electronic technology is carried out.

Keywords: seismicity, monitoring, active fault, innovative geophysical equipment, geophysical observations, seismic event.

For citation: Kamenev P.A., Kostylev D.V., Boginskaya N.V., Zakupin A.S. Geophysical surveys in the southern part of the Central Sakhalin Fault based on new integrated network. *Geosystems of Transition Zones*, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 390–402. (In Russian) https://doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.4.390-402

Введение

Большая часть населения Сахалинской области проживает в непосредственной близости от активного Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР), который способен генерировать сильные сейсмические события (рис. 1). В отличие от вероятной области землетрясения (ВОЗ) в северной (пример -Нефтегорское землетрясение) и западной (пример – Невельское землетрясение) частях острова, в этой части прогнозируемая интенсивность на балл ниже, однако за счет более высокой плотности населения выше и степень риска. Дополнительной нагрузкой для напряженно-деформированного состояния данного линеамента является длительная эксплуатация Анивских газовых месторождений (АГМ). При этом основное внимание сейсмологов приковано к очаговым областям, где имели место резонансные события наподобие Нефтегорского и Невельского землетрясений. Появились дополнительные основания к анализу напряженно-деформированного состояния структур в районе ЦСР и, как следствие, к развертыванию в начале 2018 г. комплексных геофизических наблюдений в южной части ЦСР силами Института морской геологии и геофизики Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИМГиГ ДВО РАН). Результаты среднесрочного прогноза землетрясений методами LURR и СРП, полученные в ИМГиГ ДВО РАН, указали на наличие потенциальной опасности в окрестности этого сегмента разлома [Закупин, Богинская, 2019]. Актуальность проблемы очевидна, а путь к ее решению определяется комплексированием различных подходов и методов для анализа разнородной геофизической информации.

С целью изучения распределения деформаций и напряжений в процессе подготовки сильного сейсмического события и после его реализации была создана геомеханическая модель южного сегмента ЦСР [Каменев и др., 2019]. Расчет избыточных касательных напряжений, возникающих в рассматриваемой области, показывает, что их максимальная величина концентрируется в зоне разлома. Так, максимальное его зна-

чение 289 МПа соответствует глубине 9 км и постепенно снижается до минимальных значений на свободной поверхности. Результаты моделирования согласуются как с данными распределения очагов землетрясения, так и с инструментальными данными современных приповерхностных деформаций [Прытков, Василенко, 2018]. Работы по математическому моделированию геодинамических процессов могут лишь указать на потенциально опасные области сегмента разлома. Одним из эффективных способов наблюдения за активностью разломов считаются геофизические методы исследования. Отправной точкой по развертыванию геофизических наблюдений стал проект Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности Сахалина с применением сейсмических датчиков нового типа». Этот проект реализуется ИМГиГ ДВО РАН совместно со специалистами Сахалинского филиала ФИЦ «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СФ ФИЦ ЕГС РАН) и Московского физико-технического института (МФТИ).

В данной работе показаны первичный этап развертывания геофизического комплекса для непрерывного мониторинга сейсмической активности ЦСР и первые результаты исследований.

Методики сбора и анализа геофизических данных

Обоснование и выбор мест для пунктов наблюдения

Для обеспечения геофизических исследований в рамках проекта в с. Петропавловское (см. рис. 1) была развернута площадка комплексных геофизических наблюдений. При выборе места для площадки авторы настоящей работы руководствовались несколькими основными соображениями.

Пункт наблюдения имеет развитую инфраструктуру и современную телекоммуникационную сеть, позволяющую непрерывно обеспечивать доступ к оборудованию и регистрируемым данным. Обеспечена круглосуточная охрана оборудования.



Рис. 1. Схема территории наблюдения (а). Южный сегмент ЦСР с пунктами наблюдения (б) согласно [Булгаков и др., 2002].

1 – мезозой; 2 – верхний мел; 3 – палеоген;
4 – неоген; 5 – четвертичные образования;
6 – разломы активные (а) и неактивные со штрихами при взбросо-надвиговой кинематике (б),
штриховая линия – предполагаемые продолжения активных разломов; 7– оси антиклинальных
(а) и синклинальных (б) складок; 8 – стратиграфические границы и маркирующие горизонты.
Fig. 1. The scheme survey area (a). The southern segment of the CSF with observation points (b) according to [Bulgakov et al., 2002].

1 - Mesozoic; 2 - upper Cretaceous; 3 - Paleogene; 4 - Neogene; 5 - Quaternary formations; 6 - active faults (a) and inactive with the strokes when upthrust-thrust kinematics (b), dashed line-assumed continuations of active faults; 7 - axes of anticline (a) and syncline folds (b); 8 - stratigraphic boundaries and marking horizons.



Geosystems of Transition Zones, 2019, vol. 3, no. 4, pp. 390-402

Полигон располагается в зоне двух активных разломов – Центрально-Сахалинского (Тымь-Поронайского) и Апреловского, в зоне которых проживает большая часть населения Сахалинской области (рис. 1). Таким образом, исследования в выбранном месте весьма актуальны для обеспечения безопасности жизнедеятельности населения.

Пункт наблюдения находится на территории, имеющей наибольшую плотность покрытия сейсмическими станциями Геофизической службы РАН на территории Сахалинской области, эти данные необходимы для проведения качественных исследований.

Полигон находится на окраине населенного пункта, что в некоторой степени снижает уровень техногенных шумов.

Сейсмическая активность выбранного сегмента Центрально-Сахалинского разлома исследуется методами LURR и СРП [Закупин, Богинская, 2019; Levin et al., 2018], проведено геомеханическое моделирование данного сегмента [Каменев и др., 2019].

В зоне наблюдения выбранного сегмента разлома находятся Анивские газовые месторождения, которые могут представлять интерес с точки зрения техногенно-индуцированной сейсмичности и воздействия сейсмических событий на динамику добычи.

Кроме оборудования комплексного пункта наблюдения в с. Петропавловское, совместно со специалистами Камчатского филиала Единой геофизической службы РАН (КФ ФИЦ ЕГС РАН) и СФ ФИЦ ЕГС РАН были развернуты пункты наблюдения за уровнем подпочвенного радона в г. Южно-Сахалинск, селах Быков и Ожидаево [Макаров и др., 2018]. Организована временная сеть короткопериодных сейсмических станций в селах Таранай и Петропавловское, осуществляющая мониторинг района Анивских газовых месторождений [Костылев и др., 2018].

Характеристика района исследования

Как отмечено выше, полигон располагается в зоне двух активных разломов – Центрально-Сахалинского (Тымь-Поронайского) и Апреловского (Троицкого) [Воейкова и др.,

2007; Булгаков и др., 2002; Рождественский, Сапрыгин, 1999], последний в некоторых источниках рассматривается как оперяющий Тымь-Поронайский взбросо-надвиг [Кучай, 1987; Мельников, 2002] (рис. 1). Такая геологическая система представляет существенный интерес для наблюдений за ее геодинамической активностью. Из самих названий геологических структур следует, что единого мнения о геометрии (как и названии) разломов не существует. Плоскости сместителей обеих ветвей разлома наклонены на запад под углами 60-80° при выходе на дневную поверхность с постепенным выполаживанием до 20-30° на глубинах 10-15 км. Западная ветвь Центрально-Сахалинского разлома выражена в рельефе в виде уступа высотой до 50-80 м; смещает плиоцен-раннечетвертичную и среднечетвертичную поверхность выравнивания. Вдоль плоскости разлома наблюдается пластичная смазка в виде аргиллитов быковской свиты [Сапрыгин, 2005]. Наиболее детально разломы и тектонические нарушения южной части Сахалина отражены в статье [Рождественский, Сапрыгин, 1999]. В ней показано, что в области, расположенной от 46°40' до 47°15' с.ш., имеет место зона дробления земной коры, отмечены локальные разломы северо-восточного и северо-западного направлений. Ширина этой зоны около 25-30 км, протяженность – около 50 км. Зона вытянута в меридиональном направлении с севера на юг. Ее западная граница условно может быть проведена по долготе 142°20', а восточная по долготе 142°40', что соответствует примерно положению северной части Апреловского разлома. Именно с ним и связаны в основном очаги землетрясений в этом районе [Злобин, Бобков, 2003]. Это отражается в характере деформаций, измеряемых на поверхности с помощью GPS/ГЛОНАСС. Средняя скорость движения блоков по разлому составляет 0.6 мм/год; современная скорость поднятия Западно-Сахалинских гор 2-4 мм/год [Прытков, Василенко, 2018].

К уникальным геологическим характеристикам района исследования можно отнести грязевой вулканизм Центрально-Сахалинского разлома. К разлому приурочена система грязевых вулканов – Пугачевские грязевые вулканы, грязевые вулканы Восточный и Южно-Сахалинский [Ершов, 2012; Никитенко и др., 2018]. На территории Сахалинской области Южно-Сахалинский грязевой вулкан является одним из наиболее крупных и активных на сегодняшний день. Поскольку грязевой вулкан представляет собой, по сути, природную флюидодинамическую систему, то вариации напряженно-деформированного состояния или некое воздействие на эту систему будут приводить к ее изменениям. В ряде работ, как зарубежных, так и отечественных, в деятельности грязевых вулканов выявлены предвестники землетрясений [Shakirov et al., 2004; Алиев, 2006; Yang et al., 2006; Chaudhuri et al., 2012]. Сотрудники ИМГиГ ДВО РАН также установили причинно-следственные связи между деятельностью Южно-Сахалинского грязевого вулкана, динамикой вещественного состава его извержений и региональной сейсмичностью [Ершов, 2012]. Таким образом, в зоне развертываемых геофизических наблюдений присутствует дополнительный источник геолого-геофизической информации.

Наиболее сильные сейсмические события в зоне разлома таковы (с юга на север): Крильонские 1911, 1912, 1921 гг. (M = 4.7-5.1); Анивские 1951 г. (M = 5.5) и 1964 г. (M = 5.0); Перевальско-Синегорские 1923 и 1924 гг. (M = 4.5-4.8); Перевальское 1949 г. (M = 5.2) и Найбинское 1928 г. (M = 4.9), Такойское 2001 г. (M = 5.2). Их эпицентры приурочены преимущественно к районам пересечения Центрально-Сахалинского сбросо-надвига с диагональными разломами [Злобин, Бобков, 2003].

Анивские газовые месторождения приурочены к прибрежной части прогиба зал. Анива [Тютрин и др., 1981]. Тектоническое строение этой части определяется южным окончанием ЦСР и включает в себя Анивскую зону приразломной складчатости. Она представляет собой серию продольных взбросов и взбросо-надвигов западного падения, осложненных поперечными разломами [Тютрин, Дуничев, 1985]. В этой зоне выделяют структуры, представленные на рис. 2. Поисковые работы на месторождении начаты в 1969, а добыча – в 1997 г. В настоящее время АГМ активно разрабатываются, что способствует их истощению, это отражается как в падениях дебитов скважин, так и, вероятно, в характере индуцированной сейсмичности. На рис. 2 продемонстрированы основные разрабатываемые структуры АГМ и сейсмичность в период с 2003 по 2018 г.



Рис. 2. Анивские газовые месторождения (отмечены номерами от 1 до 6) и сейсмичность выделенной зоны в период с 2003 по 2018 г. Структуры наиболее освоенные: 1 – Восточно-Луговская, 2 – Южно-Луговская, 3 – Золоторыбная, 4 – Заречная. Структуры перспективные и разрабатываемые в настоящее время: 5 – Луговская, Петропавловская, 6 – Южно-Таранайская и Бачинская. Кружками отмечены сейсмические события. **Fig. 2.** Aniva gas fields (numbers 1–6) and seismicity of the selected zone in the period from 2003 to 2018. Structures: 1 – Vostochno-Lugovskaya, 2 – Yuzhno-Lugovskaya, 3 – Zolotorybnaya, 4 – Zarechnaya; the most developed. Structures: 5 – Lugovskaya, Petropavlovskaya, 6 – Yuzhno-Taranayskaya and Bachinskaya; are perspective and under developed now. Circles marked seismic events.

Монтаж и запуск аппаратуры наблюдения

Предварительно было проведено тестирование сейсмических пунктов полигона в с. Петропавловское для определения уровня шумов, а также корректного определения станционных поправок. Для этого в разных местах полигона (на фундаменте в помещении и на грунте) производились двухчасовые записи сейсмического шума с целью определения уровня различных естественных и антропогенных помех (акселерометр CMG-5TDE со встроенным регистратором фирмы Guralp (Великобритания) [Мишаткин и др., 2011; Peterson, 1993]. Для расчета спектральной плотности сейсмических шумов использовался программный комплекс DIMAS (Display, Interactive Manipulation and Analysis of Seismograms) [Дрознин, Дрознина, 2010]. Тестирование показало, что уровень шумов, даже в «полевом» варианте установки, находится практически в пределах допустимых значений и что размещение сейсмических станций на выбранных площадках полигона приемлемо [Kostylev et al., 2019].

Для изучения строения верхней части геологического разреза и детального уточнения состава и свойств почв полигона были проведены совместно с КФ ФИЦ ЕГС РАН сейсморазведочные работы и эманационная съемка в местах размещения оборудования [Макаров и др., 2018].

Началом работы пункта можно считать 10 июня 2018 г., когда была начата регистрация данных после установки молекуширокополосного сейсмометра лярного с регистратором NDAS-8226. CME-6111 СМЕ-6111 – высокоточный широкополосный (частотный диапазон 0.016 Гц (60 c) – 50 Гц) характеризующийся сейсмометр, низким собственным шумом, высокой линейностью и широким динамическим диапазоном. Наличие силовой обратной связи гарантирует высокую температурную и временную стабильность параметров [Агафонов и др., 2013]. Регистратор сигналов NDAS-8226 - 24-разрядная сейсмическая система сбора данных, преимущественно оптимизированная для автономной регистрации сейсмических данных в полевых условиях. Систему отличают простота в использовании и надежность в сочетании с высокими техническими характеристиками. Для передачи данных и конфигурирования системы используются USB и Wi-Fi соединения; 32 Гб внутренней памяти позволяют вести длительную регистрацию данных в автономном режиме. Система оснащена высокоточным кварцевым генератором с привязкой к абсолютному времени с помощью GPS/ГЛОНАСС.

24 октября 2018 г. на пункте наблюдений был проведен монтаж прототипа молекулярно-электронного гидрофона, изготовленного (в рамках проекта РФФИ) МФТИ совместно с компанией «Р-Сенсорз» [Авдюхина и др., 2018]. Для монтажа гидрофона на полигоне была построена специальная самообводняющаяся скважина глубиной 3.5 м. Скважина обсажена перфорированной пластиковой трубой 110 мм. Установленный гидрофон представляет собой устройство для измерения давления в акустической волне в жидких и газообразных средах. Гидрофон выполнен с использованием электрохимического преобразователя движения рабочей жидкости в регистрируемый ток, обеспечивающий чувствительность к вариациям давления в полосе частот 0.02-200 Гц с высоким коэффициентом преобразования на уровне не менее 1.5 мВ/Па.

Технология молекулярно-электронного переноса предлагает альтернативу типичэлектромеханическим устройствам ным и предоставляет возможность регистрации сейсмических данных с помощью компактных, надежных, простых в установке приборов. Принципы действия таких приборов основаны на вариациях переноса заряда, обусловленных перемещением электролита в электрохимической ячейке, состоящей из 4 электродов. Ячейка заполнена высококонцентрированным раствором электролита, а между указанными электродами приложена небольшая постоянная разность потенциалов. В этой системе электролит играет роль инерционной массы. Внешнее ускорение вдоль осей датчика приводит электролит

в движение, тем самым изменяя ток между анодом и катодом [Агафонов и др., 2013; Авдюхина и др., 2018]. Более подробно результаты работы инновационного оборудования на Сахалине представлены в [Kostylev et al., 2019].

Для обеспечения удаленного доступа и управления работой регистрирующего оборудования используется 4G модем-маршрутизатор, который позволяет управлять работой системы через Интернет. Модеммаршрутизатор подключается к NDAS-8226 с помощью Wi-Fi-соединения и, значит, не зависит от местоположения регистратора. Питание системы обеспечивается 12-вольтовым источником питания с внешним аккумулятором, что гарантирует работу комплекса в случае отключения электроэнергии. Вся информация сохраняется в базе данных, содержащей записи волновых форм, полученные от сейсмологического оборудования, а также сведения об уровне концентрации подпочвенного радона, атмосферном давлении, температуре воздуха и влажности почвы. Схема комплекса приведена на рис. 3.

С целью мониторинга техногенно-индуцированной сейсмичности АГМ была развернута временная сеть из короткопериодных сейсмостанций в с. Таранай и с. Петропавловское Анивского района, состоящая из регистраторов Дельта-03 и сейсмометра СПВ-3к (рис. 3). В настоящее время данная сеть проходит модернизацию, с увеличением количества станций и обеспечением удаленного доступа к ней.

Пункты мониторинга подпочвенного радона на юге Сахалина

Первые пункты наблюдения в окрестности южного сегмента ЦСР были организованы в 2018 г. благодаря сотрудничеству трех организаций – КФ ФИЦ ЕГС РАН, СФ ФИЦ ЕГС РАН и ИМГиГ ДВО РАН [Makarov et al., 2018]. Были запущены непрерывные наблюдения за уровнем подпочвенного радона в следующих населенных пунктах: г. Южно-Сахалинск, с. Ожидаево, с. Петропавловское. В 2019 г., в тестовом режиме, ИМГиГ ДВО РАН открыл еще один пункт наблюдения – в с. Быков, в ближайшее время планируется запуск аппаратуры наблюдения за подпочвенным радоном в с. Таранай.

Регистрация осуществляется с помощью радиометра RADEX MR107 (ООО «КВАРТА-РАД»), предназначенного для оценки эквивалентной равновесной объемной активности радона (OA Rn) и дочерних продуктов его изотопов по величине ОА Rn в воздухе жилых и общественных помещений. Для мониторинга уровня подпочвенного радона с помощью прибора MR107 применили метод принудительной конвекции с помощью откачки подпочвенного воздуха из измерительного шпура компрессором в накопительную камеру, где установлен прибор [Уткин, Юрков, 2010; Козлова, Юрков, 2005] (рис. 4). С помощью такой архитектуры оборудования удается существенно снизить уровень помех, оказывающих влияние на измерения вариаций температуры воздуха, атмосферного давления и влажности почвы [Рудаков, 2009].



Рис. 3. Оборудование пункта геофизических наблюдений в селе Петропавловское. **Fig. 3.** The equipment Petropavlovskoe station of geophysical observations.



Рис. 4. Блок-схема (а) и общий вид (б) комплекта для регистрации подпочвенного радона. 1 – перфорированная труба в шпуре; 2 – компрессор; 3 – накопительная камера с прибором MR107; 4 – грунт. **Fig. 4.** The block diagram (a) and general view (b) of the set for registration of subsurface radon. 1 – perforated pipe in the hole; 2 – compressor; 3 – storage chamber with the sensor MR107; 4 – soil.

Результаты наблюдений

Сейсмологические наблюдения в с. Петропавловское ведутся в непрерывном режиме. Результаты наблюдений сохраняются в виде архива волновых форм, который используется для дальнейшего анализа. Для оценки регистрации сейсмических событий в районе южной части Центрально-Сахалинского разлома сейсмометром СМЕ-6111, гидрофоном и регистратором сигналов NDAS-8226, установленными в Петропавловском, использован каталог землетрясений по данным локальной сети СФ ФИЦ ЕГС РАН за период 6 месяцев (с 24.10.2018 по 25.04.2019 г.) в квадрате, ограниченном координатами 46.7-47.5° с.ш. и 142.2-142.7° в.д. Каталог включает в себя 66 сейсмических событий с магнитудой от 1.8 до 3.8. Для временного интервала каждого сейсмического события из архива волновых форм регистратора сейсмических сигналов NDAS-8226 были подготовлены соответствующие записи, их обработку проводили в программном комплексе DIMAS [Дрознин, Дрознина, 2010], разработанном в КФ ФИЦ ЕГС РАН. Для удобства обработки сейсмологических материалов применялись различные виды фильтров.

В результате установлено, что из 66 землетрясений четкая запись вступлений имеется

у 39 событий для волновых форм сейсмометра СМЕ-6111 и у 18 событий, зарегистрированных гидрофоном.

Результаты анализа регистрационных возможностей комплектов оборудования CME-6111 – NDAS-8226 и гидрофон – NDAS-8226 (Петропавловское) приведены на рис. 5, показывающем пространственное распределение событий, зафиксированных комплексом оборудования.

На основе каталогов землетрясений СФ ФИЦ ЕГС РАН была построена карта распределения сейсмических событий в окрестности АГМ в период с 2003 по 2018 г. Данный временной интервал совпадает с наиболее интенсивной стадией освоения месторождений.

Из рис. 2 следует, что в зоне разрабатываемых структур АГМ (блоки 1, 2, 3, 4) за 15 лет в период с 2003 по 2018 г. сейсмических событий практически не наблюдалось. Хотя наибольшее число землетрясений приурочено к ЦСР, тем не менее на северной и южной границе месторождений, на том же удалении от разлома, как и в случае с блоками 1, 2, 3 и 4, зафиксировано гораздо большее число событий. Структуры 1, 2, 3 и 4 разрабатываются достаточно давно и являются зрелыми. По всей видимости, добыча оказывает влияние на напряженно-деформированное со-



Рис. 5. Регистрационные возможности комплектов оборудования пункта наблюдения Петропавловское. А – распределение всех сейсмических событий в выбранном районе за указанный период времени. Залитыми кружочками показаны события, уверенно зарегистрированные комплектом CME-6111 – NDAS-8226 (А) и комплектом гидрофон – NDAS-8226 (Б). Разломы: 1 – Центрально-Сахалинский, 2 – Апреловский. **Fig. 5.** Registration possibilities of the equipment for observation station Petropavlovskoe. 1 – Central Sakhalin Fault,

2 -Aprelovskiy fault.

стояние таким образом, что максимальные напряжения концентрируются на окраинах структур, что и выражается в более высоком уровне сейсмичности на границах месторождения, хотя этот уровень не так высок, как непосредственно на ЦСР. Таким образом, мониторинг АГМ представляет собой перспективную и интересную задачу в рамках наблюдений за геодинамической активностью южного сегмента ЦСР.

В период работы системы мониторинга сильных сейсмических событий не произошло. В то же время можно показать пример реакции уровня подпочвенного радона на небольшое сейсмическое событие с M = 3.3, произошедшее непосредственно на ЦСР 23 июля 2019 г. (рис. 6).

Из рис. 6 следует, что в пункте Южно-Сахалинск уровень радона практически не изменился, основная реакция на сейсмическое событие 23.07.2019 г. с M = 3.3 отмечена в пунктах Ожидаево и Петропавловское. При этом уровень подпочвенного радона понизился 25.07.2019 г. в пункте Петропавловское, а в Ожидаево, наоборот, увеличился с 27.07.2019 г. Данный результат вполне соответствует локальной геодинамической обстановке, которая отражается в смене зон сжатия и растяжения в этом районе ЦСР [Polets, 2019]. Отсутствие реакции на данное событие пункта в Южно-Сахалинске также объяснимо с позиций структурной геологии: Южно-Сахалинск находится восточней разломной зоны (рис. 1), в данном районе, повидимому, активность существенно не изменила уровень подпочвенного радона.

На рис. 7 показаны волновые формы и спектрограммы данного сейсмического

события, полученные с помощью молекулярно-электронного сейсмоприемника СМЕ-6111 и прототипа молекулярно-электронного гидрофона.

Сейсмическое событие уверенно регистрируется как сейсмоприемником СМЕ-6111, так и гидрофоном. При этом нужно отметить, что в данном случае прототипом молекулярно-электронного гидрофона не было обнаружено каких-либо низкочастотных сигналов, предшествующих основному событию, подобных описанным в работах [Borisov et al., 2012; Борисов, Борисов, 2017]. Это отражено в спектрограмме на рис. 7. Основной спектр сейсмического сигнала гидрофона находится в диапазоне 10–40 Гц, сейсмоприемника – 5–30 Гц. В настоящее время специалистами МФТИ с учетом опыта эксплуатации первого прибора сконструирован новый прототип гидрофона, с улучшенными частотными характеристиками, который предстоит испытать в ближайшее время.



😭 Пункты мониторинга подпочвенного радона



Рис. 6. Реакция уровня подпочвенного радона на землетрясение с M = 3.3, произошедшее 23.07.2019. Верхняя часть – обзорная карта. Разломы: 1 – Центрально-Сахалинский, 2 – Апреловский. Нижняя – вариация уровня подпочвенного радона в пунктах Южно-Сахалинск (YSSR), Ожидаево (OJDR), Петропавловское (PETR). Fig. 6. The subsurface radon level change for the earthquake with M = 3.3 occurred on 23.07.2019. The top part is an overview map. 1 – Central Sakhalin Fault, 2 – Aprelovskiy fault. The lower part is the variation of the level of subsurface radon in the stations Yuzhno-Sakhalinsk (USSR), Ozhidaevo (OJDR), Petropavlovsk (PETR).

Геосистемы переходных зон, 2019, т. 3, № 4, с. 390-402



Рис. 7. Волновые формы (справа) и спектрограммы (слева) сейсмического события с M = 3.3, произошедшего 23 июля 2019 г., полученные с помощью молекулярно-электронного сейсмоприемника CME-6111 (цветные волновые формы) и прототипа молекулярно-электронного гидрофона (черная волновая форма). **Fig. 7.** Wave forms (right) and spectrograms (left) of the seismic event with M = 3.3 that occurred on July 23, 2019, obtained from the molecular-electronic seismometer CME-6111 (color wave forms) and the prototype of the molecular-electronic hydrophone (black wave form).

Выводы

За относительно небольшой промежуток времени (полтора года) развернута система комплексных геофизических наблюдений в южной части Центрально-Сахалинского разлома. В настоящее время в выбранном сегменте разлома проводятся непрерывные круглогодичные геофизические исследования, включающие регистрацию сейсмических волн широкополосной и короткопериодными сейсмостанциями и гидрофоном, а также регистрацию уровня концентрации подпочвенного радона. Подобные комплексные геофизические наблюдения являются для Сахалина в определенной степени новыми. В ближайшее время планируется дооснащение пунктов наблюдений, в частности оборудованием для геоэлектрических исследований в пункте с. Петропавловское и гидрофоном с улучшенным частотным диапазоном.

За время работы оборудования получена интересная информация, характеризующая «жизнь» разлома, его геодинамическую активность. Так, выделено несколько аномалий вариаций уровня подпочвенного радона до и после сейсмических событий в наблюдаемом регионе.

Показана необходимость сейсмологических наблюдений за разработкой Анивских газовых месторождений, находящихся в зоне регистрации развернутого оборудования. Поскольку на результаты геофизических наблюдений существенное влияние оказывают такие факторы, как сезонность, вариации метеорологических параметров и др., необходим именно непрерывный мониторинг. В процессе работы апробируется инновационное оборудование, основанное на молекулярно-электронной технологии, как серийное, так и прототипы. Оборудование зарекомендовало себя как перспективное, надежное и удобное в использовании. Совместный анализ сейсмологических, сейсмоакустических и других геофизических данных может быть использован для уточнения среднесрочного прогноза землетрясений на о. Сахалин.

Благодарности

Авторы благодарны студенту Технического нефтегазового института Сахалинского государственного университета Дмитрию Алексеевичу Ващенко за помощь в обработке первичных сейсмологических данных.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) (проект № 18-07-00966А, «Исследование триггерных деформационных эффектов по данным о сейсмичности Сахалина с применением сейсмических датчиков нового типа»).

Список литературы

1. Авдюхина С.Ю., Агафонов В.М., Егоров Е.В. и др. Устройство и принцип действия молекулярноэлектронного гидрофона // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики: Труды XIV Всерос. конф. Санкт-Петербург, 23–25 мая 2018 г. СПб., 2018. С. 621–624.

2. Агафонов В.М., Егоров И.В., Шабалина А.С. Принципы работы и технические характеристики малогабаритного молекулярно-электронного сейсмодатчика с отрицательной обратной связью // Сейсмические приборы. 2013. Т. 49, № 1. С. 5–18. [Agafonov V.M., Egorov I.V., Shabalina A.S. Operating principles and technical characteristics of portable molecularelectronic seismic sensor with negative feedback. Seismic Instruments, 2014, 50(1): 1-8. https://doi.org/10.3103/s0747923914010022]

3. Алиев А.А. Грязевой вулканизм Южно-Каспийского нефтегазоносного бассейна // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2006. № 3. С. 35–51.

4. Борисов А.С., Борисов С.А. Оценка параметров гидроакустических сигналов высокочастотной геоакустической эмиссии в районе Центрально-Сахалинского разлома = Borisov A.S., Borisov S.A. Estimation of parameters of hydroacoustic signals of high frequency geoacoustic emission within Central Sakhalin Fault area // *Геосистемы переходных зон.* 2017. № 3. С. 64–70. doi.org/10.30730/2541-8912.2017.1.3.064-070

5. Булгаков Р.Ф., Иващенко А.И., Ким Ч.У., Сергеев К.Ф., Стрельцов М.И., Кожурин А.И., Бесстрашнов В.М., Стром А.Л., Сузуки Я., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимамото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Я. Активные разломы северо-восточного Сахалина // *Геотектоника*. 2002. № 3. С. 66–86.

6. Воейкова О.А., Несмеянов С.А., Серебрякова Л.И. *Неотектоника и активные разломы Сахалина*. М.: Наука, 2007. 187 с.

7. Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46, № 3. С. 22–34. [Droznin D.V., Droznina S.Y. Interactive DIMAS program for processing seismic signals. Seismic Instruments, 2011, 47(3): 215-224. https://doi.org/10.3103/s0747923911030054]

8. Ершов В.В. Флюидодинамические процессы в зоне Центрально-Сахалинского разлома (по результатам наблюдений на Южно-Сахалинском грязевом вулкане) // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. Т. 3, № 4. С. 345–360. https://doi.org/10.5800/GT-2012-3-4-0078

9. Закупин А.С., Богинская Н.В. Современная сейсмичность в районе Центрально-Сахалинского разлома (юг о. Сахалин): ложная тревога или отодвинутый прогноз? = Zakupin A.S., Boginskaya N.V. Modern seismicity in the area of the Central Sakhalin fault (south of Sakhalin Island): false alarm or postponed prediction? // Геосистемы переходных зон. 2019. Т. 3, № 1. С. 27–34. doi:10.30730/2541-8912.2019.3.1.027-034

10. Злобин Т.К., Бобков А.О. Современная сейсмичность и разломная тектоника юга Сахалина. Южно-Сахалинск: Изд-во СахГУ, 2003. 124 с.

11. Каменев П.А., Заболотин А.Е., Дегтярев В.А., Жердева О.А. Разработка геомеханической модели активного разлома южного Сахалина = Каmenev Р.А., Zabolotin A.E., Degtyarev V.A., Zherdeva O.A. Geomechanical model of South Sakhalin active fault // *Геосистемы переходных зон.* 2019. Т. 3, № 3. С. 287–295. doi.org/10.30730/2541-8912.2019.3.3.287-295

12. Козлова И.А., Юрков А.К. Методические вопросы измерения содержания радона-222 в почвенном воздухе при мониторинговых наблюдениях // Уральский геофизический вестник. 2005. № 7. С. 31–34.

13. Костылев Д.В., Богомолов Л.М., Каменев П.А., Закупин А.С., Богинская Н.В. Комплексный сейсмический мониторинг в районе Анивского газового месторождения // Нефтегазовый комплекс: проблемы и решения: материалы Первой национальной науч.-практ. конф. Южно-Сахалинск: СахГУ, 2018. С. 11–12.

14. Кучай В.К. Современная орогенная структура южной части о. Сахалин // Тихоокеанская геология. 1987. № 1. С. 50–57.

15. Макаров Е.О., Фирстов П.П., Костылев Д.В. и др. Первые результаты мониторинга подпочвенного радона сетью пунктов, работающей в тестовом режиме, на юге острова Сахалин // Вестник КРАУНЦ. Физико-математические науки. 2018. № 5 (25). С. 99–114. doi: 10.18454/2079-6641-2018-25-5-99-114

16. Мельников О.А. Дислокации и сейсмичность южной части зоны Тымь-Поронайского взбросо-надвига // Тектоника, геодинамика, магматизм, металлогения и сейсмичность Тихоокеанского сегмента Земли. Южно-Сахалинск: ИМГиГ ДВО РАН, 2002. С. 50–87.

17. Мишаткин В.Н., Захарченко Н.З., Чебров В.Н. Технические средства сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами // Сейсмические приборы. 2011. Т. 47, № 1. С. 26–51. [Mishatkin V.N., Zakharchenko N.Z., Chebrov V.N. Hardware for the seismic subsystem of the tsunami warning service. Seismic Instruments, 48(1): 16-33. https://doi.org/10.3103/s0747923912010100]

18. Никитенко О.А., Ершов В.В., Перстнева Ю.А., Бондаренко Д.Д., Балогланов Э.Э., Аббасов О.Р. Вещественный состав продуктов деятельности грязевых вулканов Сахалина и Азербайджана: сравнительный анализ = Nikitenko O.A., Ershov V.V., Perstneva Ju.A., Bondarenko D.D., Baloglanov E.E., Abbasov O.R. Substance composition produced by mud volcanoes of Sakhalin Island and Azerbaijan: the first comparison // *Геосистемы переходных зон.* 2018. Т. 2, № 4. C. 346–358. doi:10.30730/2541-8912.2018.2.4.346-358

19. Прытков А.С., Василенко Н.Ф. Деформации земной поверхности острова Сахалин по данным GPSнаблюдений // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9, № 2. С. 503–514. doi:10.5800/GT-2018-9-2-0358

20. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине // *Тихоокеанская геология*. 1999. № 6. С. 59–70.

21. Рудаков В. П. Эманационный мониторинг геосред и процессов. М.: Научный мир, 2009. 175 с.

22. Сапрыгин С.М. Тектоника плит и сейсмичность в Дальневосточном регионе. Южно-Сахалинск: Сахалин. кн. изд-во, 2005. 83 с.

23. Тютрин И.И., Дуничев В.М. Тектоника и нефтегазоносность северо-западной части Тихоокеанского пояса. М.: Недра, 1985. 174 с.

24. Тютрин И.И., Дуничев В.М., Табояков А.Я. Основные геологические результаты поисков нефти и газа на Южном Сахалине // Советская геология. 1981. № 3. С. 37–41.

25. Уткин В.И., Юрков А.К. Радон как индикатор геодинамических процессов // *Геология и геофизика*. 2010. Т. 51, № 2. С. 277–286.

26. Borisov A.S., Borisov S.A., Levin B.W., Sasorova E.V. Hydroacoustic observations of weak earthquakes in shallow waters of the Southern Kuril Islands // *Geodynamics & Tectonophysics*. 2012. Vol. 3(2). P. 103–113. doi:10.5800/GT-2012-3-2-0065.

27. Chaudhuri H., Ghose D., Bhandari R.K., Sen P., Sinha B. A geochemical approach to earthquake reconnaissance at the Baratang mud volcano, Andaman and Nicobar Islands // J. of Asian Earth Sciences. 2012. Vol. 46. P. 52–60. http://dx.doi.org/10.1016/j.jseaes.2011.10.007.

28. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 324, 012009. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012009

29. Levin B.W., Sasorova E.V., Zakupin A.S., Kamenev P.A. Local occurrence of the relationship between variations in the Earth's rotation rate and the dynamics of seismicity: Case study of Sakhalin // *Doklady Earth Science*. 2018. Vol. 483, N 2. P. 1575–1578. https://doi.org/10.1134/ s1028334x18120188

30. Makarov E., Firstov P., Kostylev D. et al. Test mode of operation network of monitoring subsoil radon in the south of Sakhalin // E3S Web Conf. (IX Intern. Conf. "Solar-Terrestrial Relations and Physics of Earthquake Precursors"). 2018. Vol. 62, 03007. DOI: https://doi. org/10.1051/e3sconf/20186203007

31. Peterson J. Observations and modeling of seismic background noise. U.S. Geol. Survey Open-File Report. 1993. N 93-322. 94 p. https://doi.org/10.3133/ofr93322

32. Polets A.Yu. The stress state of the Sakhalin Island and adjacent territories // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019. Vol. 324, 012010. https:// doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012010

33. Shakirov R., Obzhirov A., Suess E., Salyuk A., Biebow N. Mud volcanoes and gas vents in the Okhotsk Sea area // *GeoMarine Letters*. 2004. Vol. 24(3). P. 140–149. http://dx.doi.org/10.1007/s003670040177y

34. Yang T.F., Fu C.C., Walia V. et al. Seismogeochemical variations in SW Taiwan: multiparameter automatic gas monitoring results // *Pure and Applied Geophysics*. 2006. Vol. 163(4). P. 693–709. https://doi.org/10.1007/ s00024-006-0040-3

Об авторах

КАМЕНЕВ Павел Александрович (ORCID 0000-0002-9934-5855), кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЦКП, БОГИНСКАЯ Наталья Владимировна (ORCID 0000-0002-3126-5138), научный сотрудник лаборатории сейсмологии, ЗАКУПИН Александр Сергеевич (ORCID 0000-0003-0593-6417), кандидат физикоматематических наук, заместитель директора, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии – Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск; КОСТЫЛЕВ Дмитрий Викторович (ORCID 0000-0002-8150-9575), начальник отдела сейсмических стационаров, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», аспирант, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск.