



УДК 550.370+550.379+550.34016

<https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.115-131>
<https://www.elibrary.ru/bogdqg>

Наблюдения обратного сейсмoeлектрического эффекта II рода при электрозондированиях в районе Центрально-Сахалинского разлома*

Л. М. Богомолов*¹, Д. В. Костылев^{1,2}, Н. В. Костылева¹, С. А. Гуляков¹,
И. П. Дудченко¹, П. А. Каменев¹, Н. С. Стобун¹

*E-mail: bleom@mail.ru

¹ Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия

² Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия

Резюме. Представлены результаты экспериментов по электрозондированию приповерхностного слоя земной коры в разломной зоне с регистрацией сейсмоакустических и сейсмических шумов в ближней зоне у источника (возбуждающего диполя). Эксперименты проведены в 2021–2022 гг. в южной части Центрально-Сахалинского разлома с использованием разработанного в ИМГиГ ДВО РАН источника электрических импульсов, мощностью до 3 кВт. Цель была исследовать сейсмоакустические проявления реакции среды на зондирование импульсами тока силой 5–13 А. Генераторное устройство обеспечивало силу тока в диполе существенно выше ее характерных значений в случае зондирования при электроразведке методами сопротивлений, а также при обычной сейсмoeлектроразведке. При этом диапазон токовых амплитуд был намного меньше, чем в случае глубинных зондирований с использованием геофизических МГД-генераторов или сверхмощных электроимпульсных устройств. До настоящего времени обратный сейсмoeлектрический эффект оставался практически неисследованным при токах в «промежуточном» диапазоне ~10 А и при масштабах порядка нескольких сотен метров. Наличие или отсутствие реакции среды на электрозондирования устанавливалось по записям молекулярно-электронных приборов (производитель ООО «R-sensors», Россия): широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 и гидрофона, установленных на расстоянии около 50 м от одного из полюсов возбуждающего электрического диполя. Обнаружено возрастание среднего уровня сейсмоакустического шума при электрозондированиях, что по существу является разновидностью обратного сейсмoeлектрического эффекта II рода (возбуждение упругих волн при прохождении электрического тока в двухфазной среде). Подобное проявление реакции среды в ближней зоне около одного из электродов диполя на пропускание импульсов тока ранее не отмечалось. При этом прирост уровня шума происходит практически без задержек после начала электрозондирований, что находится в соответствии с ранее полученными результатами об откликах сейсмоакустической эмиссии на мощные импульсы тока, которые применялись для глубинных зондирований в Северном Тянь-Шане.

Ключевые слова: электрозондирование, сейсмический шум, сейсмоакустическая реакция среды, сейсмoeлектрический эффект

Observations of the inverse seismoelectric effect of the second kind during electrical sounding in the Central Sakhalin fault zone*

Leonid M. Bogomolov*¹, Dmitry V. Kostylev^{1,2}, Natalya V. Kostyleva¹, Sergey A. Gulyakov¹,
Ilya P. Dudchenko¹, Pavel A. Kamenev¹, Nikolay S. Stobun¹

*E-mail: bleom@mail.ru

¹ Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

² Sakhalin Branch, FRC “United Geophysical Survey of RAS”, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia

* Полный текст данной статьи на английском языке размещен на сайте журнала [The full text of this article in English can be found on the website of the «Geosystems of Transition Zones» journal]: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-2-1.pdf>

Abstract. The results of experiments on electrical sounding of the near-surface layer of the Earth's crust in the fault zone, which have involved a recording of seismoacoustic and seismic noise in the close zone near the source (the primary dipole source), are represented. The experiments were carried out in 2021-2022 in the southern part of the Central Sakhalin fault with the use of the generator of electric pulses developed at IMGG FEB RAS, output electric power being up to 3 kW. The aim was to reveal seismoacoustic signatures of the medium reaction to the soundings with current pulses of 5–13 A. The generator provided significantly higher current in the dipole than its typical characteristics in the case of soundings for electrical exploration by resistance methods, as well as in the case of conventional seismic and electrical exploration. At the same time, the range of current amplitudes was much smaller in comparison with the case of a deep sounding based on application of geophysical MHD generators or other extra high-power electric pulses units. Up to now, the inverse seismoelectric effect has remained practically unexplored at currents in the “intermediate” range of ~10 A and scale lengths of the order of few hundreds of meters. The presence or absence of the medium reaction to electrical soundings was distinguished by the records of molecular-electronic devices developed by R-sensors LLC: the CME-6111 broadband seismometer and the hydrophone, installed at a distance of about 50 m from one of the poles of the electric dipole source. An increase in the average level of seismoacoustic noise during electrical soundings was revealed, which is essentially a variety of the inverse seismoelectric effect of the second kind (excitation of elastic waves during an electric current run in a two-phase medium). Previously, no similar signature of medium reaction to the current pulses was noted in the close zone adjacent to one of the dipole electrodes. The noise level increase occurs almost without delay after the start of electrical soundings, and this is in accordance with the previously obtained results on the responses of seismic acoustic emission to powerful current pulses, which were used for a deep sounding in the Northern Tien Shan.

Keywords: electrical sounding, seismic noise, medium seismoacoustic reaction, seismoelectric effect

Для цитирования: Богомолов Л.М., Костылев Д.В., Костылева Н.В., Гуляков С.А., Дудченко И.П., Каменев П.А., Стовбун Н.С. Наблюдения обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода при электроразведках в районе Центрально-Сахалинского разлома. Геосистемы переходных зон, 2023, т. 7, № 2, с. 115–131. <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.115-131>; <https://www.elibrary.ru/bogdqg>

For citation: Bogomolov L.M., Kostylev D.V., Kostyleva N.V., Gulyakov S.A., Dudchenko I.P., Kamenev P.A., Stovbun N.S. Observations of the inverse seismoelectric effect of the second kind during electrical sounding in the Central Sakhalin fault zone. *Geosistemy perekhodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2023, vol. 7, no. 2, pp. 115–131. (In Russ. & Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtr.2023.7.2.115-131>; <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2023-2-1.pdf>

Благодарности

Авторы признательны Ю.В. Марапульту и С.Б. Турунтаеву за предоставленную возможность провести эксперименты на площадках стационара «Карымшина» и ГФО «Михнево», А.С. Закупину за обсуждение результатов.

Acknowledgements

The authors are grateful to Yury V. Marapulets and Sergey B. Turuntayev for the opportunity to conduct experiments at the sites of the «Karymshyna» station and «Mikhnevo» GPO, and to Alexander S. Zakupin for discussing the results.

Введение

Взаимодействие между сейсмическими волнами и электрическими полями уже долгое время представляет практический интерес, поскольку может стать основой новых методов изучения глубинных процессов. Сейсмическое и электрическое поля – одни из самых изученных типов физических полей, которые существуют в геофизической среде, широко используются на практике и которые можно эффективно создавать и измерять. Тем не менее сложность геомеханических и физических процессов в неоднородных средах, их восприимчивость к внешним воздействиям физических полей определяют актуальность дальнейшего исследования преобразований этих полей [1].

Различают два рода сейсмоэлектрических эффектов: первый – изменение электросопротивления пород при воздействии упругих полей (прохождении сейсмических волн), родни эффекту микрофона, а второй – возникновение электрического поля, т.е. градиента разности потенциала, в среде при таком же воздействии. Прямой сейсмоэлектрический эффект второго рода был открыт А.Г. Ивановым при полевых геофизических исследованиях в 1939–1940 гг. [2, 3]. Он обнаружил возникновение электризации при прохождении упругих волн через влажную горную породу и предположил, что природа сейсмоэлектрического эффекта связана с тем, что на границе раздела жидкой и твердой фаз (минерального раствора и твердых частиц горной породы) присутству-

ет двойной электрический слой, одна часть которого, обращенная к жидкости, сдвигается за счет перепада давлений. Модель сейсмоэлектрических эффектов была предложена в работах [4, 5], где дано объяснение возникающей разности электрических потенциалов при прохождении упругих волн. Эта модель (названная по имени авторов моделью Френкеля–Био) получила дальнейшее развитие в работах [6, 7] и др. Современные теоретические представления о сейсмоэлектрических эффектах детально описаны в монографии [8].

Наличие сейсмоэлектрического эффекта II рода подтверждено в недавних работах [9, 10] при одновременной регистрации сейсмических колебаний и вертикальной компоненты напряженности электрического поля на земной поверхности. Исследования в геофизической обсерватории Института динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН «Михнево» показали, что распространение сейсмических волн в большинстве случаев сопровождается вариациями напряженности электрического поля на земной поверхности. Исключением являются периоды сильных возмущений электрического поля в виде атмосферных явлений (холодные фронты, сильный ветер и др.), когда сейсмоэлектрические эффекты невозможно выделить [11].

Обратный сейсмоэлектрический эффект II рода – возбуждение упругих волн при прохождении электрического тока – в меньшей степени привлекал внимание исследователей (хотя стоит упомянуть использование этого эффекта для оконтуривания месторождений углеводородов и подземных вод, а также для уточнения границ раздела между этими жидкостями). Так обстояло дело до проведения на полигонах в Центральной Азии в 1980-х годах электроразведок земной коры с применением наиболее мощных источников тока – геофизических МГД-генераторов [12, 13]. В этих и последующих работах, посвященных электроразведкам, например [14, 15], были получены статистически значимые результаты о пространственно-временном изменении сейсмического режима после подачи импульсов тока в земную кору через заземленный диполь. Аналогичные результаты были получены и для зондирований с использованием менее

мощного источника – электроразведочной генераторной установки, которые проводились в 2000–2005 гг. на Бишкекском геодинамическом полигоне в Киргизии [16]. Эти результаты можно охарактеризовать как проявление обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода, особенностью которого является наличие задержки во времени после начала электрического воздействия и наличие неупругой деформации среды (источника стимулированных сейсмических сигналов). Реальность электромагнитного триггера неупругой деформации геоматериалов вследствие обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода была подтверждена в лабораторных экспериментах на нагруженных породных образцах [17, 18].

Однако механизм воздействия импульсов тока на сейсмические очаги до конца не выяснен. Сложность разработки модели сейсмоэлектрических взаимодействий обусловлена необходимостью учета разных по природе процессов в неоднородных средах и средах, состоящих из твердого скелета и внутрипоровой жидкости. В таких средах при воздействии внешнего электрического поля возбуждаются сторонние по отношению к приложенному полю силовые поля различной физико-химической природы. Существенный вклад вносят эффекты вызванной поляризации [19], а также электрокинетические и/или электрохимические эффекты [11, 20]. Для продвижения к модели, объясняющей сейсмоэлектрический эффект II рода при электроразведках среды, крайне важно получение новых данных об этом эффекте, включая разные уровни силы тока, длительности воздействия и масштабов среды.

В Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН в 2020 г. начали проводить малоглубинные электроразведки земной коры на геофизическом полигоне «Петропавловское», расположенном в южной части Центрально-Сахалинского разлома [22]. В качестве источника тока использовался генератор импульсных напряжений (разработан в ИМГиГ ДВО РАН, описание в [22]), нагруженный на возбуждающий диполь с разном электродов 408 м. Были получены записи сейсмического и сейсмоакустического шума, по которым можно проследить реакцию сре-

ды на воздействие серий токовых импульсов. Для дальнейших исследований проявлений обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода и выявления его особенностей в разломных зонах необходимо накопление данных о реакции среды на электротондирования – о возрастании амплитуды сейсмоакустических и сейсмических шумов. С этой целью в 2021 и 2022 гг. эксперимент на полигоне «Петропавловское» был продолжен, было проведено 3 серии электротондирований. Полученные результаты анализируются в данной работе. Также обсуждаются возможности и проблемы сейсмоэлектрического мониторинга сегмента активного разлома на основе разработанного источника электротондирований и переносных сейсмических или сейсмоакустических станций.

Аппаратурное обеспечение зондирований

Экспериментальные малоглубинные зондирования проводились на комплексном геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН у с. Петропавловское Анивского района о. Саха-

лин, в южной части Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР) [23]. Оценка реакции среды на электротондирование определялась по записям молекулярно-электронных приборов (производитель ООО «R-sensors», Россия): широкополосного сейсмометра СМЕ-6111 и гидрофона [23, 24], установленных на этом полигоне на расстоянии около 50 м от одного из полюсов возбуждающего электрического диполя.

Использование перечисленного оборудования позволяет выявлять реакцию среды на электротондирования по сигналам в широком частотном диапазоне. При этом гидрофон может регистрировать высокочастотные сигналы, источники которых находятся на расстоянии не более нескольких сотен метров (из-за сферической расходимости и затухания волн). Сейсмометр СМЕ-6111 предназначен для регистрации сейсмических волн на частотах 1–50 Гц, источники которых на глубинах как минимум несколько километров. В ближней зоне около места размещения приборов источники сейсмических сигналов отсутствуют. Таким образом, сочетание сейсмометра и гидрофона позволяет сравнивать реакцию среды на электротондирования на разных расстояниях воз-

буждающего диполя. Общая схема расположения комплексного полигона «Петропавловское», сейсмических станций и разломных структур южного Сахалина [25] приведена на рис. 1. На этом же рисунке (врезка А) показано положение возбуждающего электрического диполя АВ, образованного двумя заземленными электродами. Для привязки к местности также указаны координаты реперной точки.

Нужно отметить, что на заключительном этапе эксперимента в ноябре 2022 г. сейсмометр СМЕ-6111 был вынужденно перемещен из сейсмокамеры [1] на бетонный постамент. Из-за этого снизилась степень защиты прибора от воздействия внешних помех, несмотря на оснащение прибора защитным кожухом.

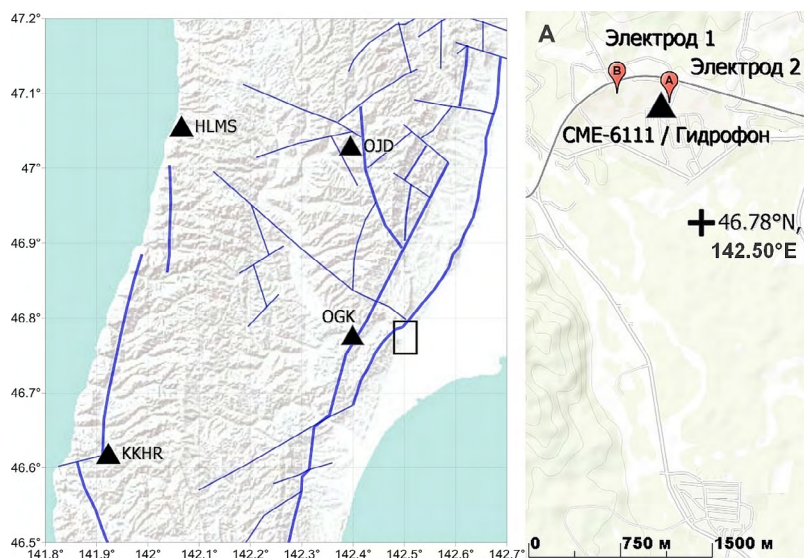


Рис. 1. Расположение геофизического полигона «Петропавловское» (прямоугольник) и сейсмических станций сети СФ ФИЦ ЕГС РАН (черные треугольники) на карте южного Сахалина. Синие линии – тектонические разломы, согласно [25]. Врезка (справа): размещение заземляющих электродов 1 (полюс В) и 2 (полюс А) и сейсмических приборов на территории полигона.

Fig. 1. The location of the Petropavlovskoye geophysical test site (rectangle) and seismic stations of the network of the SB UGS RAS (black triangles) on the map of southern Sakhalin. The blue lines are tectonic faults, according to [25]. Inset (right): Positions of earthing electrodes 1 (pole B) and 2 (pole A) and seismic instruments in the test site.

Особенности методики проведения электрозондирований

Эксперимент проводился в 4 этапа в течение 2020–2022 гг. Информация о времени зондирований и параметрах импульсов тока на каждом этапе приведена в таблице. Методика зондирований описана в статье [23], посвященной первому этапу эксперимента. На всех этапах для возбуждения в земле импульсов тока использовался один и тот же диполь АВ длиной 408 м. Сопротивление нагрузки, получающееся в результате растекания тока в среде, было определено с помощью тестера «Измеритель сопротивления изоляции», модель MS5209, оно составило 38 Ом. Величина сопротивления контролировалась перед началом каждого этапа эксперимента. Было установлено, что длительное пребывание в увлажненном грунте электродов, изготовленных из нержавеющей стальных труб, практически не повлияло на так называемое «кажущееся сопротивление», складывающееся из сопротивления на контактах электродов с землей и собственно сопротивления распределенной нагрузки.

При подготовке к экспериментам 2021–2022 гг. для устранения недостатков, выявленных на первом этапе в 2020 г., было усовершенствовано генераторное устройство для электрозондирований. Работоспособность устройства была проверена в серии испытаний на площадке в ИМГиГ ДВО РАН с применением макетной нагрузки с сопротивлением 38 Ом, как и у диполя на полигоне «Петропавловское». Разработанное и усовершенствованное в ИМГиГ ДВО РАН устройство получило название ИЭИГ-7-400 – источник электроимпульсов геофизический с номи-

нальным током 7 А и максимальным напряжением 400 В. Структурная схема ИЭИГ, используемого на втором и третьем этапах эксперимента, показана на рис. 2. В устройстве используется генератор переменного тока с выходным значением напряжения 230 В и частотой 50 Гц в качестве первичного источника электропитания. Переменное напряжение с выхода первичного генератора подается на блок питания CSP-3000-400¹, с помощью которого происходит преобразование напряжения в постоянное с амплитудой 400 В, что обеспечивает силу тока до 7.5 А. Напряжение с блока питания далее подается через прерыватель тока на электрический диполь, в соответствии с программой управления. Особенностью прерывателя тока в ИЭИГ является применение мощного электронного IGBT-ключа [23], способного коммутировать ток до 40 А и выдерживать напряжение до 1200 В. Запас по напряжению необходим для предотвращения выхода из строя полупроводникового ключа прерывателя из-за отрицательного коммутационного перенапряжения, возникающего при отключении цепи вследствие растекания тока с полюсов диполя (наличия эквивалентной индуктивности). Для защиты от электромагнитных наводок в полевых условиях, нарушающих управление по программе, прерыватель экранирован специальным защитным покрытием.

Напряжение с блока питания через прерыватель тока подается на электрический диполь, согласно управляющей программе. На всех этапах эксперимента, начиная со второго (см. таблицу), устройство ИЭИГ-7-400 было размещено вблизи электрода 2 (полюса А).



Рис. 2. Структурная схема источника электроимпульсов ИЭИГ-7-400, использованного при электрозондированиях в периоды 15–18 ноября 2021 г. и 25–28 апреля 2022 г.

Fig. 2. The block diagram of the IEIG-7-400 source of electric pulses, used for electrical sounding in the periods of November 15–18, 2021 and April 25–28, 2022.

¹ MW, 3000W Power Supply with Single Output. CSP-3000 series. URL: <http://www.mean-well.ru/uploads/files/datasheets/CSP-3000-400.pdf> (accessed 10.03.2023).

Таблица. Параметры зондирований на комплексном геофизическом полигоне у с. Петропавловское, о Сахалин
Table. Sounding parameters at the geophysical test site near the Petropavlovskoye village, Sakhalin Island

№ этапа	Дата зондирований	Время начала (UTC)	Источник импульсов тока	Среднее напряжение, В	Средняя амплитуда тока, А
1	29.10.2020 29.10.2020	00:15 01:45	Модуль PF1000A-360	360	4.9
2	15.11.2021 16.11.2021 17.11.2021 18.11.2021	00:50 02:45 09:29 00:33	Генератор 230 В АС с блоком CSP-3000-400	300	5.1
3	25.04.2022 26.04.2022 27.04.2022 28.04.2022	02:20 00:30 07:36 23:39	Генератор 230 В АС с блоком CSP-3000-400 в режиме источника тока	200-400	5.9
4	07.11.2022 08.11.2022 09.11.2022 10.11.2022	01:39 07:18 01:47 01:05	Источник ИИН-25-540: трехфазный генератор АС с выпрямителем	540	13

Примечание. На каждом этапе время зондирования и параметры импульсов тока одинаковы: серия в 200 имп. 20 с длительности с паузами 20 с.

Note. The sounding time and current pulse parameters are the same at each stage: a series of 200 pulses with a duration of 20 s and pauses of 20 s.

На втором и третьем этапах эксперимента аппаратура работала в повторно-кратковременном режиме, с чередованием импульсов тока и бестоковых пауз. При электрозондированиях 15–18 ноября импульсы генерировались однократными сериями по 200 импульсов с равной длительностью тока и бестоковой паузы по 20 с. Таким образом, сеанс электрозондирований занимал около 2.2 ч. 15, 16 и 18 ноября сеанс проводился в светлое время суток, начало было приурочено к полудню, который в данном районе наступает около 13:40 местного времени (2.40 UTC), а 17 ноября зондирования проводились незадолго до астрономической полуночи. В ходе зондирований осуществлялся непрерывный контроль тока и напряжения непосредственно на электродах, для чего была проложена отдельная линия к электроду 2. В каждом отдельном импульсе ток снижался с максимального значения ~7 А в начале до ~5 А в конце. На протяжении сеанса происходило плавное снижение максимальной амплитуды тока, которое компенсировалось ручной подстройкой напряжения модуля CSP-3000-400 во время бестоковых пауз. В период бестоковой паузы отмечалось остаточное напряжение на нагрузке (диполе АВ), величина которого была ~10 В в начале паузы, постепенно уменьшаясь до следующего импульса

тока. После последнего импульса в сеансе напряжение на электродах сохранялось.

Существенное отличие третьего этапа эксперимента от двух предшествующих заключается в использовании блока питания CSP-3000-400 в режиме источника тока, а не источника напряжения. Данное решение устранило непостоянство силы тока (снижение с 7 до 5 А) в ходе отдельного импульса. Для поддержания постоянного значения силы тока использован метод широтно-импульсной модуляции. Однако этот метод приводит к некоторому уменьшению амплитуды напряжения. Для отслеживания изменений амплитуды тока и напряжения при электрозондированиях применялась фото- и видеофиксация показаний измерительных приборов. В дальнейшем предполагается автоматизация измерений электрических параметров.

На рис. 3 представлены устройство для электрозондирований ИЭИГ-7-400, размещенное вблизи электрода 2, и электрод 1 с подключенным к нему геофизическим кабелем.

На четвертом, завершающем этапе эксперимента потребовалось увеличить ток и напряжение в импульсах, подаваемых на возбуждающий диполь, чтобы возможная деградация реакции среды на повторные воздействия, аналогичная эффекту Кайзера, не повлияла на статистику результатов по всем четырем этапам.



Рис. 3. Источник электроимпульсов и измерительная аппаратура, используемая на втором и третьем этапах эксперимента (слева). Стрелка указывает на электрод 1. 15 ноября 2021 г. *Фото И.П. Дудченко*

Fig. 3. The source of electrical pulses and measuring equipment used in the second and third stages of the experiment (left). The arrow points to the electrode 1. November 15, 2021. *Photo by I.P. Dudchenko*

Был учтен опыт многоэтапного проведения электрoзондированиях на Бишкекском геодинамическом полигоне с применением мощной электроимпульсной установки [16].

Характеристики блока питания CSP-3000-400 не позволяли увеличить мощность выдаваемых импульсов, поэтому в источнике зондированиях были сделаны следующие изменения. В качестве первичного источника напряжения на этом этапе эксперимента (ноябрь 2022 г.) использовался трехфазный генератор переменного тока. Напряжение генератора подается на трехфазный выпрямитель с амплитудным значением напряжения 540 В. Трехфазный вы-

прямитель был выполнен в качестве отдельного устройства в корпусе со встроенным автоматическим выключателем и сглаживающим фильтром. С выхода выпрямителя напряжение поступает в блок прерывателя тока, как и в ранее применяемом устройстве ИЭИГ-7-400. На рис. 4 показан внешний вид трехфазного выпрямителя – нового узла по отношению к устройству ИЭИГ-7-400 (рис. 2, 3). При использовании нового источника импульсного напряжения, названного ИИН-25-540 (номинальный ток 25 А, средневывпрямленное напряжение 540 В), действительно удалось повысить силу тока в диполе. При электрoзондированиях

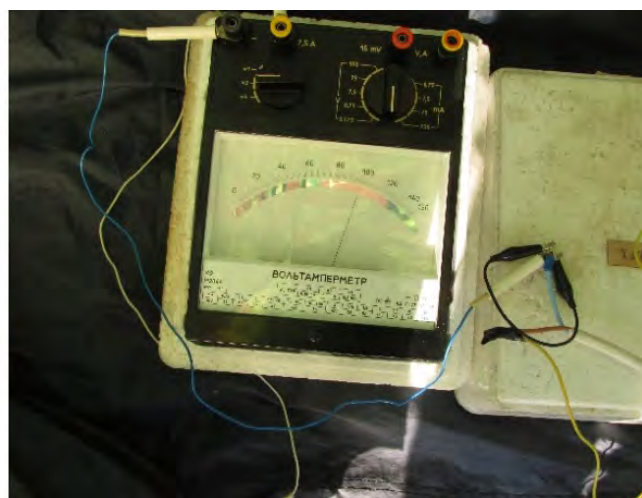


Рис. 4. Внешний вид трехфазного выпрямителя – источника тока в электрoзондированиях 7–10.11.2022 (слева). Регистрация тока 13 А на вольтамперметре в момент отдельного импульса (справа).

Fig. 4. The exterior of three-phase rectifier – a current source in electrical soundings of 7–10.11.2022 (left). Recording of 13 A current on the voltammeter at the moment of a separate pulse (right).

в период с 7 по 10 ноября 2022 г. средняя за серию в 200 импульсов амплитуда тока составила 13 А (рис. 5, справа), что почти в два раза выше ее значений на втором и третьем этапах.

Стоит отметить, что ресурс прерывателя тока позволяет формировать и более мощные импульсы для электроразведки. Но в настоящее время их максимальная мощность ограничена первичным источником напряжения (мобильным генератором переменного тока).

Проявления реакции среды в сейсмическом и сейсмоакустическом шуме

Первоначально был проведен анализ записей сейсмического шума по данным молекулярно-электронного гидрофона в дни проведения электроразведки. Для этого использовалась программа SpectrumSeism, предна-

значенная для анализа спектров сейсмических данных [26]. Построенные с помощью этой программы записи волновых форм сейсмоакустических сигналов в дни проведения электроразведки в ноябре 2021 г. показаны на рис. 5. Время начала и конца интервалов с возрастанием сейсмоакустических шумов на рис. 5 соответствует началу и завершению сеанса зондирования согласно дневнику эксперимента. Таким образом, молекулярно-электронный гидрофон устойчиво зарегистрировал все сеансы с подачей в диполь импульсов тока. По записям волновых форм можно проследить продолжительность сеансов зондирования и даже число импульсов в сеансе.

Для выявления региональных особенностей реакции среды на импульсы тока при зондировании в зоне Центрально-Сахалинского разлома был построен спектр сейсмоакустических сигналов с молекулярно-электронного гидрофона. Использовалась запись сейс-

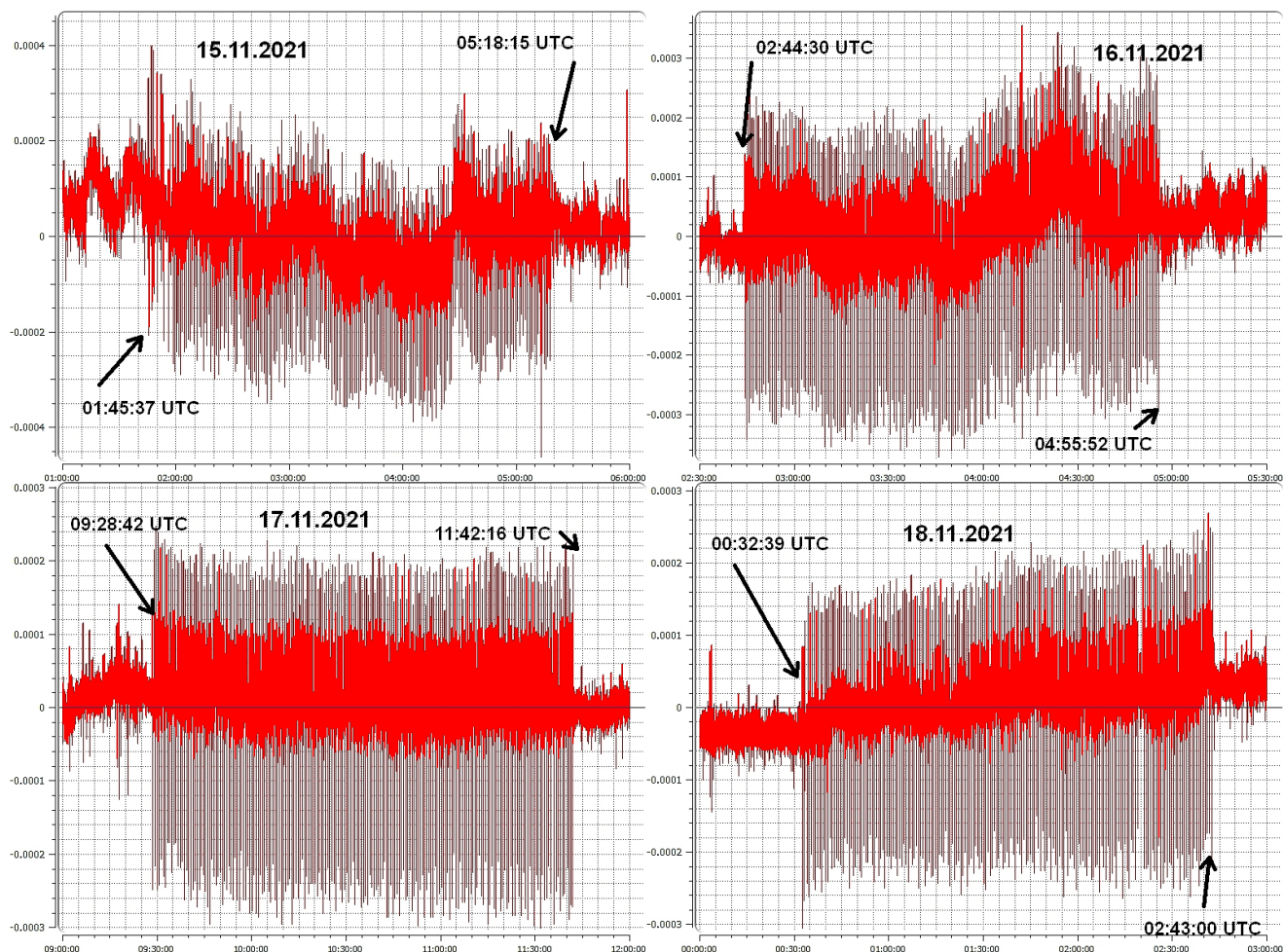


Рис. 5. Волновые формы по записям молекулярно-электронного гидрофона в дни проведения электроразведки в ноябре 2021 г.
Fig. 5. The waveforms given by the molecular-electronic hydrophone on the days of electrical sounding in November 2021.

молекулярного шума в период с 00:00:00 15.11.2021 г. по 06:00:00 18.11.2021 г. (UTC). При спектрально-временном анализе во время сеансов зондирования были выделены отдельные гармоники с частотами 4.27 и 12.5 Гц (рис. 6, верхняя панель). Для этих гармоник анализировалась зависимость спектральной плотности от времени (рис. 6, нижняя панель). Выбор гармоник определялся тем, что в ранее проведенном эксперименте на Бишкекском геодинамическом полигоне [27] как раз на этих частотах были обнаружены сейсмоакустические отклики на электровоздействие по записям скважинного геофона.

На спектре на рис. 6 (вверху) заметна реакция сигналов гидрофона на электрораздирования в частотном диапазоне 3–25 Гц. На более высоких частотах анализ затруднен из-за наличия различных постоянных помех, очевидно техногенного характера. Важно отметить, что описанный ранее в [27] характерный отклик

на внешнее воздействие на частоте 4.27 Гц проявляется и в нашем эксперименте, а вот амплитуда отклика на частоте 12.5 Гц на порядок меньше, хотя он все же имеет место.

Для определения частот, на которых происходит максимальное воздействие упругих колебаний на околотрубное пространство и жидкости внутри обсадной трубы, где установлен молекулярно-электронный гидрофон, были построены частотные зависимости спектральной амплитуды сигнала, зарегистрированного гидрофоном в начале сеансов электрораздирований 15 и 18 ноября 2021 г. (рис. 7).

На рис. 7 видно, что в обоих случаях максимальная плотность спектра приходится на частоты 4.7–4.9 Гц, что может считаться подтверждением чувствительности сейсмоакустических сигналов, регистрируемых гидрофоном, к началу сеанса с серией импульсов тока. Источник сигналов с такой частотой мог находиться на расстоянии не более десятков

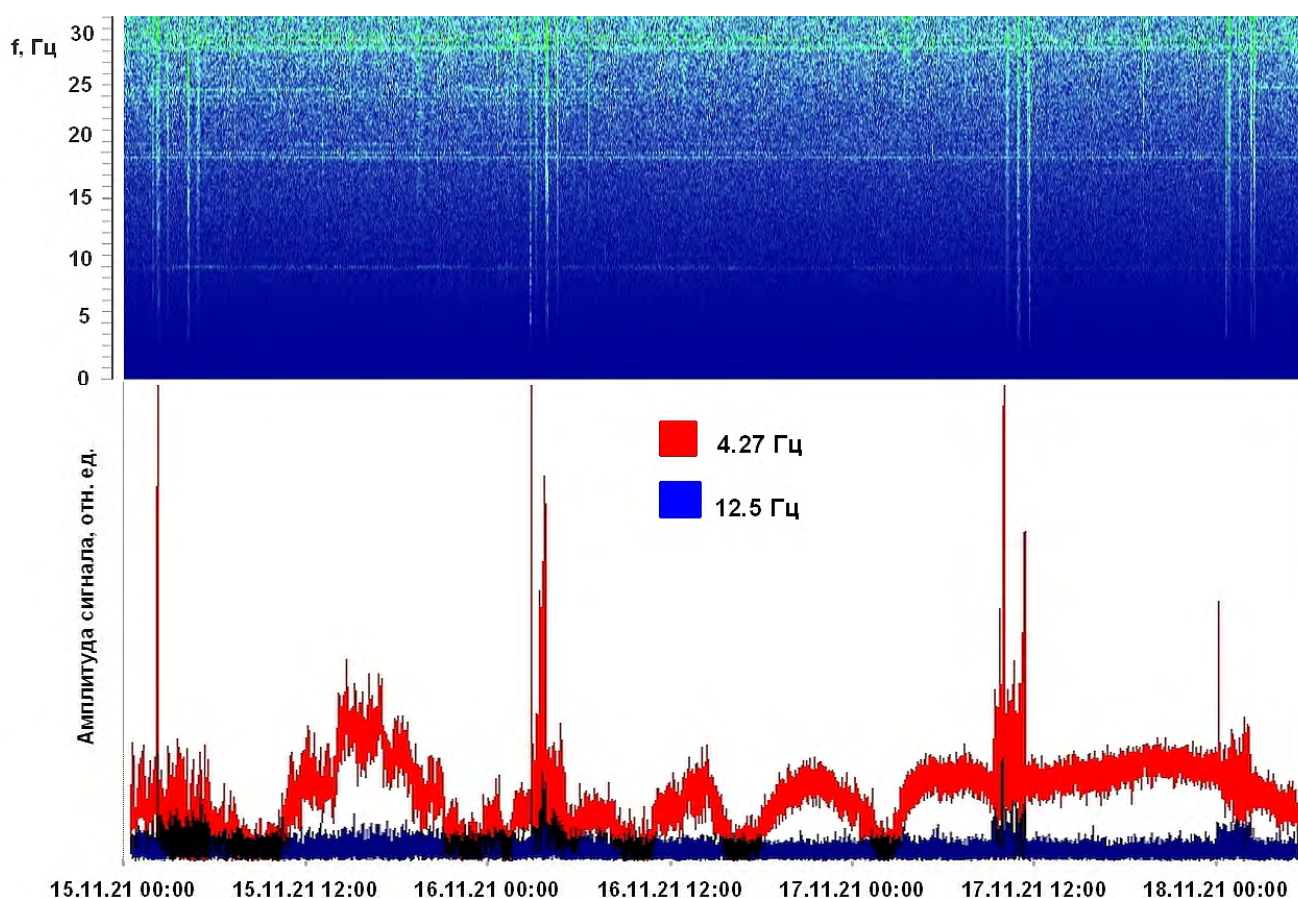


Рис. 6. Спектрограмма сейсмоакустического шума по записям молекулярно-электронного гидрофона (верхняя панель) и спектральная плотность на частотах 4.27 и 12.5 Гц (нижняя панель) на втором этапе эксперимента.

Fig. 6. The spectrogram of seismoacoustic noise recorded by the molecular-electronic hydrophone (top panel) and the spectral density at frequencies 4.27 and 12.5 Hz (bottom panel) at the second stage of the experiment.

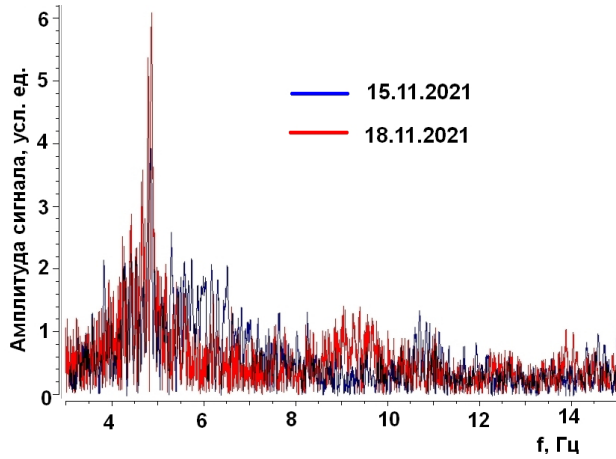


Рис. 7. Спектральный состав сейсмоакустических сигналов в моменты проведения электроразведки по записям молекулярно-электронного гидрофона.

Fig. 7. Spectral density of seismoacoustic signals during electrical sounding according to the records of the molecular-electronic hydrophone.

или нескольких сотен метров от гидрофона, иначе сигналы не могли быть зарегистрированы из-за расходимости и поглощения упругих волн. При электроразведках в 2022 г. (третий и четвертый этапы эксперимента) не было выявлено существенных различий

в записях сейсмоакустического шума по сравнению с вышеизложенными результатами.

Всего в 2021–2022 гг. было проведено 12 сеансов электроразведки (см. таблицу). Для каждого сеанса анализировались сейсмические записи, полученные молекулярно-электронным сейсмометром СМЕ-6111, продолжительностью 4 ч каждая. Период записи охватывает время самого сеанса (2.2 ч), а также интервалы около 1 ч до начала и после завершения электроразведки. Для анализа сейсмических записей использовалась программа SpectrumSeism [26]. Для всех 12 случаев электроразведки записи практически идентичны, небольшие различия заключаются в наличии или отсутствии прочих шумов, не связанных с возбуждением в среде импульсов тока. На рис. 8 показана спектрограмма сейсмических сигналов во время одного из сеансов на втором этапе эксперимента. По рисунку можно четко видеть, что во время сеанса сейсмометр СМЕ-6111 регистрирует увеличение амплитуды сигнала на частотах около 25 Гц, причем на двух близких гармониках.

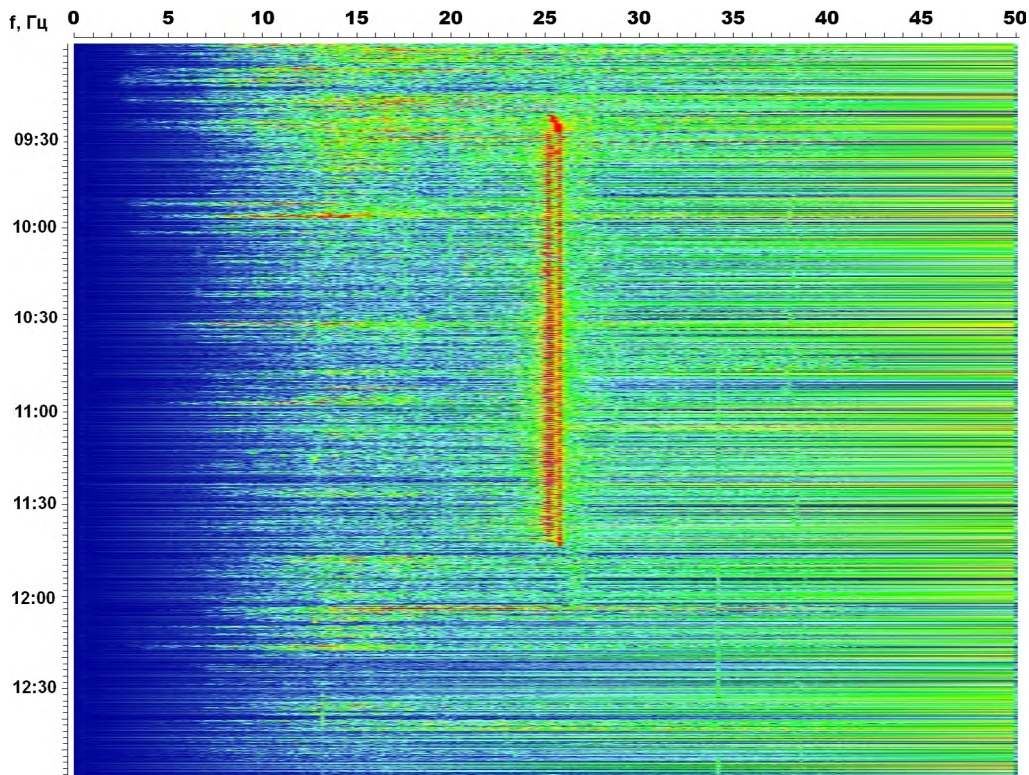


Рис. 8. Спектрограмма записи сейсмического сигнала, зарегистрированного 17.11.2021 по вертикальному каналу сейсмометра СМЕ-6111.

Fig. 8. Spectrogram of the seismic signal record of 17.11.2021, which was recorded on the vertical channel of the CME-6111 seismometer.

Для уточнения значений этих частот с помощью этой же программы для всех 12 случаев построены графики спектральной плотности сейсмических сигналов в произвольное время после начала сеансов электровоздействия. На рис. 9 представлены примеры таких графиков, даты электроразведок – 18.11.2021 и 09.11.2022 гг.

На рис. 9 и на всех остальных полученных графиках также хорошо прослеживаются две гармоники, причем амплитуда первой превышает амплитуду второй. Для частоты, на которой зафиксирована максимальная амплитуда сигнала, построены графики изменения амплитуды этой гармоники со временем в течение 4 ч (также для всех 12 случаев). Два примера таких графиков показаны на рис. 10,

один для третьего этапа электроразведок (см. таблицу), другой для четвертого.

На графиках, показанных на рис. 10, и на аналогичных графиках для других сеансов электроразведок четко видно время начала и конца этих сеансов (совпадающее с записями из дневников экспериментов), а также все случаи, когда в ходе сеансов происходили перерывы или сбои (как, например, 7-минутный перерыв на рис. 10, кадр слева). Влияние электровоздействия отмечено в диапазоне сейсмических частот до 25 Гц, при этом оно проявляется наиболее контрастно для отдельных гармоник. Параметры импульсов тока на разных этапах эксперимента и в разные дни зондирования на каждом этапе несколько отличались друг от друга по амплитуде тока, поляр-

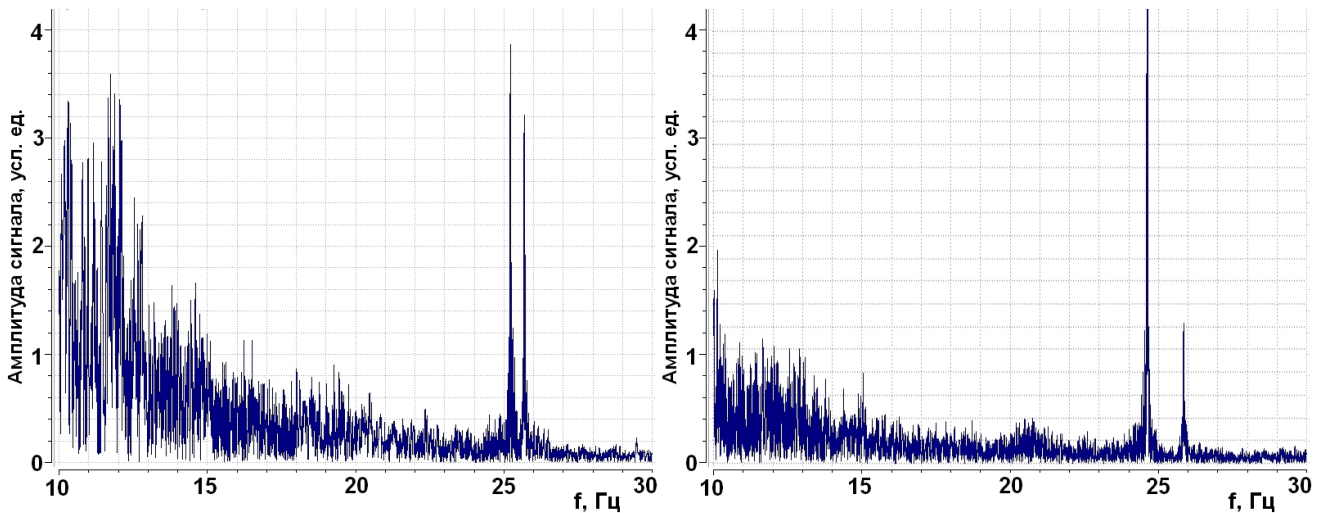


Рис. 9. Спектральная плотность сигнала в периоды проведения электроразведок 18.11.2021 (слева) и 09.11.2022 (справа).
 Fig. 9. The spectral density of the signal during the periods of electrical sounding 18.11.2021 (left) and 09.11.2022 (right).

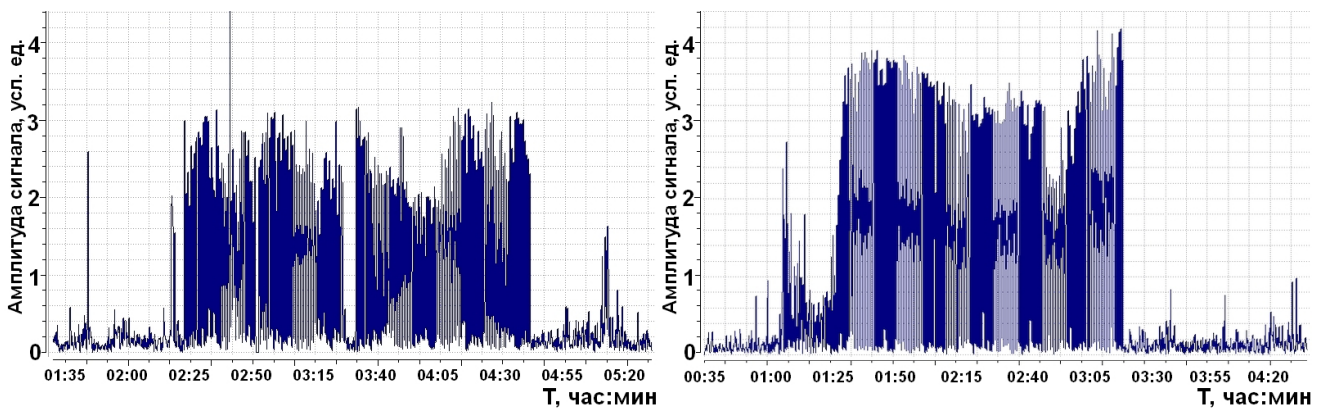


Рис. 10. Изменения амплитуды спектра сейсмического сигнала в период проведения электроразведки на частоте 25.06 Гц 25.04.2022 г. (слева) и на частоте 24.51 Гц 10.11.2022 г. (справа).
 Fig. 10. Changes in the amplitude of the seismic signal spectrum during the period of the electrical sounding at a frequency of 25.06 Hz on 25.04.2022 (left) and at a frequency of 24.51 Hz on 10.11.2022 (right).

ности, а также времени начала сеансов электрозондирования, для того чтобы был выполнен принцип рандомизации эксперимента. Согласно этому принципу, новые физические эффекты могут считаться полностью достоверными, если они устойчивы к некоторым изменениям параметров постановки эксперимента [28]. Элемент случайности вводят в планирование эксперимента в тех случаях, пока еще неизвестна или недостаточно разработана математическая модель. К таким случаям можно отнести наше исследование обратного сейсмоэлектрического эффекта II рода в разломной зоне.

Обобщая вышеизложенные результаты, можно заключить, что импульсы тока в приповерхностном слое коры при электрозондированиях в зоне Центрально-Сахалинского разлома оказывают влияние на источники сейсмических и сейсмоакустических волн, из-за чего возрастает амплитуда шумов.

Обсуждение результатов

Прежде чем обсуждать, как полученные результаты укладываются в представления о сейсмических и сейсмоакустических откликах среды на воздействие импульсов тока, проведем оценку плотности тока, возбуждаемого электрическим диполем. Для этого удобно воспользоваться формулой из [29] для плотности тока j на достаточном удалении от центра диполя:

$$j(r) = IL / (2\pi r^3), \quad (1)$$

где I – сила тока, определяемая источником и сопротивлением нагрузки, L – расстояние между электродами (длина диполя), r – расстояние от центра диполя до точки в среде, $r \gg L$. Формула (1) дает приближенный результат и для расстояний $r \geq L$, что подтверждается совпадением $j(r)$ при $r = L$ с выражением для плотности тока при симметричном растекании с полюса в полусферическую зону. Распределение проводимости среды считается квазиоднородным.

При электрозондированиях, проведенных на полигоне «Петропавловское», значения параметров были следующие: $I = 5\text{--}13$ А, $L = 408$ м. Источники сейсмоакустических шумов, которые может регистрировать наш гидрофон, находятся на удалении не более нескольких сотен метров от приемника и, следо-

вательно, от электрода 2 (см. рис. 1). Поэтому для оценки плотности тока по месту расположения источников можно в (1) положить $r = L$, и тогда из этого выражения получается $j \sim (0.5\text{--}1) \cdot 10^{-5}$ А/м². Плотность тока быстро убывает с ростом r . Так, на километровом расстоянии при максимальном токе зондирования 13 А $j(r_{1000}) \sim 10^{-6}$ А/м², а при удалении от диполя на 5 км (например, вглубь до слоя, куда могут попадать гипоцентры землетрясений) $j(r_{5000}) \sim 10^{-8}$ А/м². Полученные оценки показывают, что при проведенных электрозондированиях плотность тока в среде на расстояниях до 1 км от центра возбуждающего диполя была выше, чем характерные значения $j(r)$ при практических применениях сейсмоэлектрического эффекта II рода для оконтуривания месторождений углеводородов [30, 31]. Действительно, при таких применениях длина диполя обычно порядка 100 м, напряжение источника (автомобильного аккумулятора) 12 или 24 В, а кажущееся сопротивление нагрузки ≥ 100 Ом. Значения $j \sim 10^{-6}$ А/м² для вышеописанных электрозондирований (на расстояниях $r \sim 1$ км от источника) соответствуют расчетным оценкам плотности тока, который может возбуждаться в проводящем слое литосферы при возмущениях ионосферы глобального масштаба – последствиях солнечных вспышек класса X [32, 33]. В ряде работ (библиография в [34]) было отмечено, что после геоэффективных солнечных вспышек, вызывающих сильные магнитные бури, повышается уровень сейсмического шума. Возможный механизм этого эффекта связывают с микропульсациями магнитного поля Земли и наведенными теллурическими токами. С учетом этих обстоятельств можно говорить о некотором сходстве наших результатов с общей картиной реакции геологической среды на возбуждение в ней электрического тока.

Используя выражение (1), можно оценить значения плотности тока для других экспериментов, чтобы сравнить с нашим случаем электрозондирований ($j \sim 10^{-6} - 10^{-5}$ А/м²). Примем расстояние $r = 400$ м как референтное значение для численных оценок и рассмотрим несколько примеров.

1. В период 22–26 октября 2018 г. нами совместно с сотрудниками ИКИР ДВО РАН были проведены электрозондирования, аналогич-

ные описанным выше. Местом экспериментов была площадка стационара ИКИР ДВО РАН «Карымшина», Камчатский край, которая расположена в зоне разноранговых разломов. При электроразведках ток в импульсах был $I = 0.9$ А, а длина диполя $L = 18$ м. Отсюда следует, что на референтном расстоянии 400 м плотность тока $j \sim 0.4 \cdot 10^{-7}$ А/м², и только на расстояниях до 140 м плотность тока может достигать значений 10^{-6} А/м². Сейсмоакустические сигналы регистрировались гидрофонами разных типов, установленными в небольшом искусственном водоеме, а также высокочастотным сейсмоприемником (геофоном А1638, производство ЗАО «Геоакустика»²). Расстояние от гидрофонов (центра водоема) до ближайшего полюса диполя (обсадной трубы, заглубленной на 5 м) было около 20 м. Геофон был жестко закреплен на металлической балке, приваренной к конструкции другого полюса (такой же обсадной трубе). Каких-либо изменений в сейсмоакустических шумах в ходе сеансов электроразведки не было обнаружено.

2. В 2019 г., 29 и 30 августа, электроразведки по нашей методике проводились также на территории геофизической обсерватории Института динамики геосфер им. акад. М.А. Садовского РАН «Михнево», Московская обл. В этом случае ток в импульсах был $I = 3.1$ А, а длина диполя $L = 180$ м. Следовательно, плотность тока на референтном расстоянии 400 м составляла $j \sim 1.4 \cdot 10^{-6}$ А/м². В ГФО «Михнево» установлена малоапертурная сейсмическая антенна, МСА³, включающая центральный сейсмометр, который расположен в штольне на глубине 20 м, и 11 периферийных приборов. Благодаря этому МСА (другими словами, локальная сейсмическая сеть) обладает высокой чувствительностью к сейсмическим волнам и способна регистрировать региональные сейсмические события с малыми магнитудами ($M < 2$). В нашем эксперименте центр возбуждающего диполя находился на расстоянии около 350 м от штольни с центральным сейсмометром. По техническим причинам не было возможности использовать гидрофоны или геофоны.

По данным локальной сейсмической сети «Михнево», значимых изменений сейсмического шума в дни зондирования не было обнаружено (предположительно, из-за недостаточного накопления данных при малом количестве и продолжительности сеансов электроразведки).

3. Согласно [28], при зондированиях земной коры Северного Тянь-Шаня знакопеременными импульсами тока с амплитудой 600 А и длительностью 5 с (источник – электроимпульсная установка ЭРГУ-600-2) были зарегистрированы отклики сейсмоакустической эмиссии (САЭ) на расстоянии около 8 км от центра возбуждающего диполя. Регистрация сигналов проводилась при помощи геофона А1638, установленного в скважине на глубине около 80 м. По приведенным в [28] данным о длине диполя ($L = 4.2$ км) и расстояниях до приемника можно оценить плотность тока в зоне, где регистрировались сигналы САЭ, величиной $j \sim 0.8 \cdot 10^{-6}$ А/м².

Сопоставляя эти примеры с результатами электроразведки на полигоне «Петропавловское», можно резюмировать, что в сейсмоактивных регионах (где имеются избыточные напряжения в земной коре) при возбуждении в среде электрического тока с плотностью 10^{-6} А/м² или выше наступает реакция среды, проявляющаяся в сейсмоакустике. При этом могут регистрироваться разные формы реакции среды (так называемые отклики) при разных способах обработки первичных данных. Примерами откликов является как увеличение уровня сейсмоакустических шумов (см. выше), так и прирост числа событий САЭ, определяемых по превышению уровня дискриминации в шумовых записях [27]. Возможно, есть и другие формы откликов.

Помимо электроразведки, на уровень сейсмоакустических и сейсмических шумов могут воздействовать и другие факторы. Известно, что наиболее сильное влияние на сейсмический шум могут оказывать барические вариации в атмосфере, вызываемые циклонами [35]. При этом короткопериодные барические вариации длительностью

² Geoaoustics. 2009. URL: <http://geophone.narod.ru/TTX/ttx.html> (дата обращения: 23.04.2023).

³ Малоапертурная сейсмическая антенна, МСА [Small aperture antenna, SAA]. 2004. URL: http://idg.chph.ras.ru/ru/watch/s_a_s_antenna (дата обращения: 16.04.2023)

от 5 до 30 мин приводят к росту сейсмического шума в диапазоне 4–8 Гц [35]. Но крайне маловероятно, что во всех случаях сеансы электроразведки наложились на такие краткочастотные барические вариации. Кроме того, перепады давления, как и ветровые нагрузки, при циклонах не нарастают столь резко, как подача тока на диполь. Так что барические вариации, связанные с циклонами, не могут объяснить резкого (как на рис. 5) прироста уровня сейсмоакустических шумов. Тем не менее приведем информацию о прохождении циклонов над южной частью о. Сахалин в дни эксперимента (по материалам гидрометеорологических бюллетеней Дальневосточного регионального научно-исследовательского гидрометеорологического института). Согласно этим бюллетеням⁴, в дни проведения электроразведки в 2021–2022 гг. прохождение циклонов отмечено 18.11.2021 (последний день второго этапа эксперимента) и 26–27.04.2022 (на втором этапе). Даже если считать, что в статистике случаев прироста сейсмоакустических шумов под влиянием именно электроразведки положительный вклад дают только 9 дней без циклонов, а для 3 дней результат испытаний не определен, то «процент успеха», когда гипотеза о реакции среды на импульсы тока подтверждена, будет 75 %.

Завершая обсуждение результатов, остановимся на требованиях к источнику электроразведки для сейсмозондирования разломных зон. Для этого необходимо расширить пределы зоны около источника, где при зондировании возбуждается ток с плотностью выше 10^{-6} А/м², как минимум до 5 км (характерная ширина зоны влияния разлома). С помощью выражения (1) легко получить, что это обеспечивается при производстве тока в диполе на его длину $I \cdot L = 8 \cdot 10^5$ А·м. Такие значения достижимы при применении наиболее мощных, но очень дорогих источников импульсов тока.

Целью дальнейших экспериментов может стать исследование обратного сейсмозондирования

эффекта II рода при меньшей плотности тока, $j \sim 10^{-7}$ А/м² (т.е. вдали от источника).

Заключение

По результатам четырехэтапного эксперимента по электроразведке, проведенного в зоне влияния Центрально-Сахалинского разлома, установлен эффект возрастания уровня сейсмоакустических шумов в приповерхностных слоях вблизи источника – возбуждающего электрического диполя.

В качестве источника использовалось разработанное в ИМГиГ ДВО РАН генераторное устройство ИЭИГ-7-400 с мощностью 3 кВт, выше, чем у обычных источников для электроразведки методами сопротивлений. Регистрация сейсмических и сейсмоакустических шумов в фоновом режиме и во время зондирования велась с помощью молекулярно-электронных приборов: скважинного гидрофона и сейсмометра СМЕ-6111. По записям этих приборов были обнаружены корреляции между периодами подачи импульсов тока в среду через диполь и возрастанием сейсмоакустических шумов. Обнаруженная реакция среды на пропускание импульсов тока представляет собой разновидность обратного сейсмозондирования II рода, которая реализуется при достаточно высоких плотностях тока. Полученные результаты согласуются с результатами о вариациях сейсмоакустической эмиссии, которые регистрировались скважинными приборами при электроразведке в Северном Тянь-Шане. Отличие сейсмоакустических проявлений реакции среды от откликов сейсмичности (изменений параметров потока сейсмических событий после зондирования с применением геофизических МГД-генераторов и электроимпульсных установок) заключается в практическом отсутствии задержки после начала воздействия. Разработка и применение более мощных, но экономически приемлемых генераторных устройств может дать дополнительную информацию по этому вопросу.

⁴ Мезенцева Л.И., Каптыуг В.А. 2021. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Владивосток: ДВНИГМИ, 11: 21 с. [Mezentseva L.I., Kaptyug V.A. 2021. Monthly hydrometeorological bulletin of the FERHMI. Vladivostok: FERHMI, 11: 21 p.] URL: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2021/11/2021.11_ch1_meteo.pdf; То же. 2022, 4: 20 с. URL: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2022/4/2022.04_ch1_meteo.pdf; То же. 2022, 11: 21 с. URL: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2022/11/2022.11_ch1_meteo.pdf (дата обращения: 16.02.2023).

Список литературы

1. Чердынцев С.Н. **2022**. Сейсмоэлектрический эффект – основа нового геофизического метода исследований нефтяных скважин – сейсмоэлектрического каротажа. *Успехи современного естествознания*, 11: 143–150. <https://doi.org/10.17513/use.37942>
2. Иванов А.Г. **1940**. Сейсмоэлектрический эффект первого рода в приэлектродных областях. *Доклады АН СССР*, 68: 53–56.
3. Иванов А.Г. **1940**. Сейсмоэлектрический эффект 2 рода. *Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая*, 5: 699–727.
4. Френкель Я.И. **1944**. К теории сейсмических и сейсмоэлектрических явлений во влажной почве. *Известия АН СССР. Серия географическая и геофизическая*, 8(4): 134–149.
5. Biot M.A. **1956**. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2): 168–178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
6. Pride S.R. **1994**. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Physical Review B*, 50(21): 15678–15696. <https://doi.org/10.1103/physrevb.50.15678>
7. Naartsen M.W., Pride S.R. **1996**. Electrostatic waves from point sources in layered media. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B11): 24745–24769. <https://doi.org/10.1029/97jb02936>
8. Светов Б.С. **2008**. *Основы геоэлектрики*. Л.: Изд-во ЛКИ, 656 с.
9. Адушкин В.В., Спивак А.А. **2014**. *Физические поля в приповерхностной геофизике*. М.: ГЕОС, 360 с.
10. Адушкин В.В., Овчинников В.М., Санина И.А., Ризниченко О.Ю. **2016**. «Михнево»: от сеймостанции № 1 до современной геофизической обсерватории. *Физика Земли*, 1: 108–120.
11. Спивак А.А., Кишкина С.Б. **2004**. Исследование микросейсмического фона с целью определения активных тектонических структур и геодинамических характеристик среды. *Физика Земли*, 7: 35–49.
12. Тарасов Н.Т. **1997**. Изменение сейсмичности коры при электрическом воздействии. *Доклады АН*, 353(4): 542–545.
13. Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. **1999**. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана. *Вулканология и сейсмология*, 4-5: 152–160.
14. Авагимов А.А., Зейгарник В.А., Файнберг Э.Б. **2005**. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием. *Физика Земли*, 6: 55–65.
15. Смирнов В.Б., Завьялов А.Д. **2012**. К вопросу о сейсмическом отклике на электромагнитное зондирование литосферы Земли. *Физика Земли*, 7: 63–88.
16. Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. **2010**. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона. В кн.: Адушкин В.В., Кочарян Г.Г. (ред.) *Триггерные эффекты в геосистемах: материалы всерос. семинара-совещ.* М.: ГЕОС, с. 316–325.
17. Соболев Г.А., Пономарев А.В. **2003**. *Физика землетрясений и предвестники*. М.: Наука, 270 с.
18. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Sychev V.N., Zakupin A.S., Novikov V.A., Okunev V.I. **2004**. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. *Annals of Geophysics*, 47(1): 65–72. <https://doi.org/10.4401/ag-3259>
19. Светов Б.С. **2000**. К теоретическому обоснованию сейсмоэлектрического метода геофизической разведки. *Геофизика*, 1: 28–39.
20. Кормильцев В.В. **1980**. *Переходные процессы при вызванной поляризации*. М.: Наука, 112 с.
21. Светов Б.С., Агеев В.В., Каринский С.Д., Агеева О.А. **2013**. Самосогласованная задача вызванной поляризации электрокинетического происхождения. *Физика Земли*, 6: 91–98.
22. Дудченко И.П., Костылев Д.В., Гуляков С.А., Стовбун Н.С. **2021**. Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр. *Геосистемы переходных зон*, 5(1): 46–54. doi:10.30730/gtr.2021.5.1.046-054
23. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2019**. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012009. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012009
24. Костылев Д.В., Богинская Н.В. **2020**. Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир). *Геосистемы переходных зон*, 4(4): 486–499. doi:10.30730/gtr.2020.4.4.486-499
25. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. **1999**. Структурные взаимоотношения неогеновых и четвертичных образований, активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине. *Тихоокеанская геология*, 6: 59–70.
26. RU 2021666241. **2021**. *SpectrumSeism*: Свид-во о государственной регистрации программы для ЭВМ. Авторы: Селезнев В.С., Лисейкин А.В., Севостьянов Д.Б., Брыксин А.А. № 2021665611; заявл. 11.10.2021, опубл. 11.10.2021.
27. Закупин А.С., Богомолов Л.М., Мубассарова В.А., Ильичев П.В. **2014**. Сейсмоакустические проявления воздействий мощных импульсов тока по данным скважинных измерений на Бишкекском геодинамическом полигоне. *Физика Земли*, 5: 105–120. doi:10.7868/S000233371404019X
28. Красовский Г.И., Филаретов Г.Ф. **1982**. *Планирование эксперимента*. Минск: Изд-во БГУ. 302 с.
29. Колесников В.П. **1984**. *Основы интерпретации электрических зондирований*. М.: Наука, 400 с.
30. Russell R.D., Butler K.E., Kercic A.W., Maxwell M. **1997**. Seismoelectric exploration. *The Leading Edge*, 16(11): 1611–1615. <https://doi.org/10.1190/1.1437536>
31. Potylitsyn V., Kudinov D., Alekseev D., Kokhonkova E., Kurkov S., Egorov I., Pliss A. **2021**. Study of

the seismoelectric effect of the second kind using molecular sensors. *Sensors*, 21: 2301–2316. <https://doi.org/10.3390/s21072301>

32. Sorokin V., Yaschenko A., Mushkarev G., Novikov V. **2023**. Telluric currents generated by solar flare radiation: Physical model and numerical estimations. *Atmosphere*, 14: 458–477. <https://doi.org/10.3390/atmos14030458>
 33. Новиков В.А., Сорокин В.М., Ященко А.К., Мушкарев Г.Ю. **2023**. Физическая модель и численные оценки теллурических токов, генерируемых рентгеновским излучением солнечной вспышки. *Динамические процессы в геосферах*, 15(1): 23–44. doi:10.26006/29490995_2023_15_1_23
 34. Сычева Н.А. **2022**. Солнечные вспышки, сильные магнитные бури и вариации уровня сейсмического шума на территории Северного Тянь-Шаня. *Геофизические процессы и биосфера*, 21(4): 93–109. doi:10.21455/GPB2022.4-7
 35. Адушкин В.В., Локтев Д.Н., Спивак А.А. **2008**. Влияние барических возмущений атмосферы на микросейсмические процессы в земной коре. *Физика Земли*, 6: 77–85.
- ## References
1. Cherdynceev S.N. **2022**. The seismoelectric effect is the basis of a new geophysical method of oil well research – seismoelectric logging. *Advances in Current Natural Sciences*, 11: 143–150. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/use.37942>
 2. Ivanov A.G. **1940**. Seismoelectric effect of the 1st kind in near-electrode regions. *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences*, 68: 53–56. (In Russ.).
 3. Ivanov A.G. **1940**. Seismoelectric effect of the 2nd kind. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*, 5: 699–727. (In Russ.).
 4. Frenkel' Ya.I. **1944**. On the theory of seismic and seismoelectric phenomena in moist soil. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya i geofizicheskaya*, 8(4): 134–149. (In Russ.).
 5. Biot M.A. **1956**. Theory of propagation of elastic waves in a fluid-saturated porous solid. I. Low-frequency range. *Journal of the Acoustical Society of America*, 28(2): 168–178. <https://doi.org/10.1121/1.1908239>
 6. Pride S.R. **1994**. Governing equations for the coupled electromagnetics and acoustics of porous media. *Physical Review B*, 50(21): 15678–15696. <https://doi.org/10.1103/physrevb.50.15678>
 7. Haartsen M.W., Pride S.R. **1996**. Electrostatic waves from point sources in layered media. *J. of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B11): 24745–24769. <https://doi.org/10.1029/97jb02936>
 8. Svetov B.S. **2008**. *Fundamentals of geoelectrics*. Leningrad: Izdatel'stvo LKI, 656 p. (In Russ.).
 9. Adushkin V.V., Spivak A.A. **2014**. *Physical fields in near-surface geophysics*. Moscow: GEOS, 360 p. (In Russ.).
 10. Adushkin V.V., Ovchinnikov V.M., Sanina I.A., Riznichenko O.Yu. **2016**. Mikhnevo: from seismic station no. 1 to a modern geophysical observatory. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 52(1): 105–116. <https://doi.org/10.1134/s1069351315060014>
 11. Spivak A.A., Kishkina S.B. **2004**. The use of microseismic background for the identification of active geotectonic structures and determination of geodynamic characteristics. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 40(7): 573–586.
 12. Tarasov N.T. **1997**. Variation of seismicity of the Earth crust by electric impact. *Doklady Rossiiskoi akademii nauk [Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences. Earth Science Sections]*, 353(4): 542–545. (In Russ.).
 13. Tarasov N.T., Tarasova N.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A. **2000**. The effect of high energy electromagnetic pulses on seismicity in Central Asia and Kazakhstan. *Volcanology and Seismology*, 21(4-5): 627–639.
 14. Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Fajnbreg E.B. **2005**. Electromagnetically induced spatial-temporal structure of seismicity. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 41(6): 475–484.
 15. Smirnov V.B., Zavyalov A.D. **2012**. Seismic response to electromagnetic sounding of the Earth's lithosphere. *Izv., Physics Solid Earth*, 48: 615–639. <https://doi.org/10.1134/S1069351312070075>
 16. Sychev V.N., Bogomolov L.M., Rybin A.K., Sycheva N.A. **2010**. Influence of electromagnetic sounding of the Earth's crust on the seismic regime of the territory of the Bishkek geodynamic test site. In: Adushkin V.V., Kocharyan G.G. (eds) *Trigger effects in geosystems: Proceedings of the All-Russian seminar-meeting*. Moscow: GEOS, p. 316–325. (In Russ.).
 17. Sobolev G.A., Ponomarev A.V. **2003**. *Earthquake physics and precursors*. Moscow: Nauka, 270 p. (In Russ.).
 18. Bogomolov L.M., Il'ichev P.V., Sychev V.N., Zakupin A.S., Novikov V.A., Okunev V.I. **2004**. Acoustic emission response of rocks to electric power action as seismic-electric effect manifestation. *Annals of Geophysics*, 47(1): 65–72. <https://doi.org/10.4401/ag-3259>
 19. Svetov B.S. **2000**. On the theoretical substantiation of the seismoelectric method of geophysical exploration. *Geofizika*, 1: 28–39. (In Russ.).
 20. Kormil'cev V.V. **1980**. *Transients under induced polarization*. Moscow: Nauka, 112 p. (In Russ.).
 21. Svetov B.S., Ageev V.V., Karinskij S.D., Ageeva O.A. **2013**. Self-consistent problem of induced polarization of electrokinetic origin. *Izv., Physics Solid Earth*, 49(6): 836–843. <https://doi.org/10.1134/s1069351313060141>
 22. Dudchenko I.P., Kostylev D.V., Gulyakov S.A., Stovbun N.S. **2021**. A geophysical pulse voltage generator for seismic and electric exploration of the subsurface. *Geosystems of Transition Zones*, 5(1): 46–54. DOI 10.30730/gtr.2021.5.1.046-054 (In Russ.).
 23. Kostylev D.V., Bogomolov L.M., Boginskaya N.V. **2019**. About seismic observations on Sakhalin with the use of molecular-electronic seismic sensors of new type. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 012009. doi:10.1088/1755-1315/324/1/012009
 24. Kostylev D.V., Boginskaya N.V. **2020**. Seismoacoustic observations using molecular-electronic hydrophones

- on Sakhalin and the South Kuril Islands (Kunashir Island). *Geosystems of Transition Zones*, 4(4): 486–499. doi:10.30730/gtr.2020.4.4.486-499 (In Russ.).
25. Rozhdestvenskij V.S., Saprygin S.M. **1999**. Structural relationships between Neogene and Quaternary deposits, active faults and seismicity in South Sakhalin. *Geology of the Pacific Ocean*, 6: 59–70. (In Russ.).
 26. RU 2021666241. **2021**. *SpectrumSeism*: Certificate of state registration of the computer program. Authors: Seleznev V.S., Lisejkin A.V., Sevost'yanov D.B., Bryksin A.A. No. 2021665611, application 11.10.2021; publ. 11.10.2021. (In Russ.).
 27. Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Mubassarova V.A., П'ичев P.V. **2014**. Seismoacoustic responses to high-power electric pulses from well logging data at the Bishkek geodynamical test area. *Izv., Physics Solid Earth*, 50(5): 692–706. https://doi.org/10.1134/s1069351314040193
 28. Krasovskii G.I., Filaretov G.F. **1982**. *Experimental design*. Minsk: Izd-vo BSU. 302 p. (In Russ.).
 29. Kolesnikov V.P. **1984**. *Fundamentals of interpretation of electrical soundings*. Moscow: Nauka, 400 p. (In Russ.).
 30. Russell R.D., Butler K.E., Kopic A.W., Maxwell M. **1997**. Seismoelectric exploration. *The Leading Edge*, 16(11): 1611–1615. https://doi.org/10.1190/1.1437536
 31. Potylitsyn V., Kudinov D., Alekseev D., Kokhonkova E., Kurkov S., Egorov I., Pliss A. **2021**. Study of the seismoelectric effect of the second kind using molecular sensors. *Sensors*, 21: 2301–2316. https://doi.org/10.3390/s21072301
 32. Sorokin V., Yaschenko A., Mushkarev G., Novikov V. **2023**. Telluric currents generated by solar flare radiation: Physical model and numerical estimations. *Atmosphere*, 14: 458–477. https://doi.org/10.3390/atmos14030458
 33. Novikov V.A., Sorokin V.M., Yashchenko A.K., Pushkarev G.Yu. **2023**. Physical model and numerical estimates of telluric currents generated by X-ray radiation of a solar flare. *Dynamic Processes in Geospheres*, 15(1): 23–44. (In Russ.). doi:10.26006/29490995_2023_15_1_23
 34. Sycheva N.A. **2022**. Solar flares, strong magnetic storms and variations in the level of seismic noise in the Northern Tien Shan. *Geophysical Processes and the Biosphere*, 21(4): 93–109. (In Russ.). doi:10.21455/GPB2022.4-7
 35. Adushkin V.V., Loktev D.N., Spivak A.A. **2008**. The effect of baric disturbances in the atmosphere on microseismic processes in the crust. *Izv., Physics Solid Earth*, 44(6): 510–517. https://doi.org/10.1134/s1069351308060086

Об авторах

Богомолов Леонид Михайлович (https://orcid.org/0000-0002-9124-9797), доктор физико-математических наук, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, bleom@mail.ru

Костылев Дмитрий Викторович (https://orcid.org/0000-0002-8150-9575), директор, Сахалинский филиал ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск; научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, d.kostylev@imgg.ru

Костылева Наталья Владимировна (https://orcid.org/0000-0002-3126-5138), научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, n.kostyleva@imgg.ru

Гуляков Сергей Александрович (https://orcid.org/0009-0001-7924-6972), младший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, gulyakov_97@mail.ru

Дудченко Илья Павлович (https://orcid.org/0000-0002-4967-7405), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, ilpadu@mail.ru

Каменев Павел Александрович (https://orcid.org/0000-0002-9934-5855), кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории геохимии и региональной геологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, kamepav@mail.ru

Стовбун Николай Сергеевич (https://orcid.org/0009-0004-1927-798X), младший научный сотрудник, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, nikolay19972016@gmail.com

Поступила 27.04.2023

Принята к публикации 21.05.2023

About the Authors

Bogomolov, Leonid M. (https://orcid.org/0000-0002-9124-9797), Doctor of Physics and Mathematics, Director, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, bleom@mail.ru

Kostylev, Dmitry V. (https://orcid.org/0000-0002-8150-9575), Director, Sakhalin Branch of the Federal Research Center “United Geophysical Survey of RAS”, Yuzhno-Sakhalinsk; Researcher, Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, d.kostylev@imgg.ru

Kostyleva, Natalya V. (https://orcid.org/0000-0002-3126-5138), Researcher, Laboratory of seismology, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, n.kostyleva@imgg.ru

Gulyakov, Sergey A. (https://orcid.org/0009-0001-7924-6972), Junior Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, gulyakov_97@mail.ru

Dudchenko, Ilya P. (https://orcid.org/0000-0002-4967-7405), Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Center for Collective Use, Head of the Department, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, ilpadu@mail.ru

Kamenev, Pavel A. (https://orcid.org/0000-0002-9934-5855), Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of geochemistry and regional geology, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, kamepav@mail.ru

Stovbun, Nikolai S. (https://orcid.org/0009-0004-1927-798X), Junior Researcher, Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, nikolay19972016@gmail.com

Received 27 April 2023

Accepted 21 May 2023