



Вариации вертикальной компоненты электротеллурического поля на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне в 2024 году

*Н. С. Стовбун*¹, *А. С. Закупин*¹, *Л. М. Богомолов*¹, *Д. В. Костылев*^{1,2},
*И. П. Дудченко*¹, *С. А. Гуляков*¹

@E-mail: nikolay19971997@yandex.ru

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

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

Резюме. В Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН в 2024 г. начаты непрерывные измерения вертикальной компоненты электротеллурического поля (ЭТП), дополнившие ранее организованный мониторинг горизонтальных компонент ЭТП. Вертикальная составляющая ЭТП измеряется по разности потенциалов между металлическими пластинами, расположенными в грунте одна над другой на глубине около 2 м. На измерительном пункте на площадке института (г. Южно-Сахалинск) установлено 2 системы пластин, подключенных к входу аналого-цифрового преобразователя. Основной целью работы является выявление и анализ вариаций вертикальной компоненты электротеллурического поля и установление возможной связи их с геодинамическим процессом и вариациями сейсмичности. В первый год измерений вертикальной компоненты ЭТП было выделено 4 периода с аномально высоким уровнем напряженности поля по сравнению со средним значением за период наблюдения: максимальный в 35 раз, минимальный в 5 раз. Суммарно эти периоды занимают около половины всего времени регистрации, именно в эти периоды произошло 80 % всех землетрясений южной части о. Сахалин за 11 месяцев 2024 г. (24 события из 30). Для горизонтальных компонент ЭТП не отмечалось столь значительных аномалий, как для вертикальной. Полученные результаты указывают на то, что изменения вертикальной компоненты ЭТП могут отражать вариации сейсмической активности в ближней зоне. Эти изменения, предположительно, могут считаться признаком подготовки землетрясений вблизи пункта измерений.

Ключевые слова: электротеллурическое поле, вертикальная компонента, регистрация данных, аномалии геофизических полей, сейсмические события

Variations in the vertical component of the electrotelluric field at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site in 2024

*Nikolai S. Stovbun*¹, *Aleksander S. Zakupin*¹, *Leonid M. Bogomolov*¹, *Dmitry V. Kostylev*^{1,2},
*Ilya P. Dudchenko*¹, *Sergei A. Gulyakov*¹

@E-mail: nikolay19971997@yandex.ru

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

² *Sakhalin Branch, Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia*

Abstract. In 2024, the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences started continuous measurements of the vertical component of the electrotelluric field (ETF), which were integrated into the previously organized monitoring of the horizontal components of the ETF. The vertical component of the ETF is measured by the potential difference between metal plates located in the ground, one above the other, at a depth of about 2 m. Two systems of plates were installed at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site (on the territory of IMGG FEB RAS) and were connected to an analog-to-digital converter (ADC). The aim of the study is to identify and analyze variations in the vertical ETF that may be associated with the geological deformation and variations in seismicity. In the first year of measurements of the vertical component of the ETF, 4 periods with an abnormally high level of field strength were identified compared to the average value for the observation period: maximum by 35 times,

minimum by 5 times. In total, these periods occupy about half of the entire registration time; it was during these periods that 80 % of all earthquakes in the southern part of Sakhalin Island occurred over 11 months of 2024 (24 events out of 30). For the horizontal components of the ETF, no such significant anomalies were observed as for the vertical one. Obtained results indicate that changes in the vertical component of the ETF may reflect variations in seismic activity in the near field. These changes can presumably be considered a sign of earthquake activity near the measurement point.

Keywords: electrotelluric field, vertical component, data recording, geophysical field anomalies, seismic events

Для цитирования: Стовбун Н.С., Закупин А.С., Богомолов Л.М., Костылев Д.В., Дудченко И.П., Гуляков С.А. Вариации вертикальной компоненты электротеллурического поля на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне в 2024 году. *Геосистемы переходных зон*, 2025, т. 9, № 2, с. 125–144. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.125-144>; <https://www.elibrary.ru/rrjeoc>

For citation: Stovbun N.S., Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Kostylev D.V., Dudchenko I.P., Gulyakov S.A. Variations in the vertical component of the electrotelluric field at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site in 2024. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2025, vol. 9, No. 2, pp. 125–144. (In Russ., abstr. in Engl.). <https://doi.org/10.30730/gtrz.2025.9.2.125-144>; <https://www.elibrary.ru/rrjeoc>

Финансирование и благодарности

Работа выполнена с использованием данных, полученных на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>; <http://www.gsras.ru/unu/>).

Funding and Acknowledgements

The research was carried out using data obtained at a unique scientific facility “Seismic infrasound complex for monitoring the Arctic cryolithozone and complex for continuous seismic monitoring of the Russian Federation, adjacent territories and the world” (<https://ckp-rf.ru/usu/507436/>; <http://www.gsras.ru/unu/>).

Введение

Геофизические измерения играют важную роль в изучении физических свойств Земли, так как динамика изменения физических полей отражает взаимодействие геосфер, их свойства, а также корреляционные связи между полями разной природы [1, 2]. Основным объектом исследования в данной области является процесс энергообмена между литосферой и атмосферой, в зоне контакта которых сконцентрирована человеческая деятельность. Изучение естественного электромагнитного поля Земли отражает как межпланетные взаимодействия, так и изменения в электрокинетических и геомеханических характеристиках породных массивов. Вариации естественного электромагнитного поля обусловлены динамикой блочных структур и изменением их напряженно-деформированного состояния [3]. Поиску предвестников землетрясений в аномалиях параметров естественного электромагнитного поля посвящено огромное число работ. Обзор важнейших результатов проведен, например, в [4–6]. В работах последнего десяти-

летия можно наблюдать значительный рост объема регистрируемых данных по вариациям электромагнитных (электротеллурического и геомагнитного) полей, а также повышение качества измерений [7–12]. В этих работах в большинстве случаев исследовались вариации горизонтальных компонент электротеллурического поля (ЭТП), а также геомагнитные вариации. Можно отметить частое применение аппаратуры для магнитотеллурического зондирования [13–17]. Измерениям вертикальной компоненты ЭТП уделено значительно меньшее внимание. Тем не менее, было установлено наличие вариаций вертикального электрического поля, вызванных деформационными (сейсмотектоническими) процессами в коре Камчатки [18–22]. Измерения напряженности вертикальной компоненты электрического поля E_z проводились как в атмосфере, около дневной поверхности, так и в грунте. Для измерений в атмосфере использовали датчик напряженности электрического поля «Поле-2М» (ГГО им. А.И. Воейкова [23]). Измерения E_z в грунте проводили при помощи разнесенных по вертикали пластин-электродов площадью

0.25 м² по методике Д.А. Кузнецова [22]. Как показали работы камчатских геофизиков, применение датчиков для мониторинга электротеллурического поля позволяет в значительной степени подавить помехи, наводимые естественными (молнии, ионосферные возмущения) и техногенными (коммутация сильноточных разрядов) источниками. В этом отношении системы регистрации вертикального электрического поля Земли обладают преимуществом по сравнению с наиболее распространенными системами измерения горизонтальных компонент ЭТП (которые более восприимчивы к сторонним электромагнитным помехам, так как неизбежно включают измерительный диполь, т.е. фактически «антенну»).

В июле 2023 г. на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне ИМГиГ ДВО РАН (47.0293° с.ш., 142.7166° в.д.) была развернута современная система регистрации горизонтальных компонент ