GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS
Published by the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

RECENT GEODYNAMICS

2025 VOLUME 16 ISSUE 2 ARTICLE 0818

ISSN 2078-502X

DOI: 10.5800/GT-2025-16-2-0818

AN ESTIMATE OF THE POSSIBLE IMPACT OF AN EXPERIMENTAL ELECTRIC PULSE SOURCE ON SEISMIC AND SEISMOACOUSTIC NOISE IN THE CENTRAL SAKHALIN FAULT ZONE

S.A. Gulyakov [1]✉, N.S. Stovbun [1], N.V. Kostyleva [1], L.M. Bogomolov [1], D.V. Kostylev [1,2], I.P. Dudchenko [1], P.A. Kamenev [1]

[1] Institute of Marine Geology and Geophysics, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, 1B Nauki St, Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia

[2] Sakhalin Branch of the Federal Research Center of the Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, 2A Tikhookenskaya St, Yuzhno-Sakhalinsk 693010, Russia

ABSTRACT. The paper presents the results of shallow-depth electrical sounding carried out in 2021–2022 near the Central Sakhalin fault at the geophysical test site of the IMGG FEB RAS (Petropavlovskoye village, Aniva district). Electrical soundings were carried out using a pulse voltage generator developed at the IMGG FEB RAS. The aim of the experiment was to evaluate the response of the medium in the near-fault zone to the impact of current pulses, the amplitude of which is significantly greater than that for resistivity prospecting or seismoelectric prospecting methods but many times less than that for high-power electrical sounding in Central Asia with the aid of geophysical MHD generators or electric pulse installations. The response of the medium was determined based on the records obtained from the seismic instruments located at the Petropavlovskoye test site – a broadband seismometer CME-6111, molecular-electron hydrophone, – as well as on the records of seismic noise at the "Ozhidayevo" and "Kholmsk" stations of the of the SB FRS GS RAS and on short-period seismometers Zetlab 7152-N and SPV-3K installed near the temporary sites in the test area. The results of processing of the seismoacoustic data obtained by a hydrophone for four experimental stages (13 days of serial sounding using unipolar current pulses) showed an increase in the noise amplitude in the near-surface layer during electrical soundings in the Central Sakhalin fault zone. This may indicate the influence of electrical soundings on the sources of seismoacoustic signals, i.e. on the medium destruction at the electrical impact site. Waveform recordings from all seismometers revealed the changes in seismic noise levels that correlate with the passage of cyclones causing high wind loads and changes in atmospheric pressure. Autumn-spring cyclones, frequent in Sakhalin, occurred at all stages of the experiment, which is why responses to electrical impact in seismic noise could only be recorded by the CME-6111 seismometer, located near the sounding source. This research determined the direction for improving electric current sources, increasing their power for shallow and deep sounding of the earth's crust.

KEYWORDS: fault zone; geophysical test site; seismic network; seismoacoustic noise; equipment for electric sounding; response to electric impact; spectrum amplitude

FUNDING: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on state assignment No. 124013000764-8.

EDN: NBEXOF

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Sergey A. Gulyakov, gulyakov_97@mail.ru

Received: August 31, 2024
Revised: December 24, 2024
Accepted: January 13, 2025

FOR CITATION: Gulyakov S.A., Stovbun N.S., Kostyleva N.V., Bogomolov L.M., Kostylev D.V., Dudchenko I.P., Kamenev P.A., 2025. An Estimate of the Possible Impact of an Experimental Electric Pulse Source on Seismic and Seismoacoustic Noise in the Central Sakhalin Fault Zone. Geodynamics & Tectonophysics 16 (2), 0818. doi:10.5800/GT-2025-16-2-0818

© Gulyakov S. A., Stovbun N. S., Kostyleva N. V., Bogomolov L. M., Kostylev D. V., Dudchenko I. P., Kamenev P. A., 2025

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСОВ НА СЕЙСМИЧЕСКИЙ И СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКИЙ ШУМ В ЗОНЕ ЦЕНТРАЛЬНО-САХАЛИНСКОГО РАЗЛОМА

С.А. Гуляков[1], Н.С. Стовбун[1], Н.В. Костылева[1], Л.М. Богомолов[1], Д.В. Костылев[1,2], И.П. Дудченко[1], П.А. Каменев[1]

[1] Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б, Россия
[2] Сахалинский филиал ФИЦ ЕГС РАН, 693010, Южно-Сахалинск, ул. Тихоокеанская, 2А, Россия

АННОТАЦИЯ. В работе изложены результаты малоглубинных электрозондирований, проводимых в 2021–2022 гг. вблизи Центрально-Сахалинского разлома на геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН (с. Петропавловское Анивского района). Электрозондирования проводились с использованием разработанного в ИМГиГ ДВО РАН генератора импульсных напряжений. Целью эксперимента являлась оценка реакции среды в приразломной зоне на воздействие импульсов тока, амплитуда которых значительно больше обычно применяемой для электроразведки методами сопротивлений или сейсмоэлектроразведки, но многократно меньше, чем в случае электрозондирований в Средней Азии с использованием мощных источников (геофизические МГД-генераторы или электроимпульсные установки). Реакция среды определялась по записям сейсмических приборов, расположенных на полигоне «Петропавловское»: широкополосного сейсмометра СМЕ-6111, молекулярно-электронного гидрофона, а также по записям сейсмического шума на станциях сети СФ ФИЦ ЕГС РАН «Ожидаево» и «Холмск» и на временных пунктах в районе проведения эксперимента, где устанавливались короткопериодные сейсмометры Zetlab 7152-N и СПВ-3к. По результатам обработки сейсмоакустических данных с гидрофона за четыре этапа эксперимента (13 дней с зондированиями сериями однополярных импульсов тока) выявлено, что при электрозондированиях в зоне Центрально-Сахалинского разлома в приповерхностном слое возрастает амплитуда шумов. Это может свидетельствовать о влиянии электрозондирований на источники сейсмоакустических сигналов, т.е. на деструкцию среды по месту электровоздействий. По записям волновых форм со всех сейсмометров обнаружены изменения уровня сейсмического шума, коррелирующие с прохождением циклонов, что вызывает сильные ветровые нагрузки и перепады атмосферного давления. Частые для Сахалина осенне-весенние циклоны были на всех этапах эксперимента, из-за чего отклики на электровоздействие в сейсмическом шуме удалось зарегистрировать только по записям сейсмометра СМЕ-6111, расположенного вблизи источника зондирований. Проведенная работа определила направления совершенствования источников тока, увеличения их мощности для приповерхностных и для более глубоких зондирований земной коры.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: разломная зона; геофизический полигон; сейсмическая сеть; сейсмоакустический шум; аппаратура для электрозондирования; отклик на электровоздействие; амплитуда спектра

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках госзадания № 124013000764-8.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современное представление о внутреннем строении Земли базируется на фундаментальных результатах, полученных экспериментальной сейсмологией [Antonova et al., 1978]. Одно из перспективных направлений экспериментальных исследований связано с изучением эффекта изменений сейсмичности коры при электрическом воздействии. Этот эффект был впервые установлен Н.Т. Тарасовым в 80-х годах прошлого столетия при анализе каталогов сейсмических событий в районах Гарма и Северного Тянь-Шаня за период электрозондирований земной коры с применением мощных МГД-генераторов [Tarasov, 1997; Tarasov et al., 1999]. Наличие корреляции между пусками МГД-генераторов и вариациями слабой сейсмичности было подтверждено в работах [Avagimov et al., 2005; Chelidze et al., 2006] методами статистического анализа и нелинейной динамики.

В этих и других работах (библиография в обзоре [Zeigarnik et al., 2022]) обращено внимание на наличие задержек в вариациях сейсмического режима после воздействий импульсов тока при электрозондированиях (называемых для краткости электровоздействиями).

Исследование сейсмических откликов на электровоздействия продолжалось и после прекращения электрозондирований с применением МГД-генераторов в 1991 г. На Бишкекском геодинамическом полигоне (Северный Тянь-Шань, Кыргызстан) вместо МГД-генераторов стал использоваться менее мощный, но более экономичный источник научной станции ОИВТ РАН – электроразведочная генераторная установка ЭРГУ 600-2 [Volikhin et al., 1993]. Эта установка до сих пор эксплуатируется на НС РАН в г. Бишкеке для активного мониторинга кажущегося сопротивления земной коры методом становления поля (зондирований становлением поля, ЗС). В период 2000–2005 гг. установка ЭРГУ-600-2

выступала в качестве источника серий импульсов для экспериментального режима зондирований. За счет увеличения числа регулярных зондирований суммарная энергия электрического воздействия существенно превышала значение при пусках МГД-генераторов, хотя ток в разрядах ЭРГУ-600-2 на диполь (600 А) был в несколько раз меньше, чем при зондированиях с МГД-генераторами (1.5–2.0 кА) [Sychev et al., 2008, 2010]. При анализе вариаций слабой сейсмичности Северного Тянь-Шаня в 2000–2005 гг. в работах [Sychev et al., 2010; Turuntaev, Melchaeva, 2010; Smirnov, Zavyalov, 2012; Zeigarnik et al., 2022] были получены результаты, указывающие на изменение пространственно-временного распределения сейсмичности по сравнению с периодами до и после экспериментальных электрозондирований. Как и в случае с МГД-генераторами изменения в форме активизации слабой сейсмичности или увеличения угла наклона графика повторяемости (b-value) происходили с задержкой в 2–7 дней после даты электровоздействий [Zeigarnik et al., 2022]. Согласно [Sychev et al., 2008, 2010] наиболее контрастный прирост сейсмической активности отмечался в случае зондирований наиболее длительными, 20-секундными, импульсами тока в зонах на расстоянии 40–100 км от источника электрозондирований.

Для подтверждения полученных результатов об активации сейсмичности при электрозондированиях и более подробного анализа этого эффекта были проведены дополнительные исследования сейсмоакустической эмиссии, САЭ (другое название – геоакустическая эмиссия) на территории Бишкекского геодинамического полигона (БГП) [Zakupin et al., 2014; Imashev, Cheshev, 2019]. Были установлены характеристики геоакустических и сейсмических откликов среды (форма огибающей, протяженность во времени) на электровоздействие при разных режимах зондирования [Imashev, Rybin, 2023]. Важно то, что такие отклики отмечены в записях геоакустической эмиссии и сейсмограммах по изменению волновой формы и/или длительности аномалии.

В настоящее время БГП является единственной специально оборудованной площадкой для проведения электрозондирований земной коры с применением мощного источника тока (ЭРГУ-600-2). В условиях, когда механизм стимулирования сейсмичности импульсами тока до конца не выяснен, представляет интерес проведение электрозондирований в других сейсмоактивных регионах для исследования сейсмоэлектрических эффектов в регионах с геодинамической обстановкой, отличной от БГП (интраконтинентальный ороген, преобладает субмеридиональное сжатие [Makarov et al., 2005]). Считается, что значительный, а возможно и главный, вклад в возбуждение сейсмических откликов вносит снижение сдвиговой прочности контактов блоков при увеличении притока воды (эффект Ребиндера) в силу электроосмоса (электрокинетического эффекта) [Sobolev et al., 2006; Panteleev, Gavrilov, 2015]. Прямой экспериментальной проверкой этой модели механизма электровоздействия (ЭВ) может быть проведение электрозондирований на новой площадке, где у поверхности залегают достаточно обводненные породные массивы. При этом сниженное электросопротивление грунта позволит обойтись источниками зондирования значительно меньшей мощности, чем ЭРГУ-600-2.

Подходящая площадка была выбрана в южной части о. Сахалин, в зоне Центрально-Сахалинского разлома (ЦСР). Для развернутого на ней геофизического полигона в ИМГиГ ДВО РАН недавно разработан экономичный и мобильный источник зондирований – электроимпульсный геофизический генератор [Dudchenko et al., 2021, 2023].

Остров Сахалин является перспективным местом для проведения подобных экспериментов также и по мнению авторов программы сейсмического мониторинга и разрядки тектонических напряжений с помощью МГД-генераторов (http://www.ihed.ras.ru/napr2.shtml#21) [Velikhov et al., 2004].

В данной работе представлены результаты электрозондирований в зоне Центрально-Сахалинского разлома с применением нового электроимпульсного источника. Основной целью экспериментов была оценка реакции среды в приразломной зоне на воздействие однополярных импульсов тока амплитудой 5–13 А по данным сейсмических приборов района исследования.

2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭЛЕКТРОЗОНДИРОВАНИЙ

Экспериментальные малоглубинные электрозондирования проводились в южной части ЦСР на комплексном геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН в с. Петропавловское Анивского района [Kostylev et al., 2019]. Оценка реакции среды на ЭВ определялась по записям сейсмических приборов, расположенных на самом полигоне. В качестве первичных преобразователей использовался широкополосный сейсмометр СМЕ-6111 и молекулярно-электронный гидрофон (датчик сейсмоакустических сигналов с диапазоном частот 1–200 Гц). Для оцифровки и сохранения данных применялись регистраторы NDAS-8226 (производитель «R-sensors», Россия) [Kostylev et al., 2019; Kostylev, Boginskaya, 2020]. Для расширения района наблюдений также использовались данные сети сейсмологических станций Сахалинского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (СФ ФИЦ ЕГС РАН): «Холмск» (HLMS), «Ожидаево» (OJD), «Колхозное» (KKHR) и «Огоньки» (OGK). Первые три станции входят в состав локальной полевой сети СФ ФИЦ ЕГС РАН и оборудованы регистраторами DAT-4 (производитель CloverTech, Япония) в комплекте с сейсмометрами-велосиметрами LE-3Dlite-1Hz (производитель Lennartz electronic, Германия) [Semenova et al., 2018]. Пункт сейсмических наблюдений «Огоньки» оснащен акселерометром со встроенным регистратором Guralp CMG-5TDE (производитель Güralp Systems

Ltd., Великобритания) [Fokina et al., 2019]. Записи перечисленных сейсмических приборов также использовались для анализа сейсмичности в районе южной части ЦСР в период эксперимента и после его проведения. На период проведения эксперимента в ноябре 2021 г. был дополнительно установлен, на удалении порядка 2 км от места ЭВ, сейсмограф Zetlab 7152-N VER.3, сочетающий в себе функции акселерометра и велосиметра за счет использования сразу двух встроенных датчиков. На период проведения эксперимента в апреле 2022 г. дополнительно использовался комплект оборудования в составе трехкомпонентного велосиметра СПВ-3К (производитель «Логистические системы», Россия) и регистратора GeoSIG GMS-18 (производитель GeoSIG LTD, Швейцария), установленный на расстоянии 20 м от электрического диполя. Стоит отметить, что в период проведения эксперимента в ноябре 2022 г. молекулярно-электронный широкополосный сейсмометр СМЕ-6111 был перемещен с места своей стационарной установки в сейсмокамере [Kostylev et al., 2019] в вариант установки на дневную поверхность. Для снижения влияния внешних помех на качество регистрируемых данных сейсмометр был установлен на специально отлитый бетонный постамент и закрыт защитным кожухом.

Использование перечисленного комплекта оборудования позволяет определить наличие или отсутствие откликов на ЭВ на различном удалении от места проведения эксперимента в широком частотном диапазоне. Для сейсмического шума, регистрируемого сейсмометрами, диапазон регистрации составляет от 0.016 до 50 Гц, что позволяет охватить как низкочастотные микросейсмы, так и сравнительно высокочастотную компоненту сейсмических колебаний. А для сейсмоакустического шума (акустического шума Земли), регистрируемого при помощи молекулярного гидрофона, диапазон измерений находится в области частот 0.02–200 Гц. Общая схема расположения сейсмических станций, разломных структур Южного Сахалина [Rozhdestvensky, Saprygin, 1999] и места проведения ЭВ приведена на рис. 1.

Эксперименты с электрозондированием проводились в четыре этапа в течение 2020–2022 гг., информация о времени и параметрах зондирований на каждом этапе представлена в табл. 1. На каждом этапе эксперимента, начиная со второго, проводилась корректировка и усовершенствование аппаратуры для достижения более высоких значений тока и напряжения в первичном (возбуждающем) диполе AB (рис. 1, врезка I).

Выбор периода экспериментов на первых двух этапах определялся готовностью генерирующей установки к работе в полевых условиях. Также имело значение отсутствие препятствий для полевых работ с прокладкой кабеля первичного (возбуждающего) диполя, таких

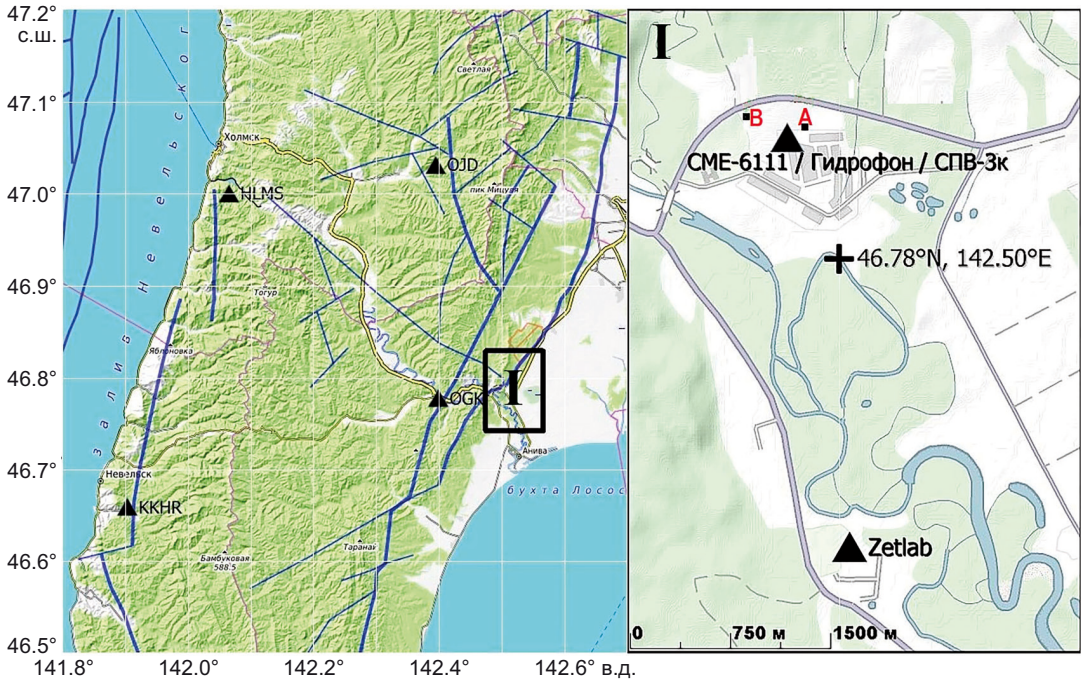

Рис. 1. Карта расположения сейсмических станций сети СФ ФИЦ ЕГС РАН (черные треугольники) и разломов южной части о. Сахалин (синие линии).
Врезка I: расположение электродов (точки A и B) и сейсмических приборов (черные треугольники) полигона комплексных геофизических наблюдений «Петропавловское» с указанием реперной точки (черный крестик, 26-й км автомобильной дороги Южно-Сахалинск – Холмск).

Fig. 1. Map of the location of the SB FRC GS RAS seismic stations (black triangles) and faults of the South Sakhalin (blue lines).
Insert I: location of electrodes (points A and B) and seismic instruments (black triangles) of the «Petropavlovskoe» integrated geophysical test site with an indication of the reference point (black cross, 26-th km of the Yuzhno-Sakhalinsk – Kholmsk highway).

Таблица 1. Параметры зондирований на комплексном геофизическом полигоне у с. Петропавловское, о. Сахалин
Table 1. Parameters of soundings on the complex geophysical test site near the village of Petropavlovskoye, Sakhalin Island

№ этапа	Дата эксперимента	Время начала (UTC)	Первичный источник напряжения	Средняя амплитуда напряжения, В	Средняя амплитуда тока, А
1	29.10.2020	00:15	Модуль PF1000A-360	360	4.9
	29.10.2020	01:45			
2	15.11.2021	01:45	Генератор 230 В AC с блоком CSP-3000-400	300	5.1
	16.11.2021	02:45			
	17.11.2021	09:29			
	18.11.2021	00:33			
3	25.04.2022	02:20	Генератор 230 В AC с блоком CSP-3000-400 в режиме источника тока	200–400	5.9
	26.04.2022	00:30			
	27.04.2022	07:36			
	28.04.2022	23:39			
4	07.11.2022	01:39	Источник ИИН-12-540: трехфазный генератор AC с выпрямителем	540	13
	08.11.2022	07:18			
	09.11.2022	01:47			
	10.11.2022	01:05			

как глубокий снег зимой и летние сельскохозяйственные работы. С учетом этого электрозондирования были проведены в октябре 2020 г. (первый этап) и ноябре 2021 г. (второй этап). Эксперименты на последующих этапах были проведены в апреле и ноябре 2022 г. При таком выборе учитывались как уже упомянутые обстоятельства, так и сезонность в вариациях сейсмичности, которая может повлиять на интерпретацию результатов. Действительно, согласно региональному каталогу землетрясений южной части о. Сахалин [Earthquakes…, 2022, 2023, 2024] сейсмическая активность (т.е. суточное число событий) имеет два сезонных максимума: в январе – феврале и июле – августе. В периоды возрастания сейсмической активности перед максимумами идентификация откликов на внешние воздействия крайне затруднительна.

Во всех экспериментах для создания импульсов тока в земле использовался один и тот же диполь, два полюса которого представляют собой металлические электроды, погруженные в грунт на глубину 2 м. Расстояние между электродами составляло 408 м. Сопротивление каждого уединенного заземлителя измерялось трехточечным методом, чтобы при необходимости установить рядом параллельный электрод с целью снижения сопротивления. После установки диполя измерялось результирующее сопротивление всей линии с помощью двухэлектродного метода. Оба метода были реализованы с применением аналогового измерителя сопротивления заземления MS5209. Это позволило проводить быстрый и эффективный контроль сопротивления диполя на каждом этапе эксперимента. Сопротивление диполя на момент его установки в 2020 г. составило 38 Ом, и в течение каждого из этапов эксперимента изменений сопротивления не обнаружено, при смене этапов изменение сопротивления не превышало 3.5 Ом.

Ключевым элементом системы электровоздействия является токовый прерыватель, основная задача которого заключается в формировании последовательных однополярных импульсов тока с заданной скважностью в соответствии с управляющей программой. Разработка и тестирование данного устройства проводились в Центре коллективного пользования ИМГиГ ДВО РАН [Dudchenko et al., 2023]. На вход прерывателя подается первичное напряжение, а выход соединен с нагрузкой, роль которой выполняет нагружаемый диполь. Настройка параметров импульсов осуществляется посредством клавиатуры и LCD-дисплея. Внутри корпуса расположен блок энергонезависимой памяти, датчик тока и напряжения, а также часы реального времени. Работоспособность устройства была предварительно проверена на территории ИМГиГ ДВО РАН, где был создан макет нагрузки с сопротивлением 38 Ом. В состав устройства входит электронный ключ на базе IGBT транзистора, способный коммутировать ток до 40 А при напряжении 1200 В [Dudchenko et al., 2021]. Данный запас по напряжению и току введен не только для защиты от отрицательного перенапряжения во время переключения, но и для обеспечения возможности работы с более мощными первичными источниками электрической энергии в будущем. Корпус устройства был тщательно экранирован для защиты от электромагнитных помех, способных нарушить функционирование управляющей программы.

Функциональная схема устройства, включая первичные источники энергии, представлена на рис. 2. Эта конфигурация использовалась в ходе экспериментов, проведенных с 15 по 18 ноября 2021 г. и с 25 по 28 апреля 2022 г. Во всех экспериментах, за исключением первого, аппаратура для электровоздействия была размещена в непосредственной близости от электрода А.

В качестве первичного источника питания использовался бензиновый генератор переменного тока, который подключался к AC/DC преобразователю модели «CSP-3000-400». Преобразователь способен обеспечить на своем выходе постоянное напряжение величиной до 400 В и ток в нагрузке до 7.5 А. Ток с выхода преобразователя «CSP-3000-400» по питающей линии, выполненной из геофизического кабеля, подавался на электрический диполь AB через прерыватель тока. Таким образом, на этапах 2 и 3 эксперимента максимальное напряжение и ток ограничивались характеристиками преобразователя «CSP-3000-400». Функциональная схема всего комплекса аппаратуры для электровоздействия представлена на рис. 3. Для визуального контроля установившихся значений тока и напряжения использовался прецизионный вольтамперметр модели «2044» и мультиметр в режиме измерения постоянного напряжения.

Дополнительно применялся модуль аналого-цифрового преобразователя (АЦП) модели «E14-140», к входу которого подключались измерительные электроды, погруженные в грунт вблизи полюса A первичного

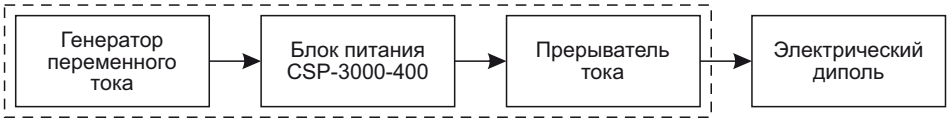

Рис. 2. Функциональная схема источника импульсов, использованного при экспериментах 15–18 ноября 2021 г. и 25–28 апреля 2022 г.

Fig 2. Functional diagram of the pulse source used in the experiments on November 15–18, 2021 and April 25–28, 2022.

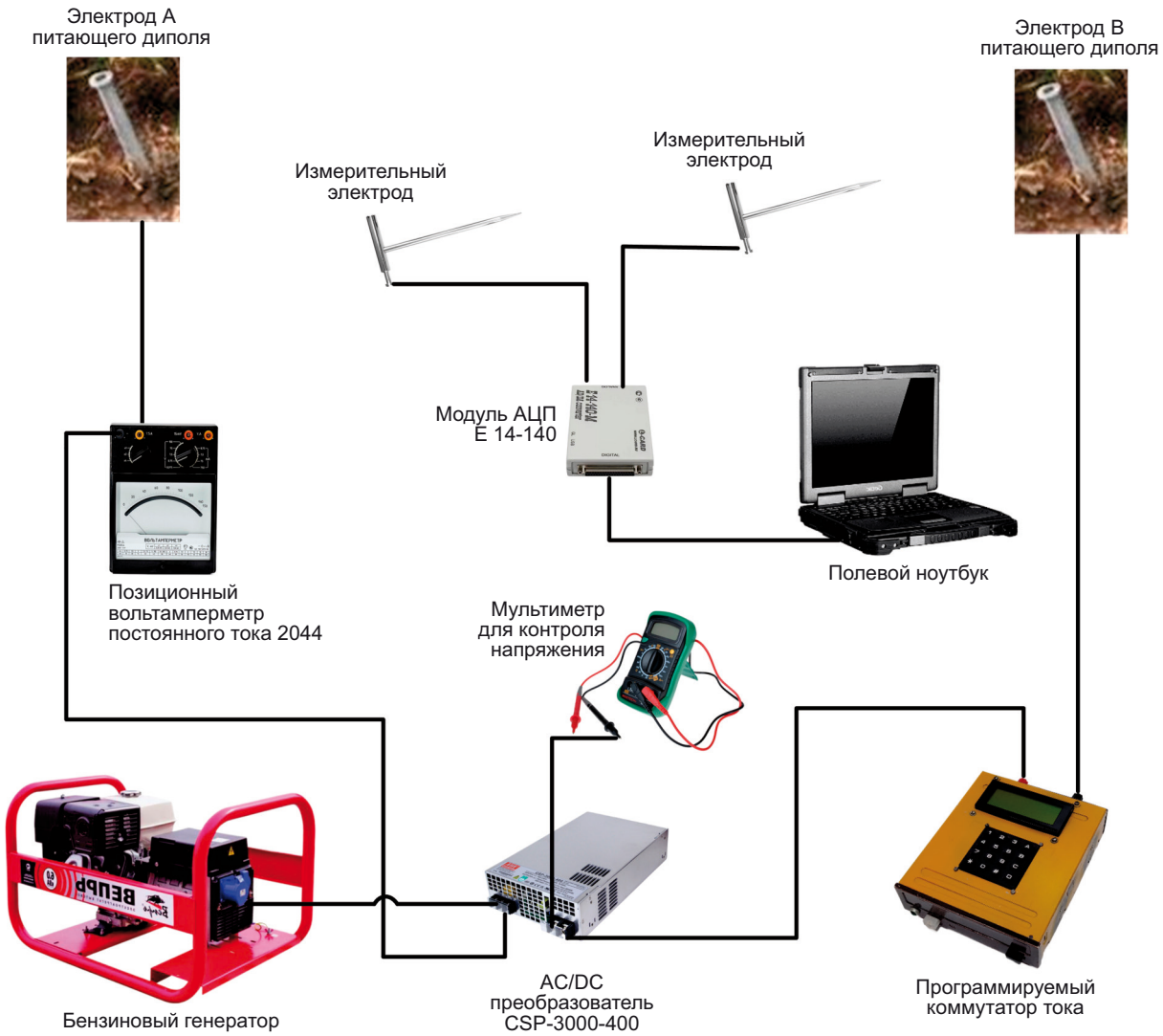

Рис. 3. Функциональная схема комплекса для электровоздействия.

Fig. 3. Functional diagram of the equipment for electrical sounding.

диполя. АЦП был подключен к ноутбуку для обработки и хранения данных. АЦП с высоким входным сопротивлением работал в режиме измерения напряжения, пропорционального плотности тока в грунте. Динамическое измерение разности потенциалов, ΔU, между измерительными электродами осуществлялось для контроля формы зондирующих импульсов. На рис. 4 показан пример регистрации временной зависимости ΔU(t), которая передает форму импульса тока при электрозондировании. С помощью измерительных электродов также проводился контроль помех от всего генерирующего комплекса без подключения к питающим электродам.

На всех этапах эксперимента оборудование функционировало в режиме генерации импульсов тока количеством 200, продолжительностью 20 с каждый и с такими же интервалами пауз между импульсами. Общая длительность одного этапа эксперимента составляла 2.2 ч. На втором этапе эксперименты начинались 15, 16 и 18 ноября около 13:40 по местному времени, тогда как 17 ноября запуск аппаратуры был осуществлен перед полуночью. Максимальная амплитуда тока на этом этапе эксперимента составляла 7 А, при этом амплитуда постепенно снижалась до 5.1 А. Параллельно основной линии между нагруженными электродами была проложена дополнительная линия, подключенная к вольтметру для контроля напряжения во время токовых пауз. Во время этих пауз измерялось остаточное напряжение на нагружаемом диполе до 10 В, которое постепенно снижалось перед следующими импульсами.

Отличительной особенностью третьего этапа эксперимента, проведенного с 25 по 28 апреля 2022 г., стало использование преобразователя «CSP-3000-400» в качестве источника тока, а не напряжения. Это позволило задать стабилизированное значение тока в диполе 5.9 А. При этом максимальная мощность импульсов, генерируемых системой, ограничивалась преобразователем «CSP-3000-400».

На последнем этапе эксперимента, проведенном с 7 по 10 ноября 2022 г., этот блок был исключен из системы и заменен трехфазным выпрямителем с максимальным напряжением 540 В. Выпрямитель был изготовлен как отдельное устройство со встроенной автоматической защитой и фильтром. Во время эксперимента в ноябре 2022 г. максимальная амплитуда тока составила 13 А, что почти в два раза больше, чем на предыдущем этапе. Максимальная мощность импульсов на четвертом этапе ограничивалась исключительно генератором переменного напряжения.

Поскольку прерыватель тока способен коммутировать более высокие токи и напряжения, в дальнейших экспериментах планируется увеличение мощности электрического воздействия.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАКЦИИ СРЕДЫ ПО ИЗМЕНЕНИЯМ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО И СЕЙСМИЧЕСКОГО ШУМА

Для обработки сейсмологических данных использовалась библиотека ObsPy (Observatory Python; https://docs.obspy.org/index.html) – проект с открытым исходным кодом, предназначенный для анализа временных рядов сейсмологических данных. Для визуализации волновых форм был задействован программный пакет Origin Pro 2022 и библиотека Python Matplotlib [Hunter, 2007]. На рис. 5 представлены волновые формы,

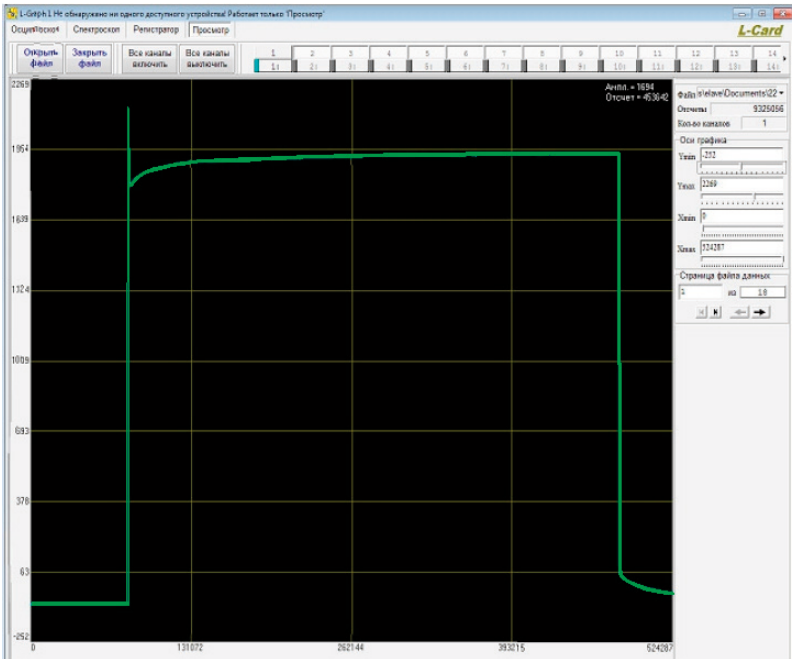

Рис. 4. Форма импульса напряжения, зарегистрированного вблизи электрода A (длительность импульса 20 с).

Fig. 4. The waveform of the voltage pulse recorded near electrode A (20-s burst duration).

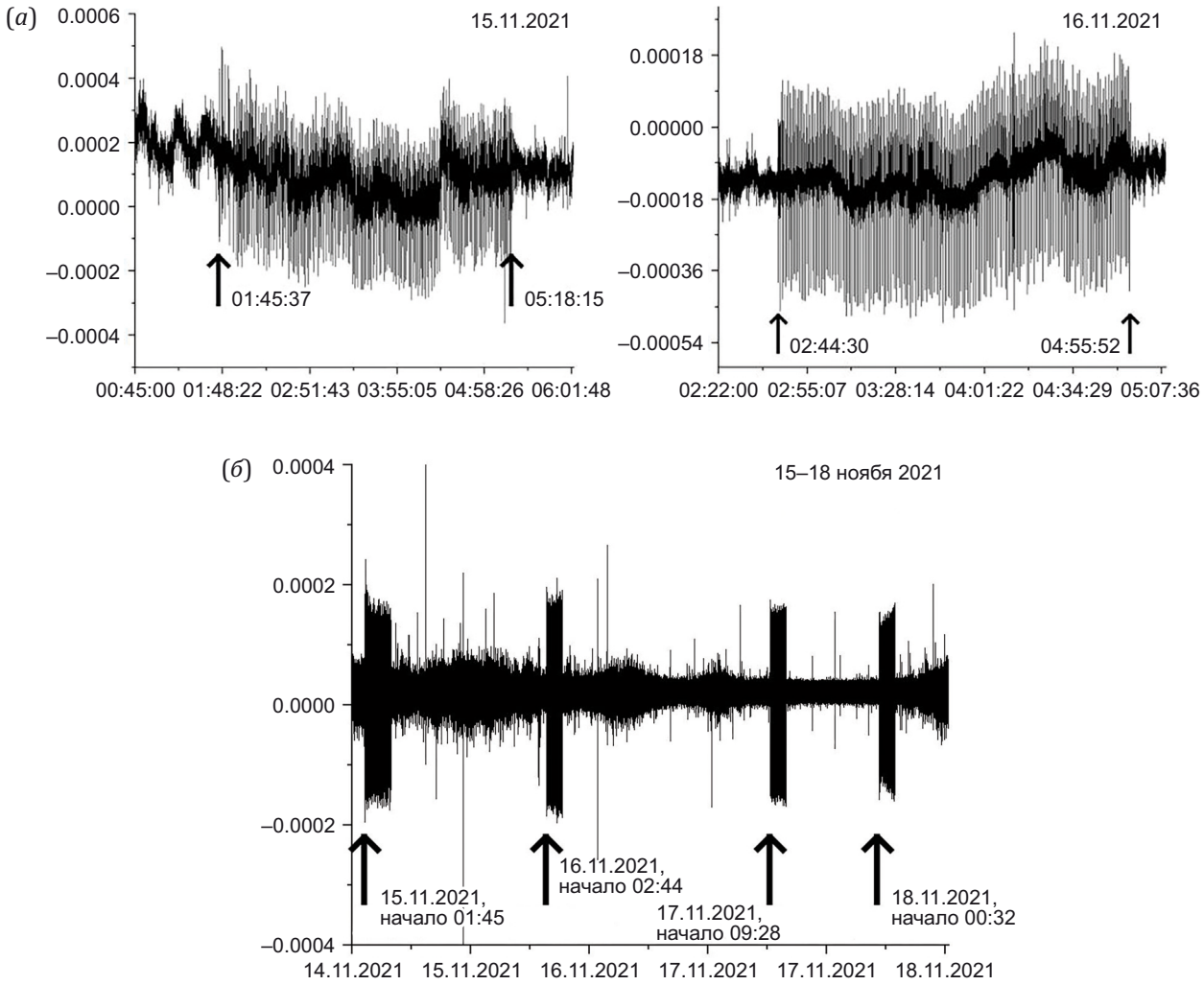

Рис. 5. Волновые формы сейсмоакустического шума по записям молекулярно-электронного гидрофона отдельно для 15, 16 ноября 2021 г. (*а*) и за весь период полевых экспериментов 15–18 ноября 2021 г. (*б*).

Fig. 5. Waveforms of the seismoacustic noise based on molecular-electronic hydrophone recordings for November 15, 16, 2021 (*а*) and for the entire period of filed experiments during November 15–18, 2021 (*б*).

полученные с молекулярно-электронного гидрофона, отдельно за 15–16 ноября 2021 г., а также за весь период эксперимента с 15 по 18 ноября 2021 г.

Для визуализации временного интервала с 15 по 18 ноября был использован программный полосовой фильтр с частотным диапазоном от 0.01 до 25 Гц. Данный метод фильтрации позволил устранить низкочастотные тренды и высокочастотный шум, обеспечив более четкое отображение значимых моментов эксперимента в указанный период. Время усиления сейсмоакустических шумов в ходе ЭВ совпадает с периодами отдельных ежедневных серий импульсов, как указано в табл. 1.

На рис. 6 представлена спектрограмма сейсмоакустического шума, зарегистрированного с использованием молекулярно-электронного гидрофона. В моменты ЭВ наблюдается повышение уровня шума в диапазоне частот 3–30 Гц.

Во время глубинных зондирований земной коры с использованием установки ЭРГУ-600-2 в 2011 и 2012 гг., при анализе данных сейсмоакустического шума был выявлен отклик на частотах 4.27 и 12.5 Гц [Zakupin et al., 2014]. На рис. 7 представлен график изменения амплитуды спектра на данных частотах в течение времени. Отклик на частоте 4.27 Гц также зафиксирован в наших экспериментах, тогда как на частоте 12.5 Гц наблюдается незначительное повышение амплитуды сигнала в моменты ЭВ. Данный отклик был получен для всех экспериментов 2020–2022 гг.

В период проведения эксперимента были проанализированы данные, зарегистрированные с использованием молекулярно-электронного сейсмометра СМЕ-6111. Объектом исследования стали двухчасовые интервалы этапов ЭВ, а также суточные отрезки времени. На рис. 8 представлена спектрограмма сейсмического сигнала горизонтального канала EW, на которой на фоне дневного роста сейсмического шума заметны отдельные отклики на ЭВ с частотой около 25 Гц.

Третий по счету отклик на воздействие выпадает на конец рабочего дня. Это эксперимент 17 ноября 2021 г.,

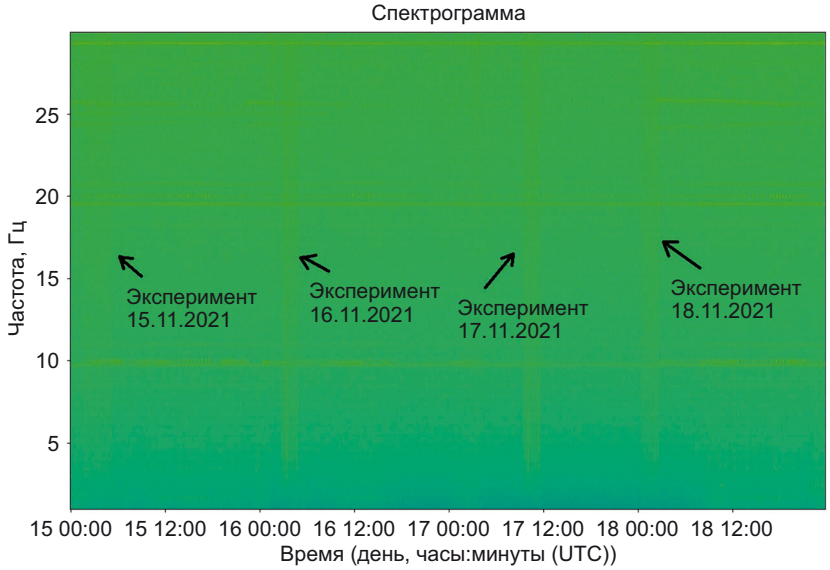

Рис. 6. Спектрограмма сейсмоакустического шума по записям молекулярно-электронного гидрофона в период 15–18 ноября 2021 г.

Fig. 6. Spectrogram of seismoacoustic noise based on molecular-electronic hydrophone recordings during November 15–18, 2021.

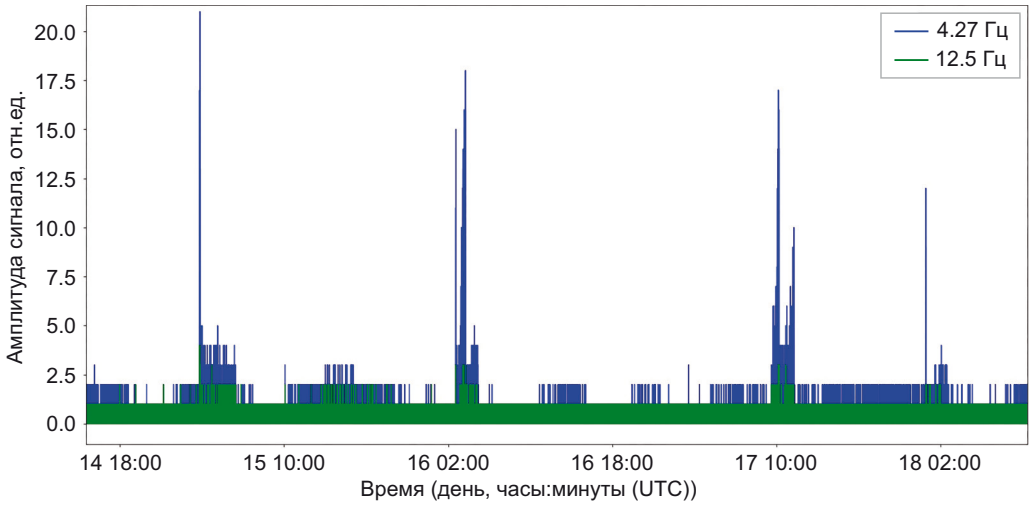

Рис. 7. Изменение амплитуды спектра сейсмоакустического шума на частотах 4.27 и 12.5 Гц за период 15–18 ноября 2021 г.

Fig. 7. Change in seismoacoustic noise spectrum amplitude at frequencies of 4.27 and 12.5 Hz for the period November 15–18, 2021.

который, как было упомянуто ранее, был отдельно осуществлен перед полуночью. Это подтверждает, что данные сигналы связаны именно с проведением электрозондирований, а не с другими техногенными воздействиями, в частности с электромагнитными полями, наводимыми при включении или выключении сильноточных электроустановок.

На рис. 9 представлен спектр сигналов, зарегистрированных сейсмометром СМЕ-6111, который расположен на геофизическом полигоне Петропавловское, на расстоянии около 50 м от электрода А питающего диполя (см. рис. 1) в ходе экспериментов, проведенных 15 ноября 2021 г. и 8 ноября 2022 г. Спектральные максимумы амплитуд в диапазоне частот 24.5–25.5 Гц наблюдались для всех дней (или, точнее, этапов) электрозондирований. На третьем этапе эксперимента (табл. 1) амплитуда на этих частотах была наибольшей (пример спектра от 15.11.2021 г. показан на рис. 9). На четвертом этапе (пример на рис. 9 от 08.11.2022 г.) сейсмометр был перемещен из сейсмокамеры на бетонный постамент, установленный на дневной поверхности. Скорее всего, качество исполнения постамента во многом и определило снижение амплитуды для частоты 24.5 Гц и увеличение общего фона шума, регистрируемого сейсмометром.

На рис. 10 представлен график изменения амплитуды спектра сейсмического сигнала на частоте 25.28 Гц в период 15–18 ноября 2022 г. Максимальные амплитуды частоты присутствуют в периоды электрозондирований.

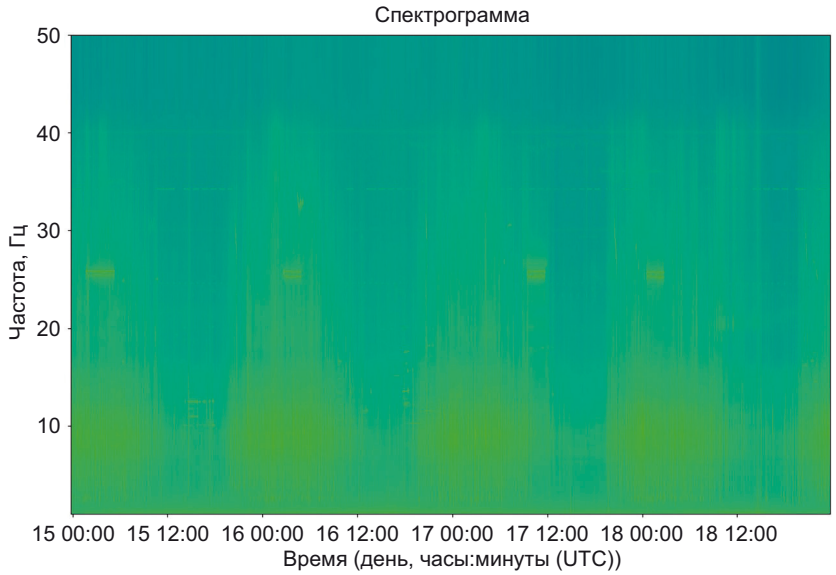

Рис. 8. Спектрограмма сейсмического сигнала, зарегистрированного на канале EW сейсмометра CME-6111 за период 15–18 ноября 2021 г.

