

ФИЗИКА

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164>

Научная статья

Полный текст на русском языке

УДК 550.377



Кратковременные вариации электротеллурического поля вблизи очага землетрясения на о. Сахалин

*А. С. Закупин**, *И. П. Дудченко*, *Л. М. Богомолов*, *С. А. Гуляков*,
А. И. Казаков, *Н. С. Стовбун*

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, г. Южно-Сахалинск,
ул. Науки 1Б, Россия

Аннотация. В работе представлены результаты анализа данных электротеллурических потенциалов, полученных в пункте измерений, развернутом в июне 2023 года на территории ИМГиГ ДВО РАН в г. Южно-Сахалинск. Уже в первые месяцы работы были обнаружены серии квазипериодических всплесков (импульсов) в ночное время. Сигналы длительностью 4-5 секунд и с периодом следования 130-150 секунд имеют разную форму, которая является производной от некоего оригинального синусоподобного сигнала. Серии отмечались с 20 июля по 11 сентября 2023 г., а их средняя длительность колеблется в районе 8-9 часов. С 12 сентября 2023 года по 10 февраля 2024 года серии не обнаружены. Максимальная интенсивность сигналов и серий в целом наблюдается в период с 5 по 10 августа. В этот же период (9 августа 2023 года) рядом с точкой измерений (в круге с радиусом 0,25 градуса с центром на полигоне) произошло землетрясение умеренной силы с $M = 3,8$, причём за весь период наблюдений оно было самым сильным из 2 событий с $M > 3$, произошедших в данном районе. Перед вторым, более слабым землетрясением, подобных серий совсем не было обнаружено. Появление обнаруженных серий квазипериодических импульсов может быть связано с подготовкой очага землетрясения, однако для подтверждения этой гипотезы потребуются дополнительные наблюдения.

Ключевые слова: серия электрических сигналов, предвестник, теллурическое поле, землетрясение, искаженный сигнал.

Получение: 15.02.2024; Исправление: 26.02.2024; Принятие: 27.02.2024; Публикация онлайн: 07.03.2024

Для цитирования. Закупин А. С., Дудченко И. П., Богомолов Л. М. и др. Кратковременные вариации электротеллурического поля вблизи очага землетрясения на о. Сахалин // Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки. 2024. Т. 46. № 1. С. 134-164. EDN: FIGWJO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164>.

Финансирование. Работа не выполнялась в рамках фондов.

Конкурирующие интересы. Конфликт интересов в отношении авторства и публикации нет.

Авторский вклад и ответственность. Авторы участвовали в написании статьи и полностью несут ответственность за предоставление окончательной версии статьи в печать.

*Корреспонденция: ✉ E-mail: dikii79@mail.ru

Контент публикуется на условиях Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Закупин А. С., Дудченко И. П., Богомолов Л. М. и др., 2024

© ИКИР ДВО РАН, 2024 (оригинал-макет, дизайн, составление)



PHYSICS

 <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164>

Research Article

Full text in Russian

MSC 86A25



Short Temporal Variations of Electrotelluric Field in the Vicinity of the Earthquake Source-Site in the Sakhalin Island

*A. S. Zakupin**, *I. P. Dudchenko*, *L. M. Bogomolov*, *S. A. Gulyakov*,
A. I. Kazakov, *N. S. Stovbun*

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, 693022, Yuzhno-Sakhalinsk,
Nauki str., 1B, Russia

Abstract. The work represents the results of analysis of electro-telluric potentials data obtained at the Yuzhno-Sakhalinsk test site (deployed in June 2023 on the territory of the IMGG FEB RAS). Unexpectedly, a new kind of signals – series of quasiperiodic spikes (pulses) in night times were found in first few months after start of recording. Signals of 4-5 s length and of 130-150 s repetition period have a various waveform, which is derived from some primary quasi-sinusoidal signal. Such series were recorded from July 20 to September 11, 2023, and their average duration was nearly 8-9 hours. No episodes were found after September 12, up to December 20. The maximal intensity of the signals and the series as a whole was revealed in the period from 5 to 10 August. During this period the moderate earthquake $M=3.8$ occurred on 9 August, 2023 in the vicinity of measurement point (within a circular zone of 0.25 degrees radius around the test site) It was the strongest event from pair of that occurred in the given zone, the magnitudes were being $M = 3.8$ (08/09/2023) and $M = 3.1$ (09/19/2023). No similar series were observed before the second earthquake, being the weaker. Origination of quasiperiodic pulses series could be related to the preparedness of earthquake source – site. However extra surveys are required to proof this hypothesis.

Key words: series of electrical signals, precursor, telluric field, earthquake, distorted signal.

Received: 15.02.2023; Revised: 26.02.2024; Accepted: 27.02.2024; First online: 07.03.2024

For citation. Zakupin A. S., Dudchenko I. P., Bogomolov L. M. et al. Short temporal variations of electrotelluric field in the vicinity of the earthquake source-site in the Sakhalin island. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki.* 2024, 46: 1, 134-164. EDN: FIGWJO. <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164>.

Funding. The work was not carried out within the framework of funds.

Competing interests. There are no conflicts of interest regarding authorship and publication.

Contribution and Responsibility. All authors contributed to this article. Authors are solely responsible for providing the final version of the article in print. The final version of the manuscript was approved by all authors.

*Correspondence:  E-mail: dikii79@mail.ru

The content is published under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

© Zakupin A. S., Dudchenko I. P., Bogomolov L. M. et al., 2024

© Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation, 2024 (original layout, design, compilation)



Введение

За долгую историю исследований естественного электромагнитного (ЭМ) поля Земли, начиная с работы [1] в XIX в., вплоть до 20-х годов нашего века [2, 3] получено огромное множество результатов о вариациях электротеллурического (ЭТП) и геомагнитного поля (компонент ЭМ поля) перед землетрясениями. Такие вариации, выделяющиеся относительно поведения сигналов в предыстории (ранее называемые аномалиями), анализировались как возможные предвестники сильного землетрясения (ЗЛТ) [4–6]. Вариации параметров ЭМ полей регистрировались на фоне шума, сопровождающего геодеформационный процесс [5, 7]. Из-за этого во многих случаях и в асейсмичные периоды также регистрировались аналогичные вариации тех же параметров, играющие роль ложных тревог.

Для анализа, действительно ли вариации параметров ЭМ поля являются достоверными (или статистически значимыми) предвестниками землетрясения, необходимы данные по разным сейсмически активным регионам и за разные периоды наблюдений. В последние десятилетия география исследований естественного ЭМ поля и, в частности, поисков предвестников значительно расширилась, что способствовало накоплению данных. Перечислим далее некоторые электромагнитные эффекты, зафиксированные перед ЗЛТ.

На о. Сахалин наблюдаются однополярные импульсы либо увеличение амплитуды напряжения по всем 6 приемным линиям крестообразной установки по методу VAN, резкие возмущения электротеллурического поля (ЭТП) - до 20 мВ и геомагнитного поля - до 5 мкТл [8, 9]. В Южной Якутии полный вектор геомагнитного поля увеличился на 200 нТл, меридиональная и широтная магнитные составляющие электромагнитного излучения (ЭМИ) увеличились на 20-25 тыс. имп/час [10]. В Восточной Сибири проведены измерения ЭМ поля с помощью ферритовой антенны и емкостных дифференциальных датчиков: наблюдается увеличение амплитуды напряженности ЭМИ от 40 до 100 мВ при фоновом уровне 10-20 мВ, количество импульсов ЭМИ возрастает на 5-15 тыс. имп/час, среднее количество импульсов электрической составляющей ЭМИ возрастает с 5-10 до 25 имп/час [11].

За пределами России также отмечены многие электромагнитные эффекты перед ЗЛТ. В Японии, Китае, Румынии и ряде других сейсмоактивных регионов в рядах меридиональной и широтной компонент магнитных вариаций зарегистрированы единичные либо парные импульсы на частотах 0-5 Гц амплитудой не более 10 пТл [12]. В Японии разница вертикальной составляющей геомагнитного поля в сейсмоактивной зоне и вне ее достигает 400 % при пороговых значениях 20-80 % [13], электрический потенциал на глубине в несколько сотен метров меняется в виде импульса определенной формы амплитудой до 100 мВ, что на порядок выше фоновой [6]. В Калифорнии (США) количество импульсов широтной магнитной составляющей возрастает до 50-250 при фоновых значениях 5-25 [3, 14, 15].

Опубликовано также множество работ, посвященных связи свойств электропроводности среды с напряженно-деформированным состоянием среды [16–20].

Среди всего многообразия работ по электромагнитным предвестникам землетрясений привлекают особое внимание наблюдения вариаций ЭТП в период от нескольких минут до нескольких суток до главного события, который соответствует временам краткосрочного прогноза [15, 21–29].

Вариации ЭТП обычно обнаруживались при измерениях разности потенциалов на полюсах диполя (двух разнесенных электродах, заглубленных в грунт), причем обычно используется несколько диполей разной ориентации и длины. В работах [27, 29], где детально исследовались закономерности вариаций ЭТП, было показано, что, с одной стороны, вариации приурочены к гипоцентру землетрясения, и их амплитуда убывает обратно пропорционально эпицентральному расстоянию, но, с другой стороны, имеет место избирательность появления таких возмущений: наблюдались не перед всеми главными событиями [27]. Этот подход, получивший название «метод VAN» по именам разработчиков Varotsos P., Alexopoulos K., Nomicos K., применялся для прогнозирования землетрясений в Греции [30]. Однако в ряде работ содержится критика как самого метода VAN [31, 32], так и достоверности прогнозов, сделанных на его основе [33]. Это указывает на актуальность продолжения исследований вариаций ЭТП, в том числе на Сахалине, где уже отмечен прецедент нескольких заблаговременных среднесрочных прогнозов землетрясений [34, 35].

В ряде работ отмечено, что краткосрочные предвестники землетрясений могут проявляться (помимо ЭТП) также в электрическом поле в приповерхностном слое атмосферы [36, 37], в сигналах электромагнитного излучения Земли [10, 12, 38, 39], геомагнитных возмущениях на очень низких частотах (ОНЧ) [3, 10, 12–14, 39–41], в параметрах распространения радиоволн ОНЧ диапазона [11, 42, 43].

Физический механизм возмущений ЭТП перед землетрясением связан, скорее всего, с эффектом поляризации среды перед возникновением макроразрыва, в частности, с изменением плотности двойных электрических слоев на поверхностях трещин, границах блоков или зерен и т.п. [44–47]. Определенный вклад в эти возмущения может вносить электромагнитное излучение нагруженных горных пород, генерируемое при образовании разрывов в самых разных диапазонах частот [48–55]. Конечно, эти эффекты, установленные в лабораторном эксперименте, при масштабировании на породные массивы могут дать лишь качественное объяснение вариаций ЭТП.

С учетом изложенного представляет интерес регистрация и анализ вариаций ЭТП вблизи очага землетрясения, которое произошло 09.08.2023 ($M = 3,8$) на Сахалине с эпицентром, лежащим на одной из ветвей Центрально-Сахалинского разлома [56] в непосредственной близости к пункту измерений ЭТП (рис. 1).

На рис. 1 также показаны все землетрясения с $M > 3$ (их всего 2) в круге радиусом $0,25^\circ$ с центром в ИМГиГ ДВО РАН. Задача настоящей работы состоит в проверке гипотезы об изменениях каких-либо параметров ЭТП в течение 10 суток в

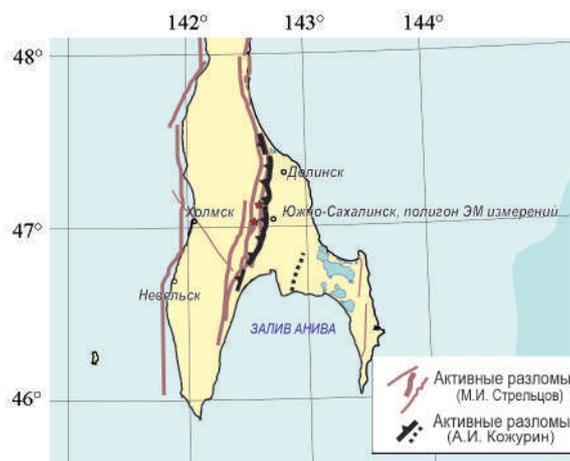


Рис. 1. Расположение основных региональных разломов в южной части о. Сахалин (согласно [56]), измерительного полигона ИМГиГ ДВО РАН и эпицентров двух землетрясений, произошедших 09.08.2023 ($M = 3,8$, звездочка южнее) и 19.09.2023 ($M = 3,1$, звездочка севернее). В период с 20 июля по 10 февраля в круге радиусом $0,25^\circ$ с центром в ИМГиГ ДВО РАН не было других событий с $M > 3$.

[Figure 1. Location of the main regional faults in the southern part of the Sakhalin Island (according to [56]), the measuring area of the IMGG FEB RAS and the epicenters of two earthquakes that occurred on 08/09/2023 ($M = 3.8$, asterisk to the south) and 09/19/2023 ($M = 3.1$, asterisk to the north). In the period from July 20 to February 10, there were no other events with $M > 3$ in a circle with a radius of 0.25° centered at the IMGG FEB RAS]

ближней зоне перед землетрясением. Стоит отметить, что если для подтверждения методики краткосрочного прогноза по параметрам ЭТП (необязательно по методу VAN) необходима большая статистика наблюдений, то для ее опровержения может быть высоко значим даже один пример (в силу соображений о приуроченности предвестника к месту будущего очага).

Методика измерений и аппаратное обеспечение

Измерения электротеллурического поля проводятся на площадке ИМГиГ ДВО РАН (г. Южно-Сахалинск, планировочный район Ново-Александровск, $47,0293^\circ$ с.ш., $142,7166^\circ$ в.д.) с июня 2023 года, но на начальном этапе в режиме различных тестов. Выбор места расположения системы измерений определялся необходимостью обеспечения бесперебойного электропитания для непрерывных круглогодичных измерений. Опыт полевых работ с наблюдением ЭТП на Сахалине в период 2003-2021 гг. [9] выявил, что зимой непрерывные измерения ЭТП вне населенных пунктов практически нереализуемы из-за снежных заносов.

После завершения тестирования с 20 июля 2023 г. система работает в стабильном режиме. Электротеллурическое поле регистрировалось при помощи

трех измерительных диполей длиной 100 м с заземленными полюсами – электродами. Схема ориентации диполей показана рис. 2.

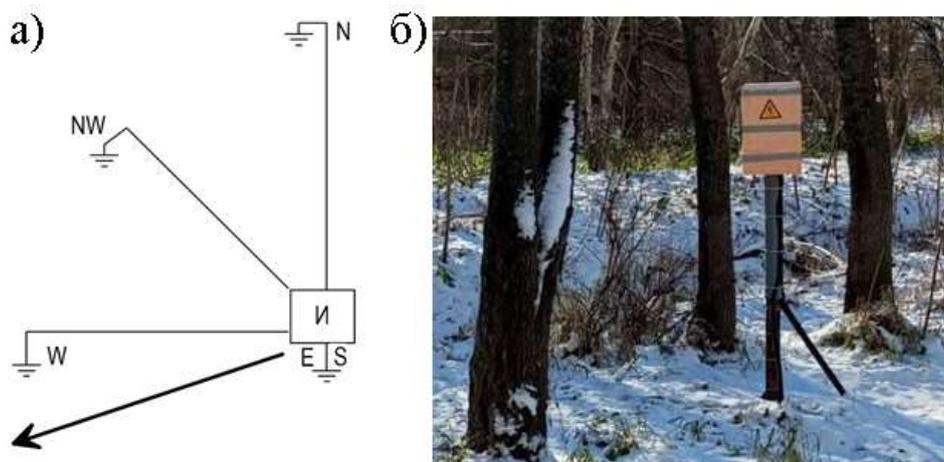


Рис. 2. Схема взаимной ориентации трех измерительных диполей на площадке ИМГиГ ДВО РАН (а) и внешний вид электроизмерительного модуля «ИМПульс» (б), (фото И.П. Дудченко). Обозначения диполей: N-S – направлен на север относительно общей точки, W-E – на запад, NW-SE – на северо-запад. Стрелка – направление на эпицентр землетрясения 09.08.2023, находящийся на расстоянии 7,6 км от пункта измерений. Длина диполей N-S, W-E и NW-SE – 100 м.

[Figure 2. Diagram of the mutual orientation of three measuring dipoles at the site of the INGG FEB RAS (a) and the appearance of the electrical measuring module “IMPulse” (b), photo by I.P. Dudchenko). Dipole designations: N-S – directed north relative to the common point, W-E – west, NW-SE – northwest. The arrow is the direction to the epicenter of the earthquake of 08/09/2023, located at a distance of 7.6 km from the measurement point. The length of dipoles N-S, W-E and NW-SE is 100 m.]

Каждый электрод представляет собой стальную трубу диаметром 50 мм с толщиной стенки 2 мм, забитую в грунт на 1,8 метра. Электросопротивление проводов самих диполей и линии до входа в каналы регистратора составило менее 10 Ом, что значительно меньше полного кажущегося сопротивления диполей, которое, согласно измерениям составляет 56 ± 2 Ом. Для получения данных измерений ЭТП в реальном времени, первичной обработки (фильтрации) аналогового сигнала, его преобразования в цифровые ряды и передачи на обработку и хранение применен измерительный узел, разработанный в Центре коллективного пользования ИМГиГ ДВО РАН, названный «Измерительный Модуль-Прототип», кратко «ИМПульс». Внешний вид модуля «ИМПульс» представлен на рис. 2б. Ядро модуля составляет аналого-цифровой преобразователь (АЦП) типа L-780M производства российской компании L-Card. Сигналы ЭТП с трех диполей (N-S, W-E и NW-SE), поступающие на вход АЦП, образовали три канала измерения относительно одной общей точки. Измерение

синфазного сигнала несколько увеличивало уровень помех, что учитывалось при обработке и интерпретации (если влияние помех не было скомпенсировано).

В качестве компьютера, управляющего работой АЦП, используется материнская плата TIGD-CI13 форм-фактора Mini-ITX с интегрированным процессором, имеющим пассивное охлаждение. Данные измерений сохраняются на жесткий диск в составе модуля «ИМПульс» и по внешнему запросу передаются по беспроводной сети Wi-Fi. Частота дискретизации по каждому каналу была 300 отсчетов в секунду. Это своего рода компромисс между требованием минимизации объема передаваемых данных и необходимостью очистки оцифрованного сигнала от всех помех с частотами ниже 150 Гц, в частности, помех на частоте 50 Гц. Кроме того, мы получаем хорошее разрешение для низкочастотного диапазона, который и интересует геофизиков.

Потребляемая модулем «ИМПульс» мощность составляет 20 Вт без обогрева и 35 Вт с обогревом (включением лампы накаливания). Диапазон рабочих температур указан исходя из технических характеристик платы L-Card и при условии подогрева и термостатирования в зимний период. Тепловая мощность, выделяемая процессором материнской платы, составляет 20 Вт, что обеспечивает в термоизолирующем кожухе превышение над окружающей температурой 18 °С. Дополнительный подогрев позволяет использовать мощность до 35 Вт, что гарантированно обеспечивает работоспособность модуля даже в самый сильный мороз, возможный на юге Сахалина. Контроль температуры осуществляется с помощью термодатчика бытовой метеостанции по радиоканалу.

Электропитание модуля осуществляется по подземной линии через трансформаторную развязку, напряжение на выходе – 220 В. Возможности измерительного ядра (плата L-Card L-780), на базе которого был разработан модуль «ИМПульс», значительно превышают необходимые требования, и главным достоинством явилась его универсальность. Поэтому приведенные в табл. 1 технические параметры модуля «ИМПульс» говорят лишь о том, как именно было использовано измерительное ядро, безотносительно к фактическим возможностям платы L-780.

Таблица 1

Характеристики измерительного модуля «ИМПульс» [Characteristics of the measuring module "IMPulse"]

Характеристика	Значение
Количество каналов	3
Частота дискретизации	300 Гц
Разрядность	14 бит
Диапазон входных напряжений	±1,25 В
Диапазон рабочих температур с подогревом	-40... +35 °С
Диапазон рабочих температур без подогрева	-13... +35 °С
Габаритные размеры (ДхШхВ)	40x40x60 см
Масса	5 кг

Разброс уровней измеряемого сигнала находится в пределах 0-600 мВ. Кроме того, сигнал может менять полярность. При близком ударе молнии (менее 600 м) был зафиксирован быстрый переходный процесс, похожий на отклик линейного осциллятора с затуханием на ступенчатое возмущение. На рис. 3 показаны зависимости от времени разности потенциалов на всех трех диполях при этом процессе.

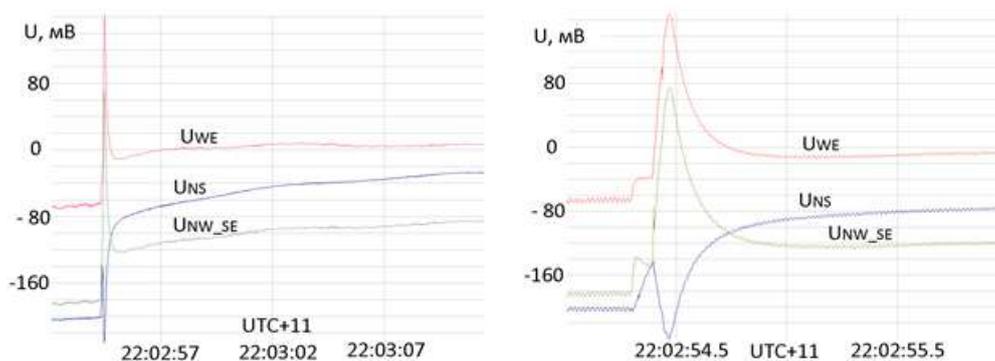


Рис. 3. Быстрый процесс, зафиксированный во время грозы 19 сентября 2023 г.
[Figure 3. A rapid process recorded during a thunderstorm on September 19, 2023]

В модуле «ИМПульс» для ограничения ширины спектра входного сигнала применен RC-фильтр третьего порядка, амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) которого приведена на рис. 4а.

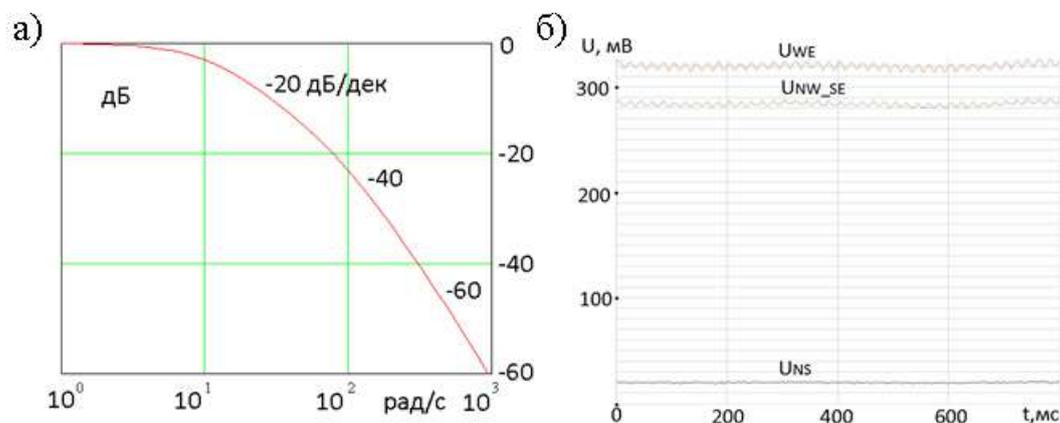


Рис. 4. АЧХ аналогового фильтра и примеры записей разницы потенциалов на электродах по трем каналам
[Figure 4. Frequency response of the analog filter and examples of recording potential differences on the electrodes on three channels]

Из данного графика видно, что на частоте 150 Гц (это 942.5 рад/с, $\lg(942/5) = 2.97$ декады) подавление сигнала составляет 60 дБ. Это означает, что гипотетическая помеха на данной частоте будет иметь амплитуду не более

0.1 % исходной. Это означает, что для гипотетической возможности искажения сигнала в НЧ-области в результате алиасинга, ВЧ-помеха должна иметь на частоте порядка 150 Гц амплитуду не менее 100 вольт на 100 милливольт искажения в НЧ-области в результате наложения спектров. Регистрируемый уровень сигнала никогда не превышал 600 мВ, что на два порядка меньше гипотетической помехи. Поэтому можно предположить, что дискретизация сигнала с частотой 300 Гц при использовании НЧ-фильтра с АЧХ, приведенной на рис. 4а, достаточна (и избыточна) для динамического измерения сигнала с верхней границей спектра, равной 1 Гц. Пример записи отфильтрованных сигналов, сделанной в период тестирования аппаратуры, показан на рис. 4б.

Также оценивалось динамическое воздействие: удары кувалдой на расстоянии около 150 м от общей точки давали отклик в силу хорошо известного сейсмoeлектрического эффекта [57, 58]. В другом эксперименте было отмечено изменение амплитуды сигнала при добавке в грунт у электродов малых объемов раствора электролита (хлорида натрия).

По сравнению с типовой аппаратурой, к примеру, измерительным модулем «ЭРА», модуль «ИМПульс» имеет расширенный климатический диапазон, беспроводную передачу данных, а также возможность первичной обработки сигнала. Модуль также имеет возможность расширения спектра и количества принимаемых сигналов.

При запуске непрерывных измерений ЭТП с 20.07.2023 первоначально ставилась задача настроить систему и произвести накопление данных в течение года или более для последующего анализа. Иногда исследователи отмечают, что для подобных измерений вообще необходимы многолетние наблюдения в части решения проблемы прогноза землетрясений. В основном это связано с относительно медленным накоплением данных по сейсмическим событиям. Но с этим связан, в первую очередь, и другой вопрос – а на каких расстояниях и какой силы сейсмические события (а точнее подготовка к их реализации) могут отражаться в рядах электромагнитных наблюдений? Точный ответ на этот вопрос невозможен (несмотря на выводы [26] о чувствительности в зоне 20 км, ведь Греция – весьма удаленный от нас регион). Естественно считать, что если признаки близкого землетрясения не “прослеживаются” в данных на пункте измерений ЭТП, то и удаленные события, скорее всего, результат не дадут. Именно поэтому, когда в 8 километрах от нашего пункта измерений в городе Южно-Сахалинск произошло землетрясение весьма приличной (для сейсмичности Центрально-Сахалинского разлома) магнитуды ($M = 3,8$), стало очевидно, что это реальный шанс для пионерского исследования. Сейсмическое событие произошло в 5 часов 14 минут 9 августа 2023 г. ($M_L = 3,8$) сахалинского времени (UTC+11). Гипоцентр ЗЛТ находился в пригороде г. Южно-Сахалинска ($47,02^\circ$ с.ш., $142,56^\circ$ в.д.) на глубине 6 км. В ближайшем населенном пункте (пос. Синегорск) сотрясения ощущались на уровне интенсивности 4 баллов, т.е. это довольно сильное землетрясение около пункта измерений.

Результаты исследования

В начале исследования рассматривались часовые записи ЭТП, но потом остановились на сутках как оптимальных для производительности компьютеров, на которых выполнялись расчёты по фильтрации в пакете Origin Pro 2021. В высокочастотной части спектра в городских условиях уровень шума может содержать помехи от различного рода источников, поэтому анализ был сфокусирован на низкочастотной области спектра (до 1 Гц).

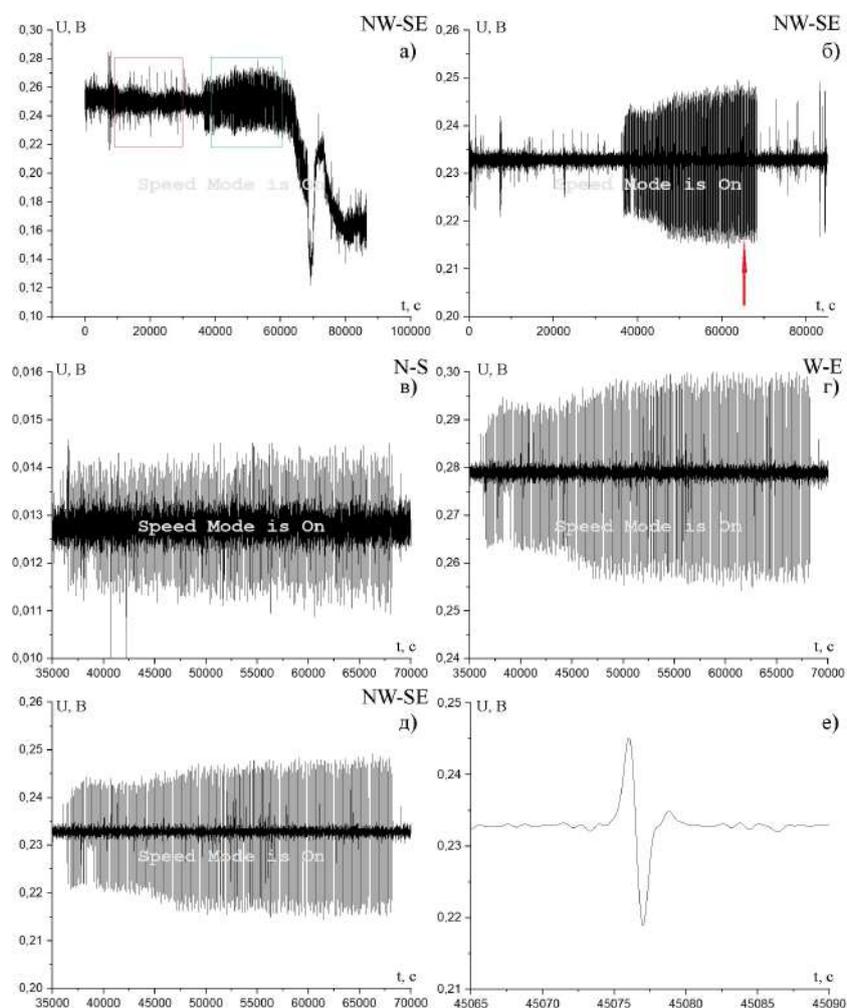


Рис. 5. а) Запись сигнала на канале NW-SE с 11 часов 8 августа по 11 часов 9 августа 2023 года, б) запись сигнала (а) после полосового фильтра 0,01-1 Гц, в) - д) Записи с каналов N-S, W-E, NW-SE с 20 часов 45 минут 8 августа до 6 часов 25 минут 9 августа, е) одиночный сигнал из серий в) - д).

[Figure 5. a) Recording a signal on the NW-SE channel from 11 a.m. on August 8 to 11 a.m. on August 9, 2023, b) recording a signal (a) after a bandpass filter of 0.01-1 Hz, c) - e) Recordings from channels N-S, W-E, NW-SE from 20 hours 45 minutes on August 8 to 6 hours 25 minutes on August 9, f) a single signal from series c) - e).]

На рис. 5а показана запись сигнала на канале NW-SE с 11 часов 8 августа до 11 часов 9 августа (запись без применения фильтров). В этот период произошло рассматриваемое нами землетрясение. На записи видно, что есть усиление сигнала в ночной период времени, но также видно, что фильтрация необходима ещё на сверхнизких частотах для удаления трендов. После применения полосового фильтра 0,01-1 Гц (рис. 5б) стало видно, что перед землетрясением в ночное время суток наблюдается серия импульсов. Также было определено, что эта серия идёт по всем каналам, но с разной амплитудой (рис. 5в-д). При внимательном рассмотрении выяснилось, что это серии дипольных сигналов длительностью 4-5 секунд с периодом следования 132-133 секунды (рис. 5е). Серия наблюдалась приблизительно с 21 часа 8 августа до 5 часов 55 минут 9 августа. Интересно наличие зависимости амплитуды сигналов от ориентации диполей. Наибольшая амплитуда у сигналов на диполе W-E, который почти параллелен азимуту на землетрясение 9 августа. Наименьшая же амплитуда на диполе N-S, который тому же азимуту почти перпендикулярен (рис. 2, рис. 5).

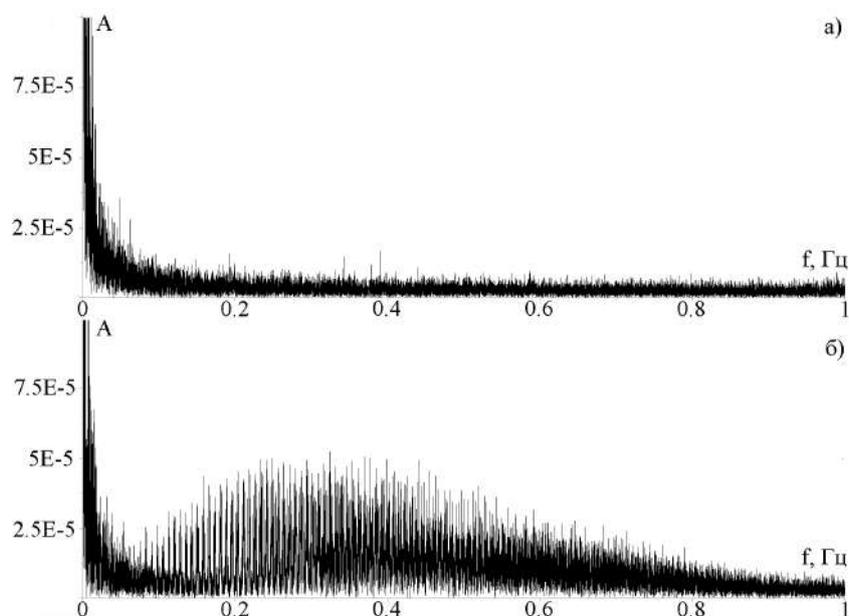


Рис. 6. Спектр записи (без программной фильтрации) NW-SE для периода, когда серии импульсов отсутствуют (а) и для периода, в котором они присутствуют (б)

[Figure 6. Recording spectrum (without software filtering) NW-SE for the period when there are no pulse trains (a) and for the period in which they are present (b)]

Общий вид и регулярность следования сигнала на записи проявляли признаки техногенной наводки, поэтому для проверки был построен также спектр записи (рис. 6). Для такой проверки были рассмотрены амплитудно-частотные спектры в периоды, когда импульсов нет и наоборот. На рис. 5а показаны участки, для которых строились спектры. Спектральный состав в рабочем диапазоне выше 1 Гц оказался идентичным для обоих случаев и в нём выделяются максимумы на

частоте 50 Гц и её гармоники. На рис. 6 показаны спектры для диапазона частот от 0 до 1 Гц.

При рассмотрении спектрального состава записи в низкочастотной области заметных максимумов на периодах 130-135 секунд обнаружено не было, что означает отсутствие четкого периода следования обнаруженного сигнала. Более того, в период регистрации серии импульсов (рис. 6б) наблюдается серия максимумов на частотах от 0,1 до 0,5 Гц и это, вероятно, означает, что при обработке сигналы воспринимаются одиночными и размываются в спектре (рис. 6б).

Дальнейшая обработка записей ЭТП в течение всего периода регистрации проводилась, чтобы исключить случайное совпадение серии сигналов неизвестной формы со временем землетрясения. Для этого важно было получить данные в периоды, когда землетрясений рядом с пунктом регистрации нет или когда там произошли другие землетрясения. В данной работе анализировались суточные записи с 20 июля 2023 года по 10 февраля 2024 года (также были обработаны несколько суток июня, когда аппаратура не работала в постоянном режиме). Для определенности мы взяли территорию вокруг полигона с радиусом 0,25 градуса (примерно 20-30 км по широте и долготе, координаты полигона 46,95° с.ш., 142,72° в.д.). Такой выбор мы сделали по аналогии с работами греческих коллег, чья методика измерений нам наиболее близка, и которые наблюдали SES (серии электромагнитных сигналов Земли) в 20-километровой области [26]. Землетрясения с $M > 3$ представлены в табл. 2, и фактически их всего два. Сейсмические данные были получены из еженедельных каталогов землетрясений Сахалина и Курильских островов СФ ФИЦ ЕГС РАН.

Таблица 2

Землетрясения с $M > 3$ в радиусе 0,25° от пункта измерений в период исследования [Earthquakes with $M > 3$ within a radius of 0.25° from the measurement point during the study period]

№	Дата	Время	Координаты	Глубина, км	Магнитуда ML
1	09.08.2023	05:14:34	47,02° с.ш., 142,56° в.д.	6	3,8
2	19.09.2023	02:49:33	47,12° с.ш., 142,61° в.д.	9	3,1

В пределах Южно-Сахалинска землетрясения умеренной магнитуды редкость, а такое же, как 9 августа, вероятно, вообще произойдёт через несколько лет. Но удачно совпало, что в 2 часа 49 минут 19 сентября произошло землетрясение почти на таком же удалении, что и первое, хоть и значительно слабее с $M = 3,1$. Итого для анализа есть всего два землетрясения и оба рядом с Южно-Сахалинском (много ближе установленной нами границы в 0,25 градусов). При этом землетрясение 9 августа 2023 г. значительно сильнее второго, которое произошло 19 сентября 2023 г. В целом, этих данных достаточно, чтобы посмотреть пустые периоды (без землетрясений) и оценить обстановку вокруг гипоцентра второго, но более слабого.

Результаты исследований показали, что серии сигналов наблюдались каждую ночь вплоть до 11 сентября, при этом днём серий гарантированно не было. Начало

следования серии и конец серии совпадают с “гражданскими сумерками”, то есть зависят от захода и восхода солнца. К сожалению, непрерывных данных до 20 июля нет, а потому точно сказать, когда такие серии появились впервые, мы не можем. В то же время несколько суток из июня месяца мы всё же включили, там серии также присутствуют, но есть детали, о которых позже расскажем.

Получается, что такие серии наблюдались почти 2 месяца, но что это за сигналы, откуда они появились и почему наблюдаются в ночное время? Это могут быть сигналы техногенной природы. Например возможна ситуация высокочастотной помехи, которая наводится на длинную измерительную линию (например от мощной радиостанции). Известно, что в ночное время прохождение радиосигналов улучшается, по сравнению с дневным временем, а интенсивность таких сигналов в точке приема возрастает. Однако такого рода наводки не могут терять или набирать интенсивность от суток к суткам, они устойчивы. Даже если аппаратура их пропускает (наложение спектров), то их амплитуда будет стабильной во времени. Но допустим, алиасинг все же имеет место. Очевидно, что с удалением от частоты 150 Гц в сторону НЧ амплитуда алиасинга должна, по крайней мере, не возрастать (на самом деле она ещё и убывает). Допустим, у нас реализовался наихудший сценарий, т.е. амплитуда не возрастает. Полезный сигнал, частота которого лежит в области менее 1 Гц, имеет амплитуду около 30 мВ. Это означает, что на двух пассивных электродах, расположенных в 100 м друг от друга в пригородной лесопарковой зоне, существует потенциал, равный 30 В на частоте 150 Гц. Если предположить гипотетический электротранспорт, то ближайшая станция метро находится в 4000 км от места измерений (г. Новосибирск), а ближайшая линия трамвая – на удалении 700 км (г. Хабаровск). Промышленных производств поблизости нет, а завод СПГ находится в 60 км, причем использует собственную генерацию, пять газотурбинных генераторов суммарной мощностью 135 МВт. Остальная сеть Сахалинской области это исключительно бытовые потребители, о чем говорит общий коэффициент мощности сети, превышающий 0,9, что абсолютно нехарактерно для промышленных потребителей. Институт находится более чем в 5 км от официальной городской черты Южно-Сахалинска, в планировочном районе Ново-Александровск, в той его части, где располагается преимущественно частный сектор. Принимая во внимание вышеизложенное, частота дискретизации 300 Гц является многократно избыточной (в 300 раз превышает верхнюю границу исследуемой области частот). Также нет никаких зацепок по поводу работы регистрирующей системы (например, неисправный блок питания компьютера или что-то иное) ибо система работает в неизменной конфигурации уже 9 месяцев, однако сигналы наблюдались только 2 из них, причём в ночное время и не имели постоянных параметров. Хотелось бы попробовать увязать появление таких сигналов с метеоусловиями, однако они слишком долго шли, а в очевидный день, когда шли грозовые разряды (19 сентября 2023 года) не наблюдались вовсе.

Теперь о взаимосвязи с землетрясением, которое попало в период, когда серии сигналов были зарегистрированы.

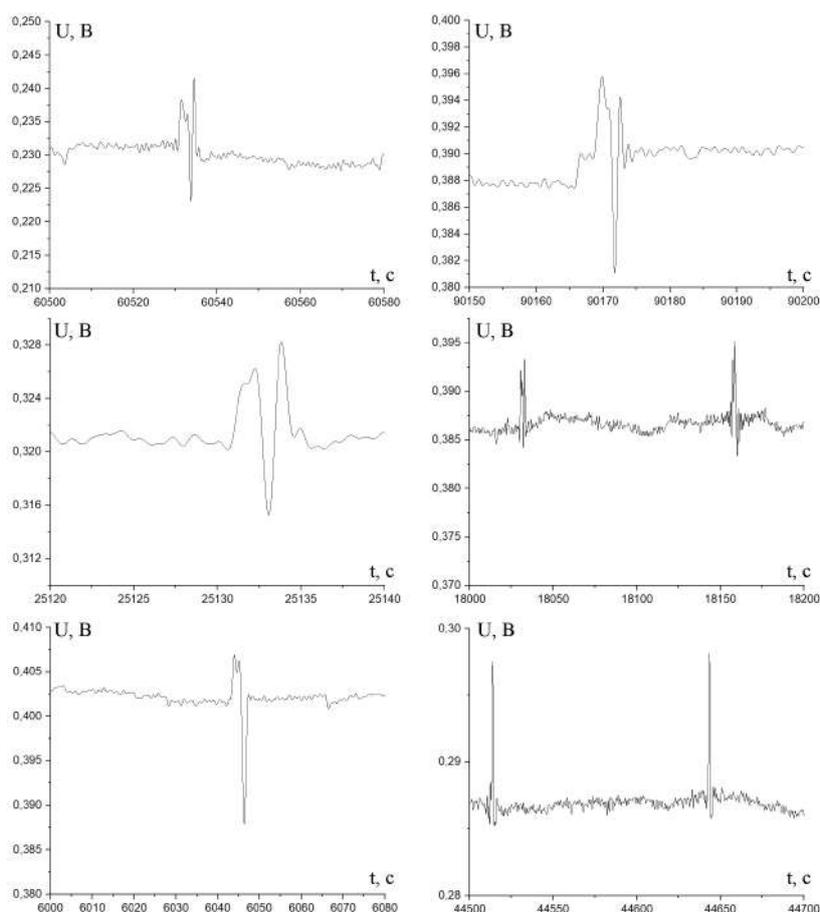


Рис. 7. Формы сигналов, составляющих серии
[Figure 7. Waveforms that make up the series]

Период следования сигналов варьируется от 130 до 150 секунд, а форма сигналов от серии к серии (да и внутри самой серии) может отличаться. Так, в сериях отмечены разные “паразитные” формы сигнала (рис. 7), обнаруженного в ночь перед землетрясением (рис. 5). Амплитуда и длительность сигнала также варьируется: к примеру, амплитуда на канале NW-SE от 10 до 30 мВ. На первой проанализированной записи (рис. 5) мы увидели характерный высокоамплитудный сигнал, идущий почти непрерывной серией, и это как-то не билось с тем, что пришлось наблюдать в других суточных записях. Анализ серий показал, что в качестве и поведении сигнала перед землетрясением есть определенная система. Обычная серия, а это с 20 июля по 3 августа и с 12 августа по 11 сентября, наполнена сигналами, которые имеют широкий разброс периодов следования (от 130 до 150 секунд), и ту форму, которая показана на рис. 5 практически не повторяют (примеры на рис. 7). Амплитуда сигналов в это время небольшая, и, например, на канале N-S эти серии немного превышают шум, а на двух других каналах хорошо различимы. Однако в период с 4 по 10 августа наблюдается существенная трансформация, как в самих сигналах, так и в сериях из них.

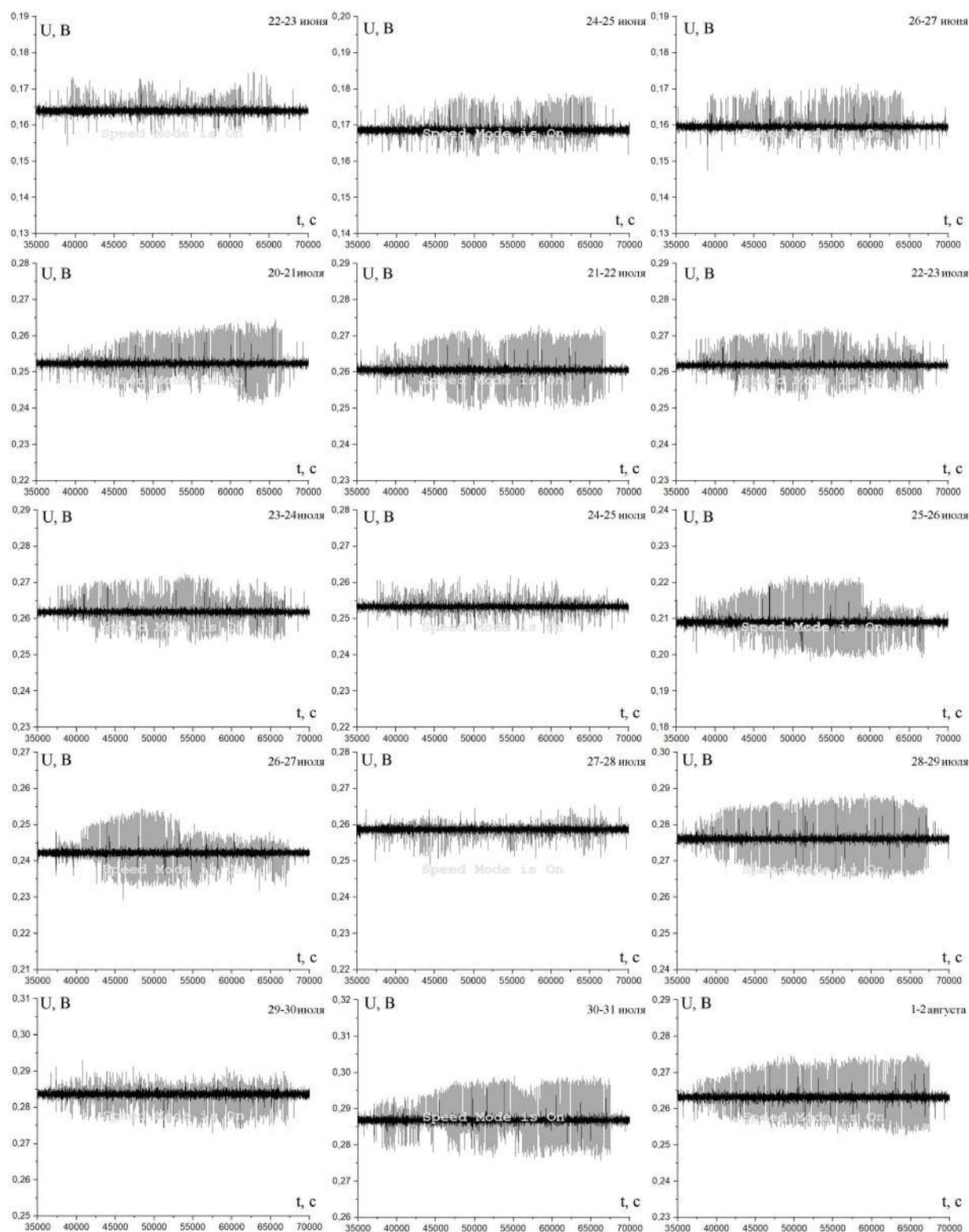


Рис. 8. Записи 22-23, 24-25, 26-27 июня и с 20 июля по 2 августа 2023 г. на канале NW-SE, период с 20 часов 45 минут до 6 часов 25 минут
 [Figure 8. Recordings 22-23, 24-25, 26-27 of June and from July 20 to August 2, 2023 on the NW-SE channel, period from 20 hours 45 minutes to 6 hours 25 minutes]

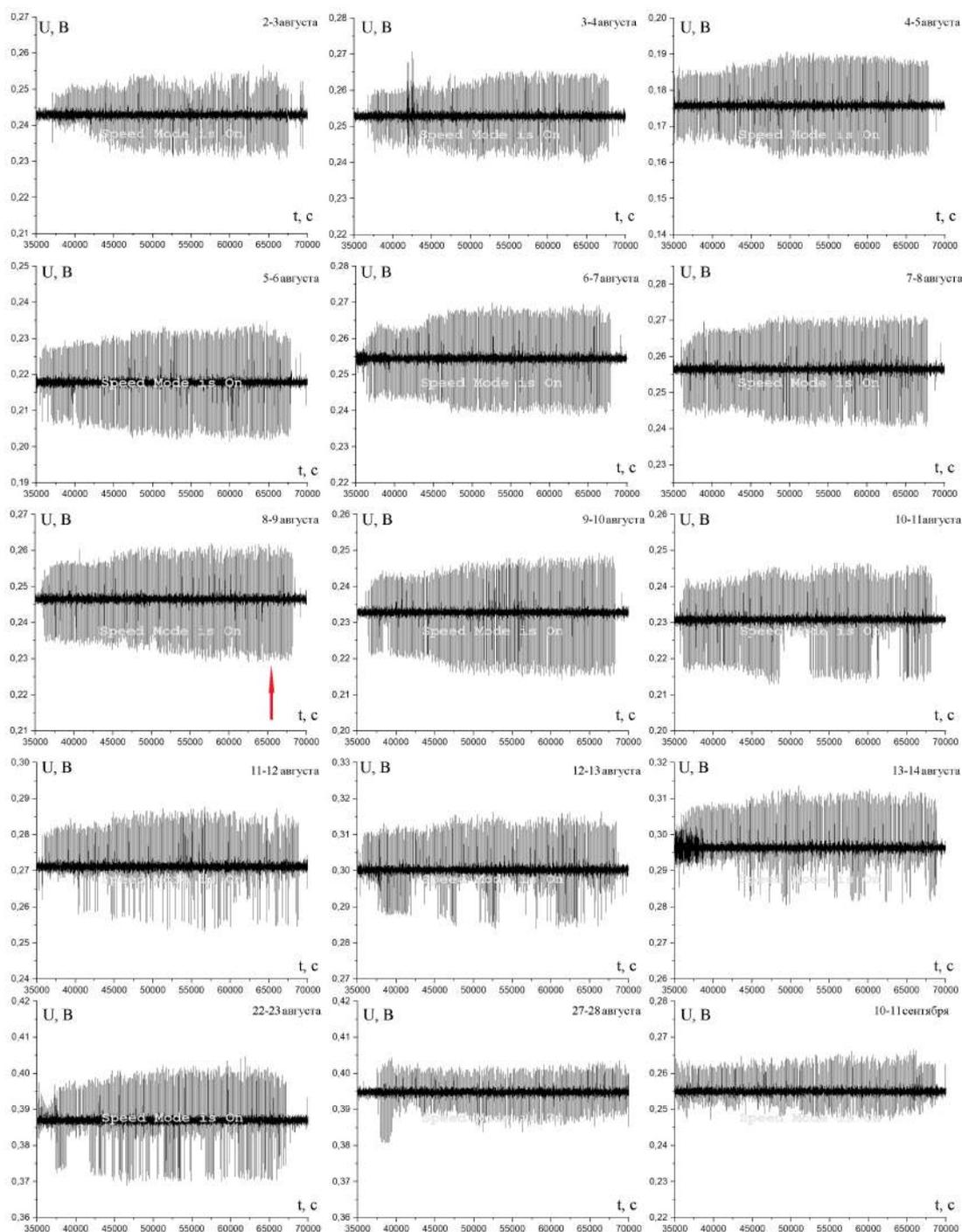


Рис. 9. Записи со 2 по 14 августа, а также 22-23, 27-28 августа и 10-11 сентября 2023 г. на канале NW-SE, период с 20 часов 45 минут до 6 часов 25 минут. Красной стрелкой показано землетрясение 9 августа 2023 г.

[Figure 9. Recordings from August 2 to 14, as well as August 22-23, 27-28 and September 10-11, 2023 on the NW-SE channel, period from 20 hours 45 minutes to 6 hours 25 minutes. The red arrow shows the earthquake on August 9, 2023.]

Для наглядности на рис. 8 и рис. 9 (продолжение рис. 8) мы покажем записи с канала NW-SE в “ночное” время с 20 часов 45 минут до 6 часов 25 минут посуточно. На рис. 8 первые три записи из июня месяца, когда проводилась настройка аппаратуры, и данных для анализа практически нет. Однако на них видно, что в 20х числа июня сигнал очень слабый и нестабильный. Все графики сделаны в одном масштабе времени и напряжений для того чтобы было легче сравнивать (вся ось Y – 0,06 В).

Амплитуда сигнала от суток к суткам постепенно увеличивается, пропуски пропадают, форма становится такой же, как и на рис. 5 по всей серии, особенно это хорошо видно уже к 5 августа. Сигнал идёт к этому времени с периодом 132-133 секунды (разброс много меньше, чем в другие дни), формы не меняет, и это происходит на всех каналах. А вот с 10 августа серии начинают сбиваться. Появляются однополярные и несимметричные варианты сигнала, растёт период между сигналами, амплитуда падает до обычных значений, то есть, в два-три раза. Уже в конце августа и в первой половине сентября серии полностью состоят из слабых искаженных сигналов. Вечером 11 сентября была замечена последняя короткая серия (рис. 10), а с 12 сентября серии сигналов уже отсутствовали на всех каналах (вплоть до последних обработанных суток 10 февраля 2024 года).

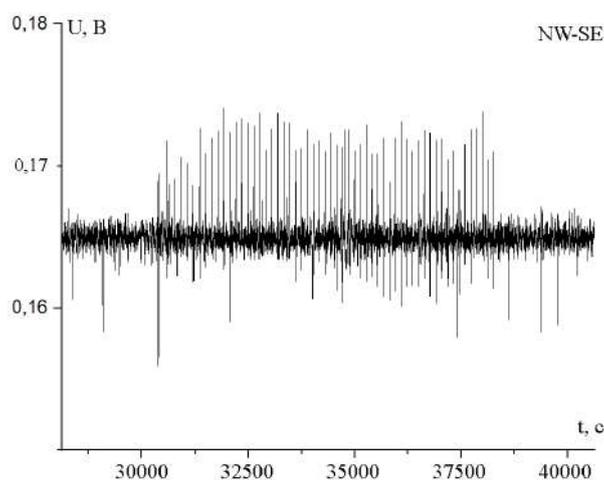


Рис. 10. Последняя (неполная) серия квазипериодических сигналов, запись с канала NW-SE. Серия продолжалась с 19:53 до 22:05 11 сентября 2023 года

[Figure 10. The last (incomplete) series of quasi-periodic signals, recording from the NW-SE channel. The episode lasted from 19:53 to 22:05 on September 11, 2023]

Мы видим характерные изменения серий сигналов ЭТП, которые происходят в течение 5-6 дней на периоде наблюдений больше 200 дней. Примечательно, что отмеченные выше изменения произошли на пункте, который находился в ближней зоне очага землетрясения, что, несомненно, вызывает интерес. В будущем хотелось бы увидеть в ближней зоне ещё одно землетрясение сопоставимой магнитуды, но предвидим, что это может произойти через несколько лет.

Если же предположить что начало серий приходится на первую половину июня, когда они очень слабые, то выходит, что “раскачка” сигналов заняла около двух месяцев, а затухание один месяц. Также отмечаем отсутствие корреляций в период, когда произошло второе землетрясение 19 сентября, во время которого серий не обнаружено вовсе (рис. 11).

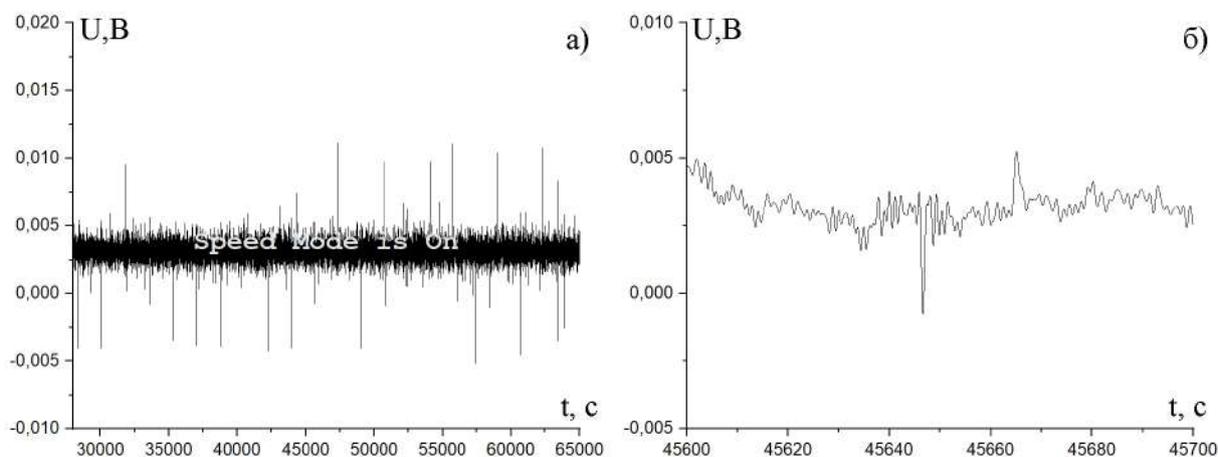


Рис. 11. а) Запись с канала NW-SE в ночь на 18-19 сентября 2023 г., б) увеличенный фрагмент записи а)

[Figure 11. a) Recording from the NW-SE channel on the night of September 18-19, 2023, b) enlarged fragment of recording a)]

Обсуждение

При обсуждении соответствия полученных результатов с другими работами приходится оговорить, что непосредственное сопоставление затруднено из-за объективных факторов. Во-первых, много работ по измерению магнитного поля, а вот по измерению электрических потенциалов совсем немного. Во-вторых, большинство работ не раскрывают техники измерений [9, 11, 26], а в тех, где это делают, возникает очевидный барьер – они не могут быть объектом для сопоставления чисто технически. В ранних исследованиях при отсутствии современных систем регистрации и накопления данных, при желании проводить наблюдения удаленно от населённых пунктов, возможности были сильно ограничены. Ожидая полезный сигнал перед сейсмическими событиями в низкочастотной области, исследователи устанавливали удобную и, как им казалось, достаточную частоту наблюдений (дискретность измерений), которая не превышала 10 Гц [8, 27, 28, 37, 46], а, в основном, была ниже 1 Гц. Не нужно быть большим специалистом, чтобы понять, что прописать сигналы длительностью 4-5 секунд с такой дискретностью невозможно (мы же это проверили процедурой децимации, сигналы пропадали). Учитывая, что они наблюдались ночью, которая и так по среднему уровню шума намного спокойней

чем день, можно предположить, что интегрально если они и видели обнаруженный нами эффект, то в совершенно другой форме. Наиболее близкие по методике инструментальных наблюдений (не регистрации или обработке) работы были проведены греческими учеными в далеком 1984 году [26]. В 2013 году они выпустили, вероятно, финальный обзор работ [59], особенно с учётом того, что желаемая эффективность метода так и не была достигнута [60]. В данной работе весьма детально рассказывается практически обо всём, за исключением техники регистрации, которая и определяет возможность сопоставления с нашими результатами. Однако некоторые сравнения всё же можно провести.

Во-первых, они пишут, что для реализации метода VAN необходимо минимум два перпендикулярных диполя, N-S и W-E (мы, в общем-то, так и сделали, но есть ещё один дополнительно). В наших же результатах серии сигналов-предвестников хорошо регистрируются на всех трёх диполях (даже на том, который не направлен по азимуту на эпицентр). Причём они говорят, что чем больше диполей, тем лучше, и дают этому обоснование – это помогает отличать сигналы из Земли от прочих сигналов. Во-вторых, в работе [59] упоминается следующее: “Поскольку сейсмический сигнал может длиться некоторое время, например, 10 минут, а затем не появляться снова до начала землетрясения, записи должны быть непрерывными, то есть 24 часа в сутки”, что уже однозначно никак не соотносится с нашим результатом. Нет в их работах и никаких свидетельств об избирательности SES ко времени суток. Ну и в-третьих, это вопрос по выбору пункта для наблюдений. Они пишут: “Регион-кандидат должен иметь очень низкий уровень “электрического” шума, что означает, что он должен находиться на значительном расстоянии от “искусственных” источников электроэнергии (например, электрических установок в домах, на фабриках и т. д.)”. Это категорически к нам не относится, ибо мы определили для полигона самый “шумный” вариант размещения и при этом выделили полезный сигнал. Впрочем, какие могли бы быть помехи, если подавляющее большинство техногенных электромагнитных наводок регистрируются в высокочастотной области, которую мы убираем фильтром. Ну и наконец, самое главное, в работах П. Варотсоса (да и не только у него) мы не видели сигналов, не видели информации по технике регистрации, включая важную для нас частоту дискретизации, и методы обработки временных рядов. Зато есть работы, где сигналы можно посмотреть [6], но там нет уже проблемы прогноза в целом. Догадаться о деталях измерений зачастую можно лишь по косвенным признакам, таким как, например, в работах П. Варотсоса и др., передаче данных с пункта наблюдений в датацентр посредством телефонной связи. Понятно, что большие объёмы в 1984 году передавать таким способом было просто невозможно. Самое интересное, что с 1984 года, когда впервые прозвучал VAN, прошло достаточно много времени и средства регистрации значительно усовершенствовались, однако в относительно свежих работах мы не увидели попыток “тяжелых” измерений с высокой частотой дискретизации. Если кто-то и пользовался большой дискретностью, то только для того, чтобы смотреть высокочастотные сигналы. Так, в обзорной работе [6],

где японские исследователи подводят итог своих работ с 1989 года, упоминается, что до 2011 года у них не было технической возможности регистрировать высокочастотные сигналы. Но как только возможность появилась, они сделали на входе сигнала с подземной антенны полосовые фильтры, в частности 0-0,7 Гц и 1000-9000 Гц. То есть дискретность устанавливалась в соответствии с потребностью фильтра, в первом случае не более 2 Гц, а во втором кратного порядка 9000 Гц. Получается, что для низкочастотных измерений дискретность маленькая (с нашей позиции по волновой форме ночных сигналов), а там, где дискретность большая, низкие частоты уже вырезаны. Несмотря на разные методики (у них подземная антенна, а у нас диполь) справедливости ради кое-где мы с ними всё-таки “пересеклись”.

Мы зарегистрировали сигнал, похожий на японский GUV [6], который у них начинался по длительности от 20 секунд. С той разницей, что наши “гувоподобные” сигналы были короче, появлялись преимущественно в дневное время, шли небольшими сериями (максимум в несколько часов), имели смену полярности, а кроме того, регистрировались без какой-либо привязки к нашим сериям и землетрясениям (пример на рис. 12).

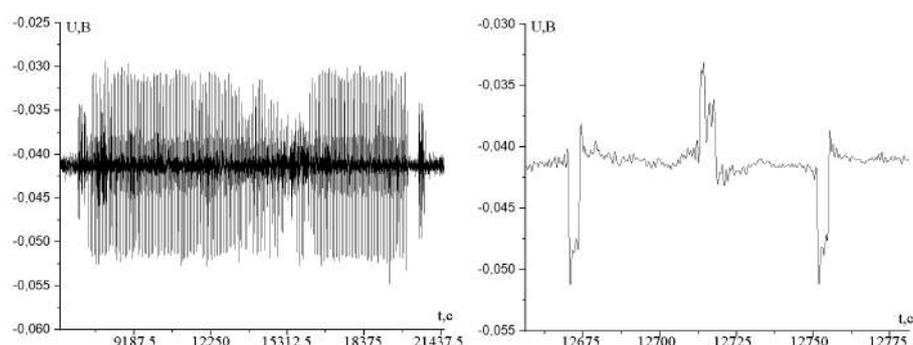


Рис. 12. а) Серия GUV на канале NW-SE с 12:29 по 16:00 2 октября 2023 г., б) увеличенный фрагмент записи а)

[Figure 12. a) GUV series on NW-SE channel from 12:29 to 16:00 October 2, 2023, b) enlarged fragment of recording a)]

Кажется очевидным, что регистрация широкополосного сигнала с хорошей полосой пропускания и последующей программной фильтрацией выглядит более предпочтительно чем то, что делает подавляющее большинство исследователей. Почему же так происходит? Вероятно, потому что это шло в разрез с устоявшейся привычкой экономии ИТ ресурсов при геофизическом мониторинге, что не соответствует современному состоянию дел в этой области. Действительно, в настоящее время стало критически мало исследователей, а не ИТ ресурсов. К тому же накопилась психологическая усталость от загложших исследований VAN и прочих дискуссионных подходов к наблюдениям и интерпретации ЭТП, а отсюда сомнения в перспективах этого направления.

В целом, нужно отметить, что наши работы несколько не противоречат духу исследования «VAN», а скорее развивают его в новых подходах к регистрации и

обработке данных. Мы понимаем, что сравнение результатов работы нескольких месяцев, да ещё и на одном лишь пункте измерений, не выдерживает никакой критики, однако есть одно обстоятельство. Позволим себе напомнить, что пилотные работы в любой области науки всегда обладают иммунитетом к избыточной требовательности специалистов и достойны своей ниши до той поры, когда их результаты будут полностью подтверждены или опровергнуты.

Обсуждая перспективы для дальнейшего исследования ЭТП, полагаем, что основной упор будет делаться на пополнение базы данных, а для этого нужны новые землетрясения. Для оценок сроков накопления данных можно рассмотреть частоту появления сейсмических событий в нашей зоне на большем периоде времени. Ниже приведена таблица землетрясений с 1997 по 10 февраля 2024 года (табл. 3).

Таблица 3

Землетрясения в радиусе $0,25^\circ$ от пункта измерений (с $M > 3,8$) за 1997-2024 гг. по данным СФ ФИЦ ЕГС РАН [Earthquakes within a radius of 0.25° from the measurement point (with $M > 3.8$) for 1997-2024 according to the data of the SF Federal Research Center EGS RAS]

№	Дата	Время	Координаты	Глубина, км	Магнитуда ML
1	08.08.2023	18:14:37	47,01° с.ш., 142,62° в.д.	10	3,8
2	07.04.2017	12:11:11	47,03° с.ш., 142,6° в.д.	13	4,2
3	08.06.2017	19:08:06	46,97° с.ш., 142,28° в.д.	10	4,5
4	25.07.2015	14:45:15	47,02° с.ш., 142,89° в.д.	2	3,8
5	25.05.2013	06:19:21	47° с.ш., 142,5° в.д.	10	4
6	05.09.2013	09:53:51	46,97° с.ш., 142,5° в.д.	10	3,8
7	24.10.2012	00:53:46	47,11° с.ш., 142,65° в.д.	10	4,2
8	03.02.2011	01:08:02	46,85° с.ш., 142,54° в.д.	10	4,7
9	22.08.2011	01:36:26	47,18° с.ш., 142,73° в.д.	10	3,7
10	05.09.2011	06:25:23	46,82° с.ш., 142,9° в.д.	5	4,3
11	17.10.2011	06:56:41	46,85° с.ш., 142,8° в.д.	10	4,6
12	19.12.2011	07:37:48	46,86° с.ш., 142,93° в.д.	10	4,2
13	04.10.2008	09:20:05	47,16° с.ш., 142,65° в.д.	10	4,1
14	20.03.2007	13:25:01	46,9° с.ш., 142,54° в.д.	10	3,9
15	27.12.2006	13:38:40	47,1° с.ш., 142,6° в.д.	10	3,8

Судя по табл. 3, землетрясения с такой магнитудой ($M > 3,8$) – не частые события в нашей зоне ответственности. Основное количество ЗЛТ (8 из 15) приходится на период с 2011 по 2013 год и, в целом, имеет отношение к процессам за пределами Сахалина. Все они, по большому счёту, вызваны глобальным перераспределением нагрузки на общих для нас с Японией региональных разломах после землетрясения Тохоку в марте 2011 года. Сейчас в данном районе с 2017 по 2023 год наблюдается дефицит землетрясений среднего класса, подобный тому, что наблюдался здесь с 1997 по 2006 гг. То землетрясение, которое мы увидели, произошедшее в августе 2023 года ($M = 3,8$), - фактически первое спустя 6 лет

после 2017 года. В настоящее время рассматривается возможность развертывания пунктов регистрации в других сейсмически активных районах о. Сахалин.

Заключение

Первые результаты регистрации электротеллурических потенциалов в ближней зоне очага землетрясения в южной части о. Сахалин выявили следующее:

- Серии квазипериодических сигналов электротеллурического поля присутствуют каждую ночь на протяжении от 20 июля до 11 сентября 2023 г., длительность серий колеблется в районе 8-9 часов.
- Сигналы ЭТП идут с периодом следования от 130 до 150 секунд, имеют разную форму, которая является производной от некоего оригинального синусоподобного сигнала.
- Амплитуда сигналов в большинстве суток небольшая, на канале N-S немного выше шума (порой на уровне шума, около 1 мВ), а на каналах NW-SE и W-E хорошо различимы на уровне около 10 мВ.
- В период с 5 по 10 августа в волновых формах сигналов, составляющих серии, отмечен рост амплитуды (которая к этому времени в три раза превышает обычный уровень), уменьшается разброс в периоде следования сигнала до 132-133 секунд (рис. 5), состав серий становится однородным, искаженных сигналов практически нет, следует синусоидальный сигнал правильной формы.
- С 11 августа и в течение нескольких недель серии состоят из сигналов разнообразных волновых форм (рис. 7) небольшой амплитуды, а после 11 сентября серии исчезают (их нет по 10 февраля 2024 года, к моменту подачи статьи).
- Появление серий квазипериодических сигналов может быть связано с подготовкой землетрясения 9 августа 2023 года, однако для доказательства нужно больше эпизодов, поскольку перед землетрясением 19 сентября 2023 г. ($M = 3,1$) серий сигналов не обнаружено.

Список литературы

1. Milne J. Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena, *Trans. Seismol. Soc. Japan*, 1890. vol. 15, pp. 135-163.
2. Довбня Б. В. О результатах дистанционного наблюдения импульсных ультранизкочастотных электромагнитных сигналов, обнаруживаемых за минуты до землетрясения, *Жизнь Земли*, 2021. Т. 43, № 3, С. 304-313 DOI: 10.29003/m2435.0514-7468.2020_43_3/304-313.
3. Wang C., Christman L., Klemperer S., Glen J., McPhee D., Chen B. Assessment of a claimed ultra-low frequency electromagnetic (ULFEM) earthquake precursor, *Geophys. J. Int.*, 2022. vol. 229, no. 3, pp. 2081-2095 DOI: 10.1093/gji/ggab530.
4. Садовский М. А. *Электромагнитные предвестники землетрясений*. М.: Наука, 1982. 88 с.

5. Зубков С.И. *Предвестники землетрясений*. М.: ИФЗ РАН, 2002. 140 с.
6. Fujinawa Y., Noda Y. Progress of Applied Seismo-Electromagnetism, *Open J. Earthq. Res.*, 2020. vol. 9, no. 1, pp. 1-18 DOI: 10.4236/ojer.2020.91001.
7. Кособоков В.Г. *Прогноз землетрясений: основы, реализация, перспективы*. М.: ГЕОС, 2005. 179 с.
8. Паровышний В. А., Сохатюк Ю. В., Паровышний Д. В., Веселов О. В., Кочергин Е. В. О подходах к решению некоторых проблем оперативного прогноза сейсмических событий, *Геосистемы переходных зон*, 2019. Т. 3, № 1, С. 5-18 DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.005-018.
9. Паровышний В. А., Богомолов Л. М., Сохатюк Ю. В., Паровышний Д. В. Проблемы оперативного прогноза сейсмических событий. Предлагаемые пути решения, *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2021. Т. 35, № 2, С. 120-132 DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-120-132.
10. Гриб Н.Н., Гриб Г.В., Колодезников И.И. О краткосрочном прогнозе землетрясений по геофизическим предвестникам в Южной Якутии, *Международный научно-исследовательский журнал*, 2021. № 9-1 (111), С. 121-127 DOI: 10.23670/IRJ.2021.9.111.020.
11. Гриб Н.Н., Трофименко С.В. Регистрация электромагнитного излучения (ЭМИ) в период землетрясений, *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2006. № S10, С. 197-207.
12. Довбня В.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А. Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений, *Геодинамика и тектонофизика*, 2019. Т. 10, № 3, С. 731-740 DOI: 10.5800/GT-2019-10-3-0438.
13. Han P., Hattori K., Zhuang J., Chen C.-H., Liu J.-Y., Yoshida S. Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan's error diagram, *Geophys. J. Int.*, 2017. vol. 208, no. 1, pp. 482-490 DOI: 10.1093/gji/ggw404.
14. Bleier T., Dunson C., Maniscalco M., Bryant N., Bamberg R., Freund F. Investigation of ULF magnetic pulsations, air conductivity changes, and infra red signatures associated with the 30 October Alum Rock M5.4 earthquake, *Nat. Hazards Earth Syst.*, 2009. vol. 9, no. 2, pp. 585-603 DOI: 10.5194/nhess-9-585-2009.
15. Bleier T., Dunson C., Alvarez C., Freund F., Dahlgren R. Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments, *Nat. Hazards Earth Syst.*, 2010. vol. 10, no. 9, pp. 1965-1975 DOI: 10.5194/nhess-10-1965-2010.
16. Жамалетдинов А. А., Митрофанов Ф. П., Токарев А. Д., Шевцов А. Н. Влияние лунно-суточных приливных деформаций на электропроводность и флюидный режим земной коры, *Докл. Акад. Наук*, 2000. Т. 37, № 2, С. 235-239.
17. Авагимов А. А., Зейгарник В. А., Файнберг Э. В. О пространственно-временной структуре сейсмичности, вызванной электромагнитным воздействием, *Физ. Земли*, 2005. № 6, С. 55-65.
18. Александров П. Н., Модин И. Н. О системном подходе к анализу данных электрометрического мониторинга, *Инженерные изыскания*, 2015. № 3, С. 42-50.
19. Мороз Ю. Ф., Гонтовая Л. И. О глубинном строении Южной Камчатки по геофизическим данным, *Геодинамика и тектонофизика*, 2018. Т. 9, № 4, С. 1147-1161 DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0387.
20. Неведрова Н. Н., Пономарев П. В. Результаты многолетнего мониторинга электрофизических параметров в сейсмоактивной зоне горного Алтая методами постоянного тока, *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2018. Т. 3, С. 281-287 DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-281-287.
21. Соболев Г. А., Морозов В. Н., Мигунов Н. И. Электротеллурическое поле и сильное землетрясение на Камчатке, *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*, 1972. № 2, С. 67-73.
22. Воробьев А. А., Самохвалов М. А., Горелкин А. Ф., Ибрагимов Р. Н., Усманова М. Т., Ходжаев А. Н. Аномальные изменения интенсивности естественного электромагнитного поля в районе Ташкента перед землетрясениями, *Узбек. геол. журнал*, 1976. № 2, С. 9-11.
23. Мороз Ю. Ф., Бахтиаров В. Ф., Воропаев В. Ф., Гаврилов В. А., Левин В. Е., Попруженко С. В. О мониторинге электротеллурического поля для прогноза сильных землетрясений на Камчатке, *Вулканология и сейсмология*, 1995. № 4-5, С. 139-149.
24. Sobolev G. Application of electric method to the tentative short-term forecast of Kamchatka earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 1975. vol. 113, no. 1, pp. 229-235 DOI: 10.1007/BF01592913.
25. Noritomi K. Geoelectric and geomagnetic observations and phenomena associated with earthquake in China / *Chinese earthquake prediction by the 1977 delegation of the Seismological Society of Japan*. Tokyo (Japan), Seismological Society of Japan, 1978, pp. 57-87.

26. Varotsos P., Alexopoulos K. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I, *Tectonophysics*, 1984. vol. 110, no. 1-2, pp. 73-98 DOI: 10.1016/0040-1951(84)90059-3.
27. Varotsos P., Alexopoulos K., Lazaridou M. Short term earthquake prediction from measurements of the electric field of the earth / *Risque, nature et société. Actes du séminaire «Delphes I» [en ligne]*. Paris (France), Éditions de la Sorbonne, 1996, pp. 139–154 DOI: 10.4000/books.porsorbonne.32076.
28. Nagao T., Orihara Y., Yamaguchi T., Takahashi I., Hattori K., Noda Y., Sayanagi K., Uyeda S. Co-seismic geoelectric potential changes observed in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 2000. vol. 27, no. 10, pp. 1535-1538 DOI: 10.1029/1999GL005440.
29. Sarlis N., Skordas E. *Natural Time Analysis: The New View of Time. Precursory Seismic Electric Signals, Earthquakes and other Complex Time-Series*. Heidelberg (Germany): Springer Berlin, 2011. 484 DOI: 10.1007/978-3-642-16449-1 pp.
30. Uyeda S., Kamogawa M. The Prediction of Two Large Earthquakes in Greece, *Eos*, 2008. vol. 89, no. 39, pp. 363 DOI: 10.1029/2008EO390002.
31. Geller R. Debate on evaluation of the VAN Method: Editor's introduction, *Geophys. Res. Lett.*, 1996. vol. 23, no. 11, pp. 1291-1293 DOI: 10.1029/96gl00742.
32. Geller R. Earthquake prediction: critical review, *Geophys. J. Int.*, 1997. vol. 131, no. 3, pp. 425-450 DOI: 10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x.
33. Papadopoulos G. Comment on "The Prediction of Two Large Earthquakes in Greece", *Eos*, 2010. vol. 91, no. 18, pp. 162 DOI: 10.1029/2010EO180003.
34. Закупин А. С., Левин Ю. Н., Богинская Н. В., Жердева О. А. Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине (Mw = 5.8, 14 августа 2016 года), *Геология и геофизика*, 2018. № 11, С. 1904-1911 DOI: 10.15372/GiG20181112.
35. Закупин А. С., Богомоллов Л. М., Богинская Н. В. Применение методов анализа сейсмических последовательностей LURR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине, *Геофизические процессы и биосфера*, 2020. Т. 19, № 1, С. 66-78 DOI: 10.21455/GPB2020.1-4.
36. Руленко О. П. Оперативные предвестники землетрясений в электричестве приземной атмосферы, *Вулканонология и сейсмология*, 2000. № 4, С. 57-68.
37. Марापалец Ю. В., Руленко О. П., Ларионов И. А., Мищенко М. А. Одновременный отклик высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля на деформирование приповерхностных осадочных пород, *Докл. Акад. Наук*, 2011. Т. 440, № 3, С. 403–406.
38. Моргунов В. А., Матвеев И. В. Электрические и электромагнитные эффекты в эпицентральной зоне афтершоков Спитакского землетрясения, *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*, 1991. № 11, С. 124.
39. Белослюдов О. М., Узбеков Н. В. О системном подходе к анализу данных электрометрического мониторинга, *Уральский геофизический вестник*, 2006. № 1 (9), С. 5-8.
40. Гульельми А. В., Левшенко В. Т. Электромагнитный импульс из очага землетрясения, *Докл. Акад. Наук*, 1996. Т. 349, № 5, С. 676-678.
41. Sobisevich L., Kanonidi K., Sobisevich A. Observations of ultra-low-frequency geomagnetic disturbances reflecting the processes of the preparation and development of tsunamigenic earthquakes, *Dokl. Earth Sci.*, 2010. vol. 435, no. 2, pp. 1627-1632.
42. Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Chebrov V., Voropaev V., Hayakawa M., Maekawa S., Biagi P.-F. Preseismic anomaly of LF signal on the wave path Japan-Kamchatka during November–December 2004, *Phys. Chem. Earth*, 2006. vol. 31, no. 4-9, pp. 422-427 DOI: 10.1016/j.pce.2006.02.033.
43. Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingenschuh K., Boudjada M., Biagi P.-F., Maggipinto T., Castellana L., Ermini A., Hayakawa M. Anomalies in VLF radio signals prior to the Abruzzo earthquake (M = 6.3) on 6 April 2009, *Nat. Hazards Earth Syst.*, 2009. vol. 9, no. 5, pp. 1727-1732 DOI: 10.5194/nhess-9-1727-2009.
44. Гохберг М. Б., Гуфельд И. Л., Гершензон Н. И., Пилипенко В. А. Электромагнитные эффекты при разрушении земной коры, *Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли*, 1985. № 1, С. 72-87.
45. Гохберг М. Б., Моргунов В. А., Похотелов О. А. *Сейсмоэлектромагнитные явления*. М.: Наука, 1988. 174 с.
46. Molchanov O. Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing, *Geophys. Res. Lett.*, 1995. vol. 22, no. 22, pp. 3091-3094 DOI: 10.1029/95GL00781.

47. Сурков В. В. *Электромагнитные эффекты при землетрясениях и взрывах: Научное издание*. М.: МИФИ, 2000. 448 с.
48. Nitsan U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks, *Geophys. Res. Lett.*, 1977. vol. 4, no. 8, pp. 333-336 DOI: 10.1029/GL004i008p00333.
49. Мирошниченко М. И., Куксенко В. С. Излучение импульсов при зарождении трещин в твердых диэлектриках, *ФТТ*, 1980. Т. 22, №5, С. 1531-1533.
50. Воробьев А. А., Защинский Л. А., Надежкин С. Г., Ширяев В. Ф. Импульсное электромагнитное поле, возникающее при деформациях грунтов в лабораторных условиях, *ФТПРПИ*, 1981. №5, С. 119-120.
51. Курленя М. В., Вострецов А. Г., Кулаков Г. И., Яковицкая Г. Е. *Регистрация и обработка сигналов электромагнитного излучения горных пород*. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. 232 с.
52. Frid V., Rabinovitch A., Bahat D. Fracture induced electromagnetic radiation, *J. Phys. D-Appl. Phys.*, 2003. vol. 36, no. 13, pp. 1620-1628 DOI: 10.1088/0022-3727/36/13/330.
53. Беспалько А. А., Кузьминых Р. А., Люкшин Б. А., Уцын Г. Е., Яворович Л. В. Экспериментальное и теоретическое исследование электромагнитной эмиссии в неоднородных диэлектрических материалах, *Изв. ВУЗов. Физика*, 2007. №2, С. 16-22.
54. Яковицкая Г. Е. *Методы и технические средства диагностики критических состояний горных пород на основе электромагнитной эмиссии*. Новосибирск: Параллель, 2008. 314 с.
55. Mori Y., Obata Y., Sikula J. Acoustic and electromagnetic emission from crack created in rock samples under deformation, *Journal of Acoustic Emission*, 2009. vol. 27, pp. 157-166 URL: https://www.researchgate.net/publication/266606255_Acoustic_and_electromagnetic...
56. Булгаков Р. Ф., Иващенко А. И., Ким Ч. У., Сергеев К. Ф., Стрельцов М. И., Кожурин А. И., Бесстрашное В. М., Стром А. Л., Сузуки Я., Цуцуми Х., Ватанабе М., Уеки Т., Шимамото Т., Окумура К., Гото Х., Кария Я. Активные разломы Северо-Восточного Сахалина, *Геотектоника*, 2002. №2, С. 66-86 URL: http://neotec.ginras.ru/comset/_bulgakov-r-f-i-dr-2002-aktivnye-razlom-y-severo-vostochnogo-sahalina.pdf.
57. Иванов А. Г. Сейсмoeлектрический эффект второго рода, *Изв. АН СССР. Сер. география и геофизика*, 1940. №5, С. 699-727.
58. Светов Б. С. К теоретическому обоснованию сейсмoeлектрического метода геофизической разведки, *Геофизика*, 2000. №1, С. 28-39.
59. Lazaridou-Varotsos M. *Earthquake Prediction by Seismic Electric Signals*. Heidelberg (Germany): Springer Berlin, 2013. 254 DOI: 10.1007/978-3-642-24406-3 pp.
60. Sarlis N. V. Statistical significance of earth's electric and magnetic field variations preceding earthquakes in Greece and Japan revisited, *Entropy*, 2018. vol. 20, no. 8, pp. 561-578 DOI: 10.3390/e20080561.

Информация об авторах



Закупин Александр Сергеевич ✉ – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия,  ORCID 0000-0003-0593-6417.



Дудченко Илья Павлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия,  ORCID 0000-0002-4967-7405.



Богомолов Леонид Михайлович✉ – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, директор, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия,
 ORCID 0000-0002-9124-9797.



Гуляков Сергей Александрович – младший научный сотрудник отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия,
 ORCID 0009-0001-7924-6972.



Казakov Артем Иванович✉ – ведущий инженер отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия,
 ORCID 0000-0002-1378-185X.



Стовбун Николай Сергеевич – младший научный сотрудник отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов ЦКП, Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, Россия,
 ORCID 0009-0004-1927-798X.

References

- [1] Milne J. Earthquakes in connection with electric and magnetic phenomena, *Trans. Seismol. Soc. Japan*, 1890, vol. 15, pp. 135-163.
- [2] Dovbnya B. V. On the results of remote monitoring of pulsed ultra-low-frequency electromagnetic signals detected minutes before an earthquake, *Zhizn' Zemli*, 2021, vol. 43, no. 3, pp. 304–313. DOI: 10.29003/m2435.0514-7468.2020_43_3/304-313 (In Russian).
- [3] Wang C., Christman L., Klemperer S., Glen J., McPhee D., Chen B. Assessment of a claimed ultra-low frequency electromagnetic (ULFEM) earthquake precursor, *Geophys. J. Int.*, 2022, vol. 229, no 3, pp. 2081-2095. DOI: 10.1093/gji/ggab530.
- [4] Sadovsky M. A. *Elektromagnitnyye predvestniki zemletryasenyi* [Electromagnetic precursors of earthquakes]. Moscow, Nauka, 1982, 88 pp. (In Russian).
- [5] Zubkov S.I. *Predvestniki zemletryasenyi* [Precursors of earthquakes]. Moscow, IFZ RAN, 2002, 140 pp. (In Russian).
- [6] Fujinawa Y., Noda Y. Progress of Applied Seismo-Electromagnetism, *Open J. Earthq. Res.*, 2020, vol. 9, no. 1, pp. 1-18. DOI: 10.4236/ojer.2020.91001.
- [7] Kosobokov V. G. *Prognoz zemletryasenyi: osnovy, realizatsiya, perspektivy* [Earthquake forecast: fundamentals, implementation, prospects]. Moscow, GEOS, 2005, 179 pp. (In Russian).
- [8] Parovyshny V. A., Sokhatyuk Yu. V., Parovyshny D. V., Veselov O. V., Kochergin E. V. About approaches to solving some problems of operational forecast of seismic events, *Geosistemy perekhodnykh zon*, 2019, vol. 3, no. 1, pp. 5-18. DOI: 10.30730/2541-8912.2019.3.1.005-018 (In Russian).
- [9] Parovyshny V. A., Bogomolov L. M., Sokhatyuk Yu. V., Parovyshny D. V. Problems of operational forecast of seismic events. Proposed solutions, *Vestnik KRAUNC. Fiz.-Mat. Nauki*, 2021, vol. 35, no. 2, pp. 120-132. DOI: 10.26117/2079-6641-2021-35-2-120-132 (In Russian).
- [10] Grib N. N., Grib G. V., Kolodeznikov I. I. On the short-term forecast of earthquakes using geophysical precursors in South Yakutia, *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2021, no. 9-1 (111), pp. 121-127. DOI: 10.23670/IRJ.2021.9.111.020 (In Russian).
- [11] Grib N. N., Trofimenko S. V. Registration of electromagnetic radiation (EMR) during earthquakes, *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*, 2006, no. S10, pp. 197-207. (In Russian).
- [12] Dovbnya B. V., Pashinin A. Yu., Rakhmatulin R. A. Short-term electromagnetic precursors nicks of earthquakes, *Geodinamika i tektonofizika*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 731-740. DOI: 10.5800/GT-2019-10-3-0438 (In Russian).
- [13] Han P., Hattori K., Zhuang J., Chen C.-H., Liu J.-Y., Yoshida S. Evaluation of ULF seismo-magnetic phenomena in Kakioka, Japan by using Molchan's error diagram, *Geophys. J. Int.*, 2017, vol. 208, no. 1, pp. 482–490. DOI: 10.1093/gji/ggw404.
- [14] Bleier T., Dunson C., Maniscalco M., Bryant N., Bamberg R., Freund F. Investigation of ULF magnetic pulsations, air conductivity changes, and infra red signatures associated with the 30 October Alum Rock M5.4 earthquake, *Nat. Hazards Earth Syst.*, 2009, vol. 9, no. 2, pp. 585–603. DOI: 10.5194/nhess-9-585-2009.
- [15] Bleier T., Dunson C., Alvarez C., Freund F., Dahlgren R. Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments, *Nat. Hazards Earth Syst.*, 2010, vol. 10, no. 9, pp. 1965–1975. DOI: 10.5194/nhess-10-1965-2010.
- [16] Zhamaletdinov A. A., Mitrofanov F. P., Tokarev A. D., Shevtsov A. N. Influence of lunar-diurnal tidal deformations on electrical conductivity and fluid regime of the earth's crust, *Dokl. Akad. Nauk*, 2000, vol. 37, no. 2, pp. 235–239. (In Russian).

- [17] Avagimov A. A., Zeigarnik V. A., Fainberg E. B. On the spatiotemporal structure of seismicity caused by electromagnetic influence, *Fiz. Zemli*, 2005, no. 6, pp. 55–65. (In Russian).
- [18] Aleksandrov P. N., Modin I. N. On a systematic approach to the analysis of electrometric data monitoring, *Inzhenernyye izyskaniya*, 2015, no. 3, pp. 42-50. (In Russian).
- [19] Moroz Yu. F., Gontovaya L. I. On the deep structure of Southern Kamchatka according to geophysical data, *Geodinamika i tektonofizika*, 2018, vol. 9, no. 4, pp. 1147-1161. DOI: 10.5800/GT-2018-9-4-0387 (In Russian).
- [20] Nevedrova N. N., Ponomarev P. V. Results of long-term monitoring of electrophysical parameters in the seismically active zone of the Altai Mountains using direct current methods, *Interespo Geo-Sibir'*, 2018, vol. 3, pp. 281-287. DOI: 10.18303/2618-981X-2018-3-281-287 (In Russian).
- [21] Sobolev G. A., Morozov V. N., Migunov N. I. Electrotelluric field and strong earthquake in Kamchatka, *Izv. AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, 1972, no. 2, pp. 67-73. (In Russian).
- [22] Vorobyov A. A., Samokhvalov M. A., Gorelkin A. F., Ibragimov R. N., Usmanova M. T., Khodzhaev A. N. Anomalous changes in the intensity of the natural electromagnetic field in the area Tashkent before earthquakes, *Uzbek. geol. zhurnal*, 1976, no. 2, pp. 9-11. (In Russian).
- [23] Moroz Yu. F., Bakhtiarov V. F., Voropaev V. F., Gavrillov V. A., Levin V. E., Popruzhenko S. V. On monitoring the electrotelluric field for forecasting strong earthquakes in Kamchatka, *Vulkanologiya i seysmologiya*, 1995, no. 4-5, pp. 139-149. (In Russian).
- [24] Sobolev G. Application of electric method to the tentative short-term forecast of Kamchatka earthquakes, *Pure Appl. Geophys.*, 1975, vol. 113, no. 1, pp. 229-235. DOI: 10.1007/BF01592913.
- [25] Noritomi K. Geoelectric and geomagnetic observations and phenomena associated with earthquake in China. In: *Chinese earthquake prediction by the 1977 delegation of the Seismological Society of Japan*. Tokyo (Japan), Seismological Society of Japan, 1978, pp. 57–87.
- [26] Varotsos P., Alexopoulos K. Physical properties of the variations of the electric field of the earth preceding earthquakes, I, *Tectonophysics*, 1984, vol. 110, no. 1-2, pp. 73-98. DOI: 10.1016/0040-1951(84)90059-3.
- [27] Varotsos P., Alexopoulos K., Lazaridou M. Short term earthquake prediction from measurements of the electric field of the earth. In: *Risque, nature et societe: Actes du seminaire «Delphes I» [en ligne]*. Paris (France), Editions de la Sorbonne, 1996, pp. 139–154. DOI: 10.4000/books.pSORbonne.32076.
- [28] Nagao T., Orihara Y., Yamaguchi T., Takahashi I., Hattori K., Noda Y., Sayanagi K., Uyeda S. Co-seismic geoelectric potential changes observed in Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 2000, vol. 27, no. 10, pp. 1535-1538. DOI: 10.1029/1999GL005440.
- [29] Sarlis N., Skordas E. *Natural Time Analysis: The New View of Time. Precursory Seismic Electric Signals, Earthquakes and other Complex Time-Series*. Heidelberg (Germany), Springer Berlin, 2011, 484 pp. DOI: 10.1007/978-3-642-16449-1.
- [30] Uyeda S., Kamogawa M. The Prediction of Two Large Earthquakes in Greece, *Eos*, 2008, vol. 89, no. 39, pp. 363. DOI: 10.1029/2008EO390002.
- [31] Geller R. Debate on evaluation of the VAN Method: Editor's introduction, *Geophys. Res. Lett.*, 1996, vol. 23, no. 11, pp. 1291-1293. DOI: 10.1029/96gl00742.
- [32] Geller R. Earthquake prediction: critical review, *Geophys. J. Int.*, 1997, vol. 131, no. 3, pp. 425-450. DOI: 10.1111/j.1365-246x.1997.tb06588.x.
- [33] Papadopoulos G. Comment on "The Prediction of Two Large Earthquakes in Greece", *Eos*, 2010, vol. 91, no. 18, pp. 162. DOI: 10.1029/2010EO180003.

- [34] Zakupin A. S., Levin Yu. N., Boginskaya N. V., Zherdeva O. A. Development of medium-term methods forecast using the example of the Onor earthquake on Sakhalin ($M_w = 5.8$, August 14, 2016 year), *Geologiya i geofizika*, 2018, no. 11, pp. 1904-1911. DOI: 10.15372/GiG20181112. (In Russian).
- [35] Zakupin A. S., Bogomolov L. M., Boginskaya N. V. Application of seismic analysis methods LURR and SRP sequences for predicting earthquakes on Sakhalin, *Geofizicheskiye protsessy i biosfera*, 2020, vol. 19, no. 1, pp. 66-78. DOI: 10.21455/GPB2020.1-4. (In Russian).
- [36] Rulenko O.P. Operational precursors of earthquakes in the electricity of the surface atmosphere, *Vulkanologiya i seismologiya*, 2000, no. 4, pp. 57-68. (In Russian).
- [37] Marapulets Yu. V., Rulenko O. P., Larionov I. A., Mishchenko M. A. Simultaneous response of high-frequency geoaoustic emission and atmospheric electric field to deformation of near-surface sedimentary rocks, *Dokl. Akad. Nauk*, 2011, vol. 440, no. 3, pp. 403-406. (In Russian).
- [38] Morgunov V. A., Matveev I. V. Electrical and electromagnetic effects in the epicentral aftershock zone of the Spitak earthquake, *Izv. AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, 1991, no. 11, pp. 124. (In Russian).
- [39] Beloslyudtsev O. M., Uzbekov N. B. On a systematic approach to the analysis of electrometric data monitoring, *Ural'skiy geofizicheskiy vestnik*, 2006, no. 1 (9), pp. 5-8 (In Russian).
- [40] Guglielmi A. V., Levshenko V. T. Electromagnetic pulse from the earthquake source, *Dokl. Akad. Nauk*, 1996, vol. 349, no. 5, pp. 676-678. (In Russian).
- [41] Sobisevich L., Kanonidi K., Sobisevich A. Observations of ultra-low-frequency geomagnetic disturbances reflecting the processes of the preparation and development of tsunamigenic earthquakes, *Dokl. Earth Sci.*, 2010, vol. 435, no. 2, pp. 1627-1632.
- [42] Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Chebrov V., Voropaev V., Hayakawa M., Maekawa S., Biagi P.-F. Preseismic anomaly of LF signal on the wave path Japan-Kamchatka during November-December 2004, *Phys. Chem. Earth*, 2006, vol. 31, no. 4-9, pp. 422-427. DOI: 10.1016/j.pce.2006.02.033.
- [43] Rozhnoi A., Solovieva M., Molchanov O., Schwingenschuh K., Boudjada M., Biagi P.-F., Maggipinto T., Castellana L., Ermini A., Hayakawa M. Anomalies in VLF radio signals prior to the Abruzzo earthquake ($M = 6.3$) on 6 April 2009, *Nat. Hazards Earth Syst.*, 2009, vol. 9, no. 5, pp. 1727-1732. DOI: 10.5194/nhess-9-1727-2009.
- [44] Gokhberg M. B., Gufeld I. L., Gershenzon N. I., Pilipenko V. A. Electromagnetic effects during the destruction of the earth's crust, *Izv. AN SSSR. Ser. Fizika Zemli*, 1985, no. 1, pp. 72-87. (In Russian).
- [45] Gokhberg M. B., Morgunov V. A., Pokhotelov O. A. *Seismoelektromagnitnyye yavleniya [Seismoelectromagnetic phenomena]*. Moscow, Nauka, 1988, 174 pp. (In Russian).
- [46] Molchanov O. Generation of ULF electromagnetic emissions by microfracturing, *Geophys. Res. Lett.*, 1995, vol. 22, no. 22, pp. 3091-3094. DOI: 10.1029/95GL00781.
- [47] Surkov V. V. *Elektromagnitnyye efekty pri zemletryasenyakh i vzryvakh: Nauchnoye izdaniye [Electromagnetic effects during earthquakes and explosions: Scientific publication]*. Moscow, MIFI, 2000, 448 pp. (In Russian).
- [48] Nitsan U. Electromagnetic emission accompanying fracture of quartz-bearing rocks, *Geophys. Res. Lett.*, 1977, vol. 4, no. 8, pp. 333-336. DOI: 10.1029/GL004i008p00333.
- [49] Miroshnichenko M. I., Kuksenko V. S. Radiation of pulses during the initiation of cracks in solids dielectrics, *FTT*, 1980, vol. 22, no. 5, pp. 1531-1533. (In Russian).
- [50] Vorobyov A. A., Zashchinsky L. A., Nadezhkin S. G., Shiryayev V. F. Pulse electromagnetic field that arises during soil deformation in laboratory conditions, *FTPRPI*, 1981, no. 5, pp. 119-120. (In Russian).

- [51] Kurlenya M. V., Vostretsov A. G., Kulakov G. I., Yakovitskaya G. E. Registratsiya i obrabotka signalov elektromagnitnogo izlucheniya gornyx porod [Registration and processing signals of electromagnetic radiation from rocks]. Novosibirsk, Izdatel'stvo SO RAN, 2000, 232 pp. (In Russian).
- [52] Frid V., Rabinovitch A., Bahat D. Fracture induced electromagnetic radiation, J. Phys. D-Appl. Phys., 2003, vol. 36, no. 13, pp. 1620-1628. DOI: 10.1088/0022-3727/36/13/330.
- [53] Bepalko A. A., Kuzminykh R. A., Lyukshin B. A., Utsyn G. E., Yavorovich L. V. Experimental and theoretical study of electromagnetic emission in inhomogeneous dielectric materials, Izv. VUZov. Fizika, 2007, no. 2, pp. 16-22. (In Russian).
- [54] Yakovitskaya G. E. Metody i tekhnicheskiye sredstva diagnostiki kriticheskikh sostoyaniy gornyx porod na osnove elektromagnitnoy emissii [Methods and technical means for diagnosing critical conditions rocks based on electromagnetic emission]. Novosibirsk, Parallel', 2008, 314 pp. (In Russian).
- [55] Mori Y., Obata Y., Sikula J. Acoustic and electromagnetic emission from crack created in rock samples under deformation, Journal of Acoustic Emission, 2009, vol. 27, pp. 157-166. URL: https://www.researchgate.net/publication/266606255_Acoustic_and_electromagnetic...
- [56] Bulgakov R. F., Ivashchenko A. I., Kim C. U., Sergeev K. F., Streltsov M. I., Kozhurin A. I., Besstrashnoye V. M., Strom A. L., Suzuki Ya., Tsutsumi H., Watanabe M., Ueki T., Shimamoto T., Okumura K., Goto H., Kariya Y. Active faults of North-Eastern Sakhalin, Geotektonika, 2002, no. 2, pp. 66-86. URL: http://neotec.ginras.ru/comset/_bulgakov-r-f-i-dr-2002-aktivnye-razlomy-severo-vostochnogo-sahalina.pdf (In Russian).
- [57] Ivanov A. G. Seismoelectric effect of the second kind, Izv. AN SSSR. Ser. geografiya i geofizika, 1940, no. 5, pp. 699-727. (In Russian).
- [58] Svetov B. S. Towards a theoretical justification of the seismoelectric method of geophysical exploration, Geofizika, 2000, no. 1, pp. 28-39. (In Russian).
- [59] Lazaridou-Varotsos M. Earthquake Prediction by Seismic Electric Signals. Heidelberg (Germany), Springer Berlin, 2013, 254 pp. DOI: 10.1007/978-3-642-24406-3.
- [60] Sarlis N. V. Statistical significance of earth's electric and magnetic field variations preceding earthquakes in Greece and Japan revisited, Entropy, 2018, vol. 20, no. 8, pp. 561-578. DOI: 10.3390/e20080561.

Information about authors



Zakupin Alexander Sergeevich ✉ – Ph. D. (Phys. & Math.),
Leading Researcher at the Seismology Laboratory, Institute of Marine
Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia,
ORCID 0000-0003-0593-6417.



Dudchenko Ilya Pavlovich – Ph. D. (Tech.), Head of the
Department for Research of Geophysical Fields and Physical Properties
of Geomaterials at the Center for Collective Use, Institute of
Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia,
ORCID 0000-0002-4967-7405.



Bogomolov Leonid Mikhailovich ✉ – Dr. Sci. (Phys. & Math.), Chief Researcher, Director, Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia,  ORCID 0000-0002-9124-9797.



Gulyakov Sergey Aleksandrovich – Junior Researcher at the Department for Research of Geophysical Fields and Physical Properties of Geomaterials at the Center for Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia,  ORCID 0009-0001-7924-6972.



Kazakov Artem Ivanovich – Leading Engineer at the Department for Research of Geophysical Fields and Physical Properties of Geomaterials at the Center for Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia,  ORCID 0000-0002-1378-185X.



Stovbun Nikolay Sergeevich – Junior Researcher at the Department for Research of Geophysical Fields and Physical Properties of Geomaterials at the Center for Collective Use, Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia,  ORCID 0009-0004-1927-798X.