Fig. 8. Spectrogram of the seismic signal recorded on the EW channel of the CME-6111 seismometer for the period November 15–18, 2021.

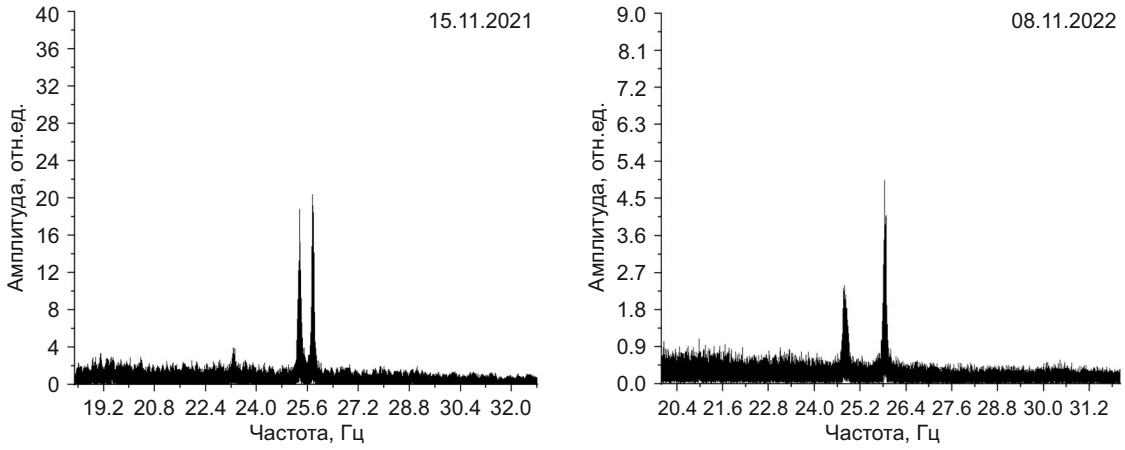

Рис. 9. Спектр сейсмического сигнала, зарегистрированного на канале EW сейсмометра CME-6111 15 ноября 2021 г. и 8 ноября 2022 г.

Fig. 9. Spectrum of the seismic signal recorded on the EW channel of the CME-6111 seismometer on November 15, 2021 and November 8, 2022.

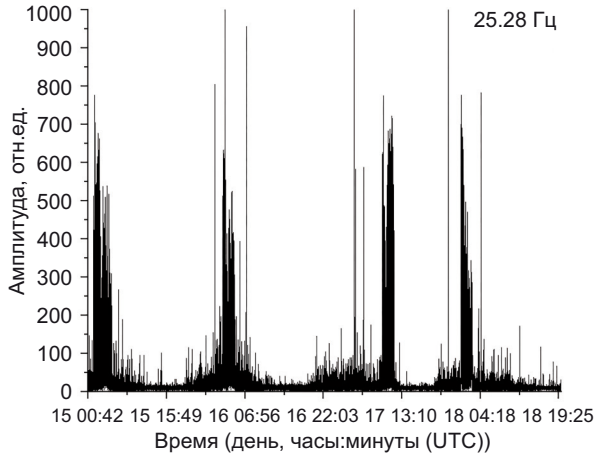

Рис. 10. Изменение амплитуды спектра сейсмического сигнала на частоте 25.28 Гц за период 15–18 ноября 2021 г.

Fig. 10. Change in the amplitude of the seismic signal spectrum at a frequency of 25.28 Hz for the period November 15–18, 2021.

В других частотных диапазонах реакция сейсмического шума на электровоздействие не прослеживается. Таким образом, изменения сейсмоакустического шума, регистрируемые гидрофоном, оказались более чувствительными к электровоздействиям, чем уровень сейсмического шума.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ. СРАВНЕНИЕ С ВЛИЯНИЕМ ДРУГИХ ЭКЗОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

Реакция среды на малоглубинные зондирования в форме изменения уровня сейсмоакустического и высокочастотного (~25 Гц) сейсмического шума проявилась локально, вблизи источника электровоздействия. Этот ключевой результат позволяет устранить возникающее на первый взгляд противоречие с выводами, что влияние на сейсмический режим могут оказывать только импульсы тока наиболее мощных источников, вклад энергии которых сравним с сейсмической энергией слабого землетрясения [Sychev et al., 2010; Bogomolov, 2010, 2013; Zeigarnik et al., 2022]. Дело в том, что источники сейсмоакустических сигналов с частотой ~25 Гц находятся недалеко от приемника и, как следствие, на небольшой глубине. В противном случае сейсмоакустический шум и, по-видимому, высокочастотный сейсмический шум не могли быть зарегистрированы из-за затухания на расстояниях в несколько длин волны λ (λ~200 м для частоты 25 Гц, а расстояние до источников сейсмоакустического шума не превышает 1 км). Глубина преимущественного растекания тока в квазиоднородном полупространстве составляет около трети длины диполя [Kolesnikov, 1984], в нашем случае это ~130 м. Тем не менее по оценкам, основанным на классических формулах [Kolesnikov, 1984], характерная плотность тока на километровой глубине составляла $j \sim 10^{-6}$ А/м^2 при амплитуде тока 13 А. Это значение согласуется с плотностью тока на глубине ~10 км при зондированиях на БГП (параметры зондирований приведены в работах [Sychev et al., 2010; Imashev, Rybin, 2023]). Стоит отметить, что на глубине 10–12 км лежит большинство гипоцентров землетрясений Северного Тянь-Шаня [Makarov et al., 2005]. В недавних работах [Novikov et al., 2020, 2023] аргументировано, что электрические токи, возбуждаемые в Земле естественными (ионосферные геомагнитные возмущения) и искусственными источниками, способны оказывать существенное влияние на сейсмический режим, когда средняя плотность тока больше 10^{-6} А/м^2. Таким образом, складывается общая картина реакции среды на электровоздействия на разных масштабах, и можно говорить о соответствии результатов малоглубинных электрозондирований результатам зондирований с применением мощных источников тока.

Из вышеизложенного вытекает то, что проведенные нами электрозондирования не должны отразиться в параметрах сейсмичности в зоне Центрально-Сахалинского разлома. Для прямой проверки этого положения была рассмотрена сейсмичность района проведения экспериментов за 2020–2022 гг. Для оценки использовался каталог землетрясений Южного Сахалина по данным локальной сети сейсмических станций СФ ФИЦ ЕГС РАН [Earthquakes..., 2022, 2023, 2024]. На рис. 11 представлено расположение эпицентров сейсмических событий и сегментов разломов в исследуемом районе, а также место проведения эксперимента. Красным цветом выделены эпицентры событий, произошедших в течение месяца после экспериментов 2020 г., ноября 2021 г. и апреля 2022 г., а зеленым цветом – в течение месяца после эксперимента ноября 2022 г., обработке которых было уделено особое внимание.

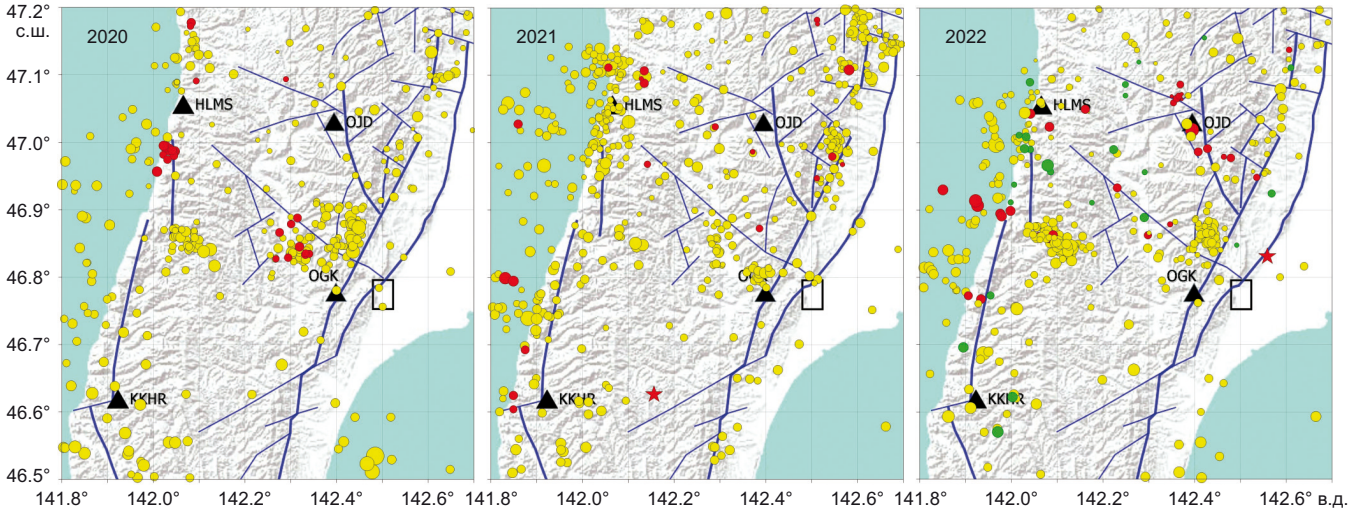

Рис. 11. Эпицентры землетрясений на исследуемой территории в 2020–2022 гг. Треугольниками показаны сейсмические станции, прямоугольник – место проведения ЭВ. Синие линии – региональные разломы, согласно [Rozhdestvensky, Saprygin, 1999].

Fig. 11. Epicenters of earthquakes in the study area in 2020–2022. Triangles show seismic stations, rectangle shows the location of the electric impact source. Blue lines are regional faults after [Rozhdestvensky, Saprygin, 1999].

Можно отметить, что практически все сейсмические события 2020 и 2022 гг. в течение месяца после ЭВ происходили в районах, характерных для сейсмичности того года, а большинство сейсмических событий после эксперимента 2021 г. достаточно хаотично распределены по району исследования. Сейсмические события, произошедшие в течение месяца после начала экспериментов, как было сказано выше, были проанализированы на предмет выявления возможных аномалий, связанных с «нетипичными» для временных промежутков положениями эпицентров и глубиной. После дополнительной обработки записей этих сейсмических событий с использованием данных всех доступных станций СФ ФИЦ ЕГС РАН были выделены два сейсмических события: первое после эксперимента в ноябре 2021 г. (19 ноября 2021 г.) и второе – после эксперимента в апреле 2022 г. (17 мая 2022 г.). Положения этих эпицентров отмечены красной звездочкой на картах эпицентров соответствующих годов (см. рис. 10). Особого внимания заслуживает сейсмическое событие, произошедшее 19 ноября 2021 г. в 17:35:52 UTC (ML=1.3; 46.626° с.ш.; 142.156° в.д., т.е. на пятые сутки после начала ЭВ. Гипоцентр этого события отмечен звездочкой на карте на рис. 11, его местоположение не характерно для проявления сейсмичности в 2021 г. в районе проведения электрозондирований (вблизи от одной из оперяющих структур ЦСР у с. Петропавловское). Для целей данного исследования обработка этого события была проведена с использованием записей станций, указанных на рис. 1 (включая записи сейсмометра СМЕ-6111). Результаты обработки и запись сейсмического события, сделанные в программе DIMAS [Droznin, Droznina, 2010], показаны на рис. 12.

Время возникновения сейсмического события после начала ЭВ, слабая магнитуда, а также его удаленность (30 км) от ЭВ в целом не противоречат описанным выше проявлениям слабой сейсмичности после ЭВ. Кроме того, можно отметить нехарактерную для коровой сейсмичности Сахалина малую глубину гипоцентра события – 3.3 км, т.е. расположение его гипоцентра в слое с глубиной h=0–5 км, в котором, согласно [Tarasov, Tarasova, 2016], наблюдается наиболее значительное приращение суммарной сейсмической энергии после ЭВ. Сейсмическое событие, произошедшее 17 мая 2022 г. (19:14:02 UTC), несмотря на некоторую удаленность от даты окончания эксперимента (20 дней), также характеризуется малой глубиной гипоцентра (4.8 км) и располагается в пределах 7 км от места проведения ЭВ. По совокупности данных факторов можно заключить, что гипотеза об отсутствии изменений сейсмичности в период электрозондирований в районе эксперимента не подтвердилась. Не исключено триггерное происхождение данных сейсмических событий, однако имеющихся данных недостаточно для увязки этих землетрясений с электрозондированиями 2021–2022 гг. Могли проявиться другие экзогенные факторы, стимулирующие слабую сейсмичность.

Для анализа этого вопроса и для сравнения влияния электрозондирований и таких экзогенных факторов, как барические и ветровые нагрузки, рассматривались записи сейсмического шума на станциях, указанных на рис. 1. Для записей волновых форм станций СФ ФИЦ ЕГС РАН «Ожидаево» и «Холмск», сейсмометра СМЕ-6111, а также сейсмометров Zetlab 7152-N и СПВ-3к (для экспериментов, на период которых они устанавливались) в программе DIMAS были построены

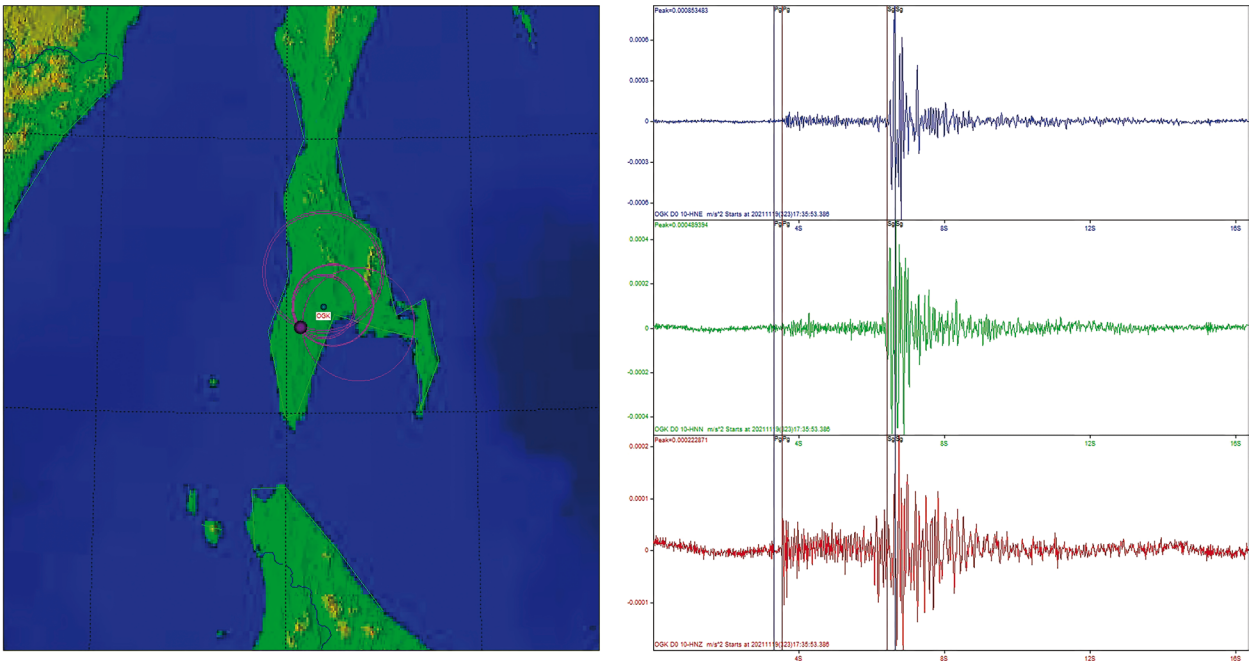

Рис. 12. Расположение эпицентра землетрясения 19.11.2021 г. и запись его волновой формы.

Fig. 12. Location of the epicenter of the November 19, 2021 earthquake and its waveform record.

графики средних значений огибающей сигнала (временное окно 600 с) сейсмического шума с предварительно уменьшенной до 10 Гц частотой дискретизации. Продолжительность выбранного для анализа интервала записей – 6–9 суток, включающие как сам период эксперимента, так и сутки до него и несколько суток после.

Огибающие от каждого из трех экспериментов представлены на рис. 13, 14, 15 с дополнительной информацией о скорости ветра по данным ближайших метеорологических станций в районе исследования [Weather archive in Kholmsk, 2024; Weather archive in Ogonki, 2024]. Данные из указанных архивов представляют собой значения скорости ветра (м/с), измеренной на высоте 10–12 м над земной поверхностью и усредненной за 10-минутный период.

Результаты, представленные на рис. 13, 14, 15, свидетельствуют о влиянии скорости ветра на изменение общего фона сейсмического шума. Вместе с тем по графикам на этих рисунках также можно заметить, что большая амплитуда сейсмического сигнала совпадает с минимумом скорости ветра. Для уточнения возможной корреляции с воздействием атмосферных факторов дополнительно был использован синоптический обзор [Mezentseva, Kaptyug, 2021, 2022], содержащий информацию о циклонах в периоды проведения экспериментов по данным гидрометеорологических бюллетеней ФГБУ «Дальневосточный региональный научно-исследовательский гидрометеорологический институт» (ДВНИГМИ). Карта прохождения циклонов в ноябре 2021 г. и апреле 2022 г. показана на рис. 16 с указанием значений давления в центре циклона в указанные даты.

Как известно [Adushkin et al., 2008], влияние барических вариаций, вызываемых циклонами, на характеристики сейсмического шума (особенно в низком диапазоне частот) приводит к увеличению амплитуды микросейсмического фона в десятки раз. В нашем случае видим хорошо выраженную корреляцию уровня сейсмического шума и силы ветра для всех станций, данные которых использованы для исследования (даже при различии частотных характеристик приборов на этих станциях). Изменения сейсмического шума под влиянием ветра происходят на значительно большей территории, чем площадка полигона «Петропавловское», где проводились электрозондирования и отмечались сейсмоакустические отклики на них. На фоне ветровых изменений отклики сейсмического шума на электрозондирования становятся трудноразличимыми, так что неудивительно, что шумовая реакция среды была замечена приборами, расположенными на полигоне «Петропавловское» вблизи источника зондирований. Стоит отметить, что в период электрозондирований в ноябре 2021 г. и апреле 2022 г. не наблюдалось даже обычного изменения суточного уровня сейсмического шума, вызванного техногенными факторами в дневное время, в особенности в середине рабочей недели.

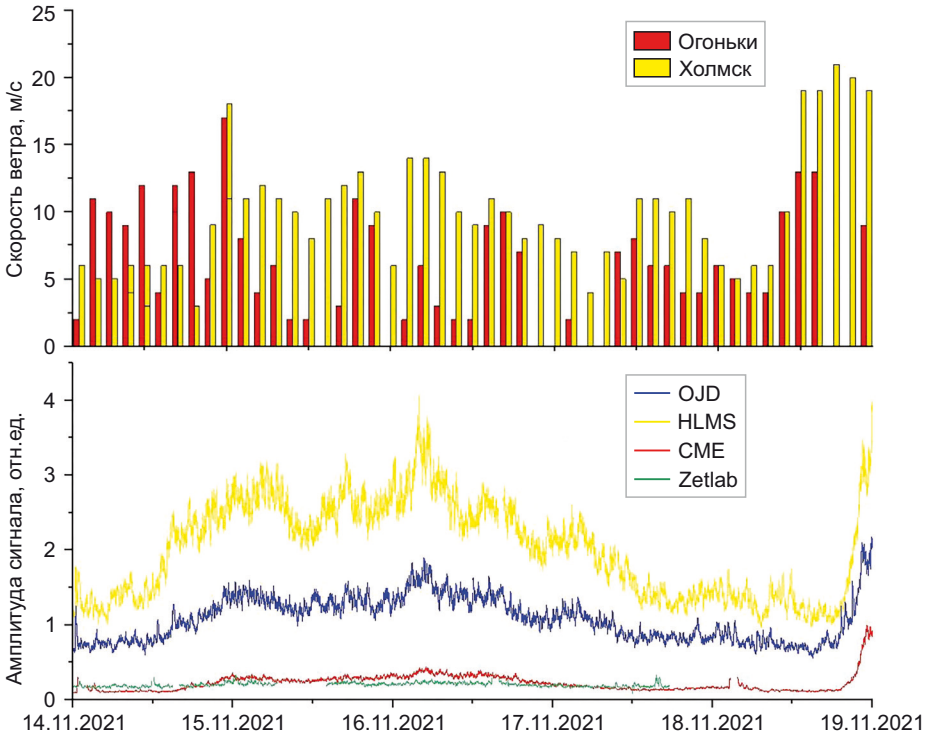

Рис. 13. Изменение уровня сейсмического шума на станциях южной части о. Сахалин (внизу) и соответствующие этому периоду природные воздействия (скорость ветра) (вверху) для эксперимента в ноябре 2021 г.

Fig. 13. Changes in seismic noise levels at the stations in the South Sakhalin (botton) and the same-period natural impacts (wind speed) (top) for the experiment in November 2021.

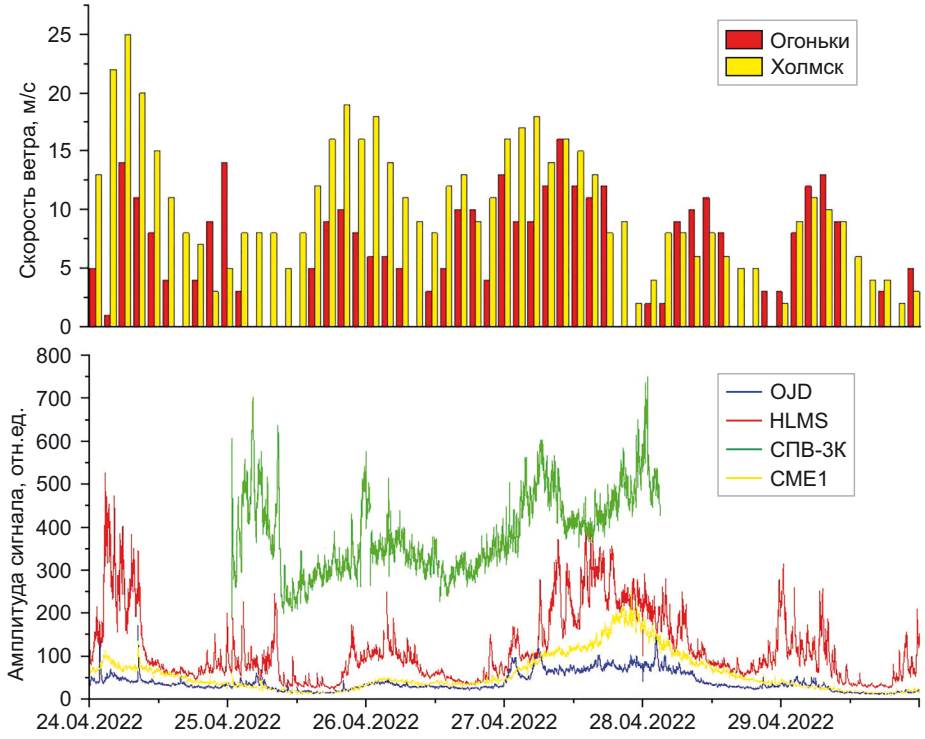

Рис. 14. Изменение уровня сейсмического шума на станциях южной части о. Сахалин (внизу) и соответствующие этому периоду природные воздействия (скорость ветра) (вверху) для эксперимента в апреле 2022 г.

Fig. 14. Changes in seismic noise levels at the stations in the South Sakhalin (botton) and the same-period natural impacts (wind speed) (top) for the experiment in April 2022.

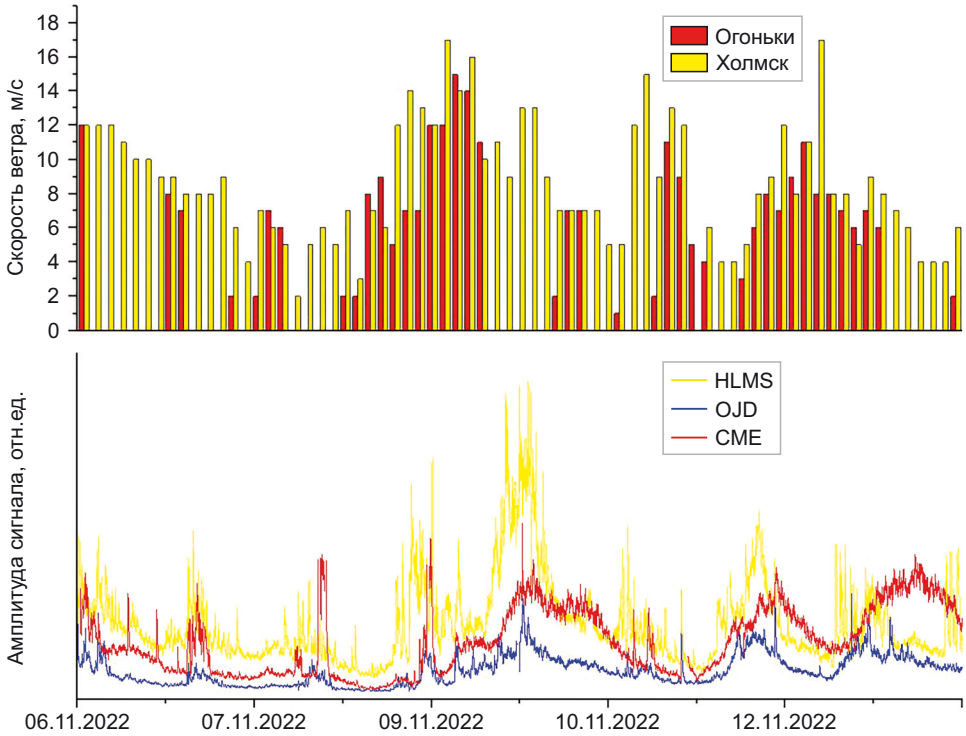

Рис. 15. Изменение уровня сейсмического шума на станциях южной части о. Сахалин (внизу) и соответствующие этому периоду природные воздействия (скорость ветра) (вверху) для эксперимента в ноябре 2022 г.

Fig. 15. Changes in seismic noise levels at the stations in the South Sakhalin (botton) and the same-period natural impacts (wind speed) (top) for the experiment in November 2022.

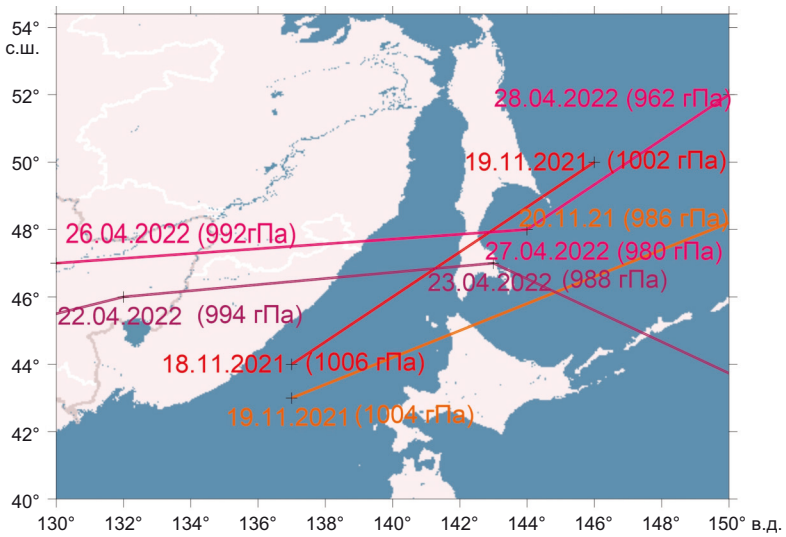

Рис. 16. Карта прохождения циклонов в периоды проведения экспериментов в ноябре 2021 г. и апреле 2022 г.
Fig. 16. Map of cyclone passages during the experimental periods of November 2021 and April 2022.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам четырехэтапного эксперимента по электрозондированию, проведенного в 2021–2022 гг. в зоне Центрально-Сахалинского разлома (сегмент у с. Петропавловское, Анивский район), установлен эффект возрастания амплитуды сейсмоакустических и высокочастотных сейсмических шумов в приповерхностных слоях вблизи возбуждающего диполя под влиянием импульсов тока. Прирост уровня шумов происходит без задержек после начала ЭВ – подачи на диполь серии однополярных токовых импульсов, что согласуется с недавними детальными исследованиями сейсмики и геоакустики на площадке зондирований на БГП. Полученные результаты также согласуются с результатами работы А.С. Закупина и др. [Zakupin et al., 2014] о вариациях сейсмоакустической эмиссии, которые регистрировались скважинными приборами на том же полигоне при электрозондированиях.

Спад амплитуды сейсмоакустического шума при завершении зондирования происходит резко, как и прирост в начале сеанса. На станциях сейсмической сети Сахалинского филиала ФИЦ ЕГС РАН и мобильных пунктах с короткопериодными сейсмометрами, удаленных более чем на 5 км от источника электровоздействий, такое возрастание амплитуды шумов в ходе сеансов ЭВ не наблюдалось. Таким образом, эффект сейсмоакустического отклика на электрозондирования локализован около первичного диполя.

По записям волновых форм всех широкополосных и короткопериодных сейсмометров, использованных для данного исследования, обнаружены изменения уровня сейсмического шума, коррелирующие с прохождением циклонов над южной частью о. Сахалин, что вызывает сильные ветровые нагрузки и перепады атмосферного давления. Это может свидетельствовать о том, что динамические атмосферные воздействия оказывают более сильное влияние на источники микросейсм и деструкцию среды в зоне Центрально-Сахалинского разлома, чем электровоздействия при проведенных малоглубинных зондированиях.

Выделены сейсмические события, произошедшие в течение месяца после начала экспериментов в ноябре 2021 г. и апреле 2022 г., которые по частотности и нетипичному расположению гипоцентров можно предположительно отнести к событиям триггерной сейсмичности. Этот неожиданный результат нуждается в подтверждении при проведении новых экспериментов и расширении статистики подобных сейсмических событий и периодов с электрозондированиями. В целом, полученные результаты создали задел для дальнейших более детальных исследований реакции среды на электрозондирования, которые планируется провести в ближайшие годы в нескольких районах южной части острова Сахалин. Первостепенное значение для этого, а в перспективе – для создания системы активного электросейсмического мониторинга разломных зон в сейсмоопасных регионах имеет совершенствование источников тока и их оптимизация по соотношению выдаваемой мощности и стоимости.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Adushkin V.V., Loktev D.N., Spivak A.A., 2008. The Effect of Baric Disturbances in the Atmosphere on Microseismic Processes in the Crust. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 44, 510–517. https://doi.org/10.1134/S1069351308060086.

Antonova L.V., Aptikaev F.F., Kurochkina R.I., Nersesov I.L., Nikolaev A.V., Ruzaikin A.I., Sedova E.N., Sitkinov A.V., Tregub F.S., Fedorskaya L.D., Khalturin V.I., 1978. Experimental Studies of the Earth's Interior. Nauka, Moscow, 156 p. (in Russian) [Антонова Л.В., Аптикаев Ф.Ф., Курочкина Р.И., Нерсесов И.Л., Николаев А.В., Рузайкин А.И., Седова Е.Н., Ситкинов А.В., Трегуб Ф.С., Федорская Л.Д., Халтурин В.И. Экспериментальные исследования недр Земли. М.: Наука, 1978. 156 с.].

Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., Fainberg E.B., 2005. Electromagnetically Induced Spatial-Temporal Structure of Seismicity. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 41 (6), 475–484.

Bogomolov L.M., 2010. Electromagnetic Effect on Microcrack Kinetics and Electro-Induced Variations in Acoustic Emission of Rocks. Physical Mesomechanics 13 (3), 39–56 (in Russian) [Богомолов Л.М. О механизме электромагнитного влияния на кинетику микротрещин и электростимулированных вариациях акустической эмиссии породных образцов // Физическая мезомеханика. 2010. Т. 13. № 3. С. 39–56].

Bogomolov L.M., 2013. Search for New Approaches to Explain Mechanisms of Interrelations Between Seismicity and Electromagnetic Effects. Vestnik of Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences 3, 12–18 (in Russian) [Богомолов Л.М. Поиск новых подходов к объяснению механизмов взаимосвязи сейсмичности и электромагнитных эффектов // Вестник ДВО РАН. 2013. № 3. С. 12–18].

Chelidze T., De Rubels V., Matcharashvili T., Tosi P., 2006. Influence of Strong Electromagnetic Discharges on the Dynamics of Earthquakes Time Distribution in the Bishkek Test Area (Central Asia). Annals of Geophysics 49 (4/5), 961–975. https://doi.org/10.4401/ag-3109.

Droznin D.V., Droznina S.Y., 2010. Program for Seismic Signal Processing DIMAS. Seismic Instruments 46 (3), 22–34 (in Russian) [Дрознин Д.В., Дрознина С.Я. Интерактивная программа обработки сейсмических сигналов DIMAS // Сейсмические приборы. 2010. Т. 46. № 3. С. 22–34].

Dudchenko I.P., Gulyakov S.A., Stovbun N.S., 2023. Electrical Impulse Geophysical Generator. Utility Model Patent № RU 222321 U1 of December 20, 2023. ROSPATENT, Moscow (in Russian) [Дудченко И.П., Гуляков С.А., Стовбун Н.С. Электроимпульсный геофизический генератор: Патент на полезную модель № RU 222321 U1 от 20.12.2023. М.: РОСПАТЕНТ, 2023].

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 (in Russian) [Дудченко И.П., Костылев Д.В., Гуляков С.А., Стовбун Н.С. Геофизический генератор импульсных напряжений для сейсмоэлектрической разведки недр // Геосистемы переходных зон. 2021. Т. 5. № 1. С. 46–54]. https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.046-054.

Earthquakes in Russia in 2020, 2022. GS RAS, Obninsk, 204 p. (in Russian) [Землетрясения России в 2020 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2022. 204 с.].

Earthquakes in Russia in 2021, 2023. GS RAS, Obninsk, 224 p. (in Russian) [Землетрясения России в 2021 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. 224 с.].

Earthquakes in Russia in 2022, 2024. GS RAS, Obninsk, 230 p. (in Russian) [Землетрясения России в 2022 году. Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2023. 230 с.].

Fokina T.A., Safonov D.A., Kostylev D.V., Mikhaylov V.I., 2019. Sakhalin. Earthquakes of the Northern Eurasia 22 (2013), 173–183 (in Russian) [Фокина Т.А., Сафонов Д.А., Костылев Д.В., Михайлов В.И. Сахалин // Землетрясения Северной Евразии. 2019. Вып. 22 (2013 г.). С. 173–183]. https://doi.org/10.35540/1818-6254.2019.22.15.

Hunter J.D., 2007. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. Computing in Science & Engineering 9 (3), 90–95. https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55.

Imashev S.A., Cheshev M.E., 2019. Fractal Analysis of Geoacoustic Signals Registered at Bishkek Geodynamic Test Area. Izvestia KSTU af. I. Razzakov 2-1 (50), 286–292 (in Russian) [Имашев С.А., Чешев М.Е. Фрактальный анализ геоакустических сигналов, регистрируемых на территории Бишкекского геодинамического полигона // Известия КГТУ им. И. Раззакова. 2019. № 2-1 (50). С. 286–292].

Imashev S.A., Rybin A.K., 2023. Seismic and Geoacoustic Responses of the Earth's Crust to Sensing with High Energy Electric Pulses at the Territory of the Bishkek Geodynamic Test Area. Science and Technological Developments 102 (2–3), 63–88 (in Russian) [Имашев С.А., Рыбин А.К. Сейсмические и геоакустические отклики земной коры на зондирования мощными электрическими импульсами на территории Бишкекского геодинамического полигона // Наука и технологические разработки. 2023. Т. 102. № 2–3. С. 63–88]. DOI:10.21455/std2023.2-3-3.

Kolesnikov V.P., 1984. The Grounds of Electrical Sounding Interpretation. Nauka, Moscow, 400 p. (in Russian) [Колесников В.П. Основы интерпретации электрических зондирований. М.: Наука, 1984. 400 с.].

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 (in Russian) [Костылев Д.В., Богинская Н.В. Сейсмоакустические наблюдения с применением молекулярно-электронных гидрофонов на Сахалине и южных Курильских островах (о. Кунашир) // Геосистемы переходных зон. 2020. Т. 4. № 4. С. 486–499]. https://doi.org/10.30730/gtrz.2020.4.4.486-499.

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 324, 012009. https://doi.org/10.1088/1755-1315/324/1/012009.

Makarov V.I., Abdarakhmanov K.E., Aitmatov I.T., Bakirov A.B., Bragin V.D., Duchkov A.D., Zeigarnik V.A., Zubovich A.V. et al., 2005. Recent Geodynamics in the Areas of Intracontinental Collisional Orogeny (Central Asia). Nauchny Mir, Moscow, 400 p. (in Russian) [Макаров В.И., Абдарахманов К.Е., Айтматов И.Т., Бакиров А.Б., Брагин В.Д., Дучков А.Д., Зейгарник В.А., Зубович А.В. и др. Современная геодинамика областей внутриконтинентального коллизионного горообразования (Центральная Азия). М.: Научный мир, 2005. 400 с.].

Mezentseva L.I., Kaptyug V.A., 2021. Monthly Hydrometeorological Bulletin of Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute. Meteorological Conditions. November 2021. 21 p. (in Russian) [Мезенцева Л.И., Каптюг В.А. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Метеорологические условия. Ноябрь 2021 г. 21 с.]. Available from: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2021/11/2021.11_ch1_meteo.pdf (Last Accessed August 22, 2024).

Mezentseva L.I., Kaptyug V.A., 2022. Monthly Hydrometeorological Bulletin of Far Eastern Regional Hydrometeorological Research Institute. Meteorological Conditions. April 2022. 20 p. (in Russian) [Мезенцева Л.И., Каптюг В.А. Ежемесячный гидрометеорологический бюллетень ДВНИГМИ. Метеорологические условия. Апрель 2022 г. 20 с.]. Available from: http://www.ferhri.ru/images/stories/FERHRI/Bulletins/Bul_2022/4/2022.04_ch1_meteo.pdf (Last Accessed August 16, 2024).

Novikov V., Ruzhin Yu., Sorokin V., Yaschenko A., 2020. Space Weather and Earthquakes: Possible Triggering of Seismic Activity by Strong Solar Flares. Annals of Geophysics 63 (5), A554. https://doi.org/10.4401/ag-7975.

Novikov V.A., Sorokin V.M., Yaschenko A.K., Mushkarev 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 Russian) [Новиков В.А., Сорокин В.М., Ященко А.К., Мушкарев Г.Ю. Физическая модель и численные оценки теллурических токов, генерируемых рентгеновским излучением солнечной вспышки // Динамические процессы в геосферах. 2023. Т. 15. № 1. С. 23–44]. https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_23.

Panteleev I.A., Gavrilov V.A., 2015. Implications of Electrokinetic Processes for the Intensity of Geoacoustic Emission in the Time Vicinity of a Tectonic Earthquake: A Theoretical Study. Russian Journal of Earth Sciences 15, ES4003. https://doi.org/10.2205/2015ES000557.

Rozhdestvensky V.S., Saprygin S.M., 1999. Active Faults and Seismicity in the South Sakhalin. Russian Journal of Pacific Geology 6, 59–70 (in Russian) [Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине // Тихоокеанская геология. 1999. № 6. С. 59–70].

Semenova E.P., Kostylev D.V., Mikhailov V.I., Parshina I.A., Fercheva V.N., 2018. Evaluation Seismicity in Southern Sakhalin with the Use of the Method SOUS'09. Geosystems of Transition Zones 2 (3), 191–195 (in Russian) [Семенова Е.П., Костылев Д.В., Михайлов В.И., Паршина И.А., Ферчева В.Н. Оценка сейсмичности Южного Сахалина по методике СОУС'09 // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 3. С. 191–195]. https://doi.org/10.30730/2541-8912.2018.2.3.191-195.

Smirnov V.B., Zavyalov A.D., 2012. Seismic Response to Electromagnetic Sounding of the Earth's Lithosphere. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 48, 615–639. https://doi.org/10.1134/S1069351312070075.

Sobolev G.A., Ponomarev A.V., Kol'tsov A.V., Kruglov A.A., Lutsky V.A., Tsyvinskaya Yu.V., 2006. The Effect of Water Injection on Acoustic Emission in a Long-Term Experiment. Russian Geology and Geophysics 47 (5), 608–621 (in Russian) [Соболев Г.А., Пономарев А.В., Кольцов А.В., Круглов А.А., Луцкий В.А., Цывинская Ю.В. Влияние инжекции воды на акустическую эмиссию при долговременном эксперименте // Геология и геофизика. 2006. Т. 47. № 5. С. 608–621].

Sychev V.N., Avagimov A.A., Bogomolov L.M., Zeigarnik V.A., Sycheva N.A., 2008. On the Triggering Effect of Electromagnetic Pulses on Weak Seismicity in Relation to the Problem of Excess Tectonic Stress Release. In: Geodynamics and Stressed State of the Earth's Interior. IM SB RAS, Novosibirsk, p. 179–189 (in Russian) [Сычев В.Н., Авагимов А.А., Богомолов Л.М., Зейгарник В.А., Сычева Н.А. О триггерном влиянии электромагнитных импульсов на слабую сейсмичность в связи с проблемой разрядки избыточных тектонических напряжений // Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Новосибирск: ИГД СО РАН, 2008. С. 179–189].

Sychev V.N., Bogomolov L.M., Rybin A.K., Sycheva N.A., 2010. The Impact of Electromagnetic Sounding of the Earth's Crust on the Seismic Regime of the Bishkek Geodynamic Test Site. In: Trigger Effects in Geosystems. Proceedings of the All-Russian Seminar Conference (June 22–24, 2010). GEOS, Moscow, p. 316–325 (in Russian) [Сычев В.Н., Богомолов Л.М., Рыбин А.К., Сычева Н.А. Влияние электромагнитных зондирований земной коры на сейсмический режим территории Бишкекского геодинамического полигона // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы всероссийского семинара-совещания (22–24 июня 2010 г.). М: ГЕОС, 2010. С. 316–325].

Tarasov N.T., 1997. Variation of Seismicity of the Earth Crust by Electric Impact. Doklady Earth Sciences 353A (3), 445–448.

Tarasov N.T., Tarasova N.V., 2016. Seismic Activation in the Active Fault Area under the Effect of Electromagnetic Fields and Explosions. In: Tectonophysics and Topical Problems in Geosciences. Proceedings of 4th Tectonophysical Conference at Institute of Physics of the Earth (October 03–08, 2016). Vol. 1. IPE RAS, Moscow, p. 571–577 (in Russian) [Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В. Активизация сейсмичности в области активного разлома под действием электромагнитных полей и взрывов // Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Материалы Четвертой тектонофизической конференции в ИФЗ РАН (03–08 октября 2016 г.). М.: ИФЗ РАН, 2016. Т. 1. С. 571–577].

Tarasov N.T., Tarasova N.V., Avagimov A.A., Zeigarnik V.A., 1999. The Effect of High-Power Electromagnetic Pulses

on the Seismicity Regime of the Central Asia and Kazakhstan. Journal of Volcanology and Seismology 4–5, 152–160 (in Russian) [Тарасов Н.Т., Тарасова Н.В., Авагимов А.А., Зейгарник В.А. Воздействие мощных электромагнитных импульсов на сейсмичность Средней Азии и Казахстана // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 152–160].

Turuntaev S.B., Melchaeva O.Yu., 2010. An Analysis of Triggered Seismic Processes by Means of Non-Linear Dynamics Methods. In: V.V. Adushkin, G.G. Kocharyan (Eds), Trigger Effects in Geosystems. Proceedings of the All-Russian Seminar-Conference (June 22–24, 2010). GEOS, Moscow, p. 124–135 (in Russian) [Турунтаев С.Б., Мельчаева О.Ю. Анализ триггерных сейсмических процессов при помощи методов нелинейной динами // Триггерные эффекты в геосистемах: Материалы Всероссийского семинар-совещания (22–24 июня 2010 г.) / Ред. В.В. Адушкин, Г.Г. Кочарян. М: ГЕОС, 2010. С. 124–135].

Velikhov E.P., Nikolaev A.V., Novikov V.A., 2004. Research Project "Study of the Deep Geoelectric Structure of the Far East, Geophysical Monitoring, and Seismic Hazard Mitigation Using High-Power Pulse MHD Generator". RRC "Kurchatov Institute", Moscow, 15 p. (in Russian) [Велихов Е.П., Николаев А.В., Новиков В.А. Программа НИР «Исследование глубинного геоэлектрического строения Дальнего Востока, геофизический мониторинг и уменьшение сейсмической опасности с помощью мощного импульсного МГД-генератора». М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2004. 15 с.].

Volikhin A.M., Bragin V.D., Zubovich A.V., Koshkin N.A., Trapeznikov Yu.A., 1993. The Manifestation of Geodynamic Processes in Geophysical Fields. Nauka, Moscow, 158 p. (in Russian) [Волыхин А.М., Брагин В.Д., Зубович А.В., Кошкин Н.А., Трапезников Ю.А. Проявление геодинамических процессов в геофизических полях. М.: Наука, 1993. 158 с.].

Weather Archive in Kholmsk, 2024. Available from: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Холмске (Last Accessed August 10, 2024).

Weather Archive in Ogonki, 2024. Available from: https://rp5.ru/Архив_погоды_в_Огоньках (Last Accessed August 11, 2024).

Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Mubassarova V.A., Il'ichev P.V., 2014. Seismoacoustic Responses to High-Power Electric Pulses from Well Logging Data at the Bishkek Geodynamical Test Area. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 50, 692–706. https://doi.org/10.1134/S1069351314040193.

Zeigarnik V.A., Bogomolov L.M., Novikov V.A., 2022. Electromagnetic Triggering of Earthquakes: Field Observations, Laboratory Experiments, and Physical Mechanisms – Review. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 58, 30–58. https://doi.org/10.1134/S1069351322010104.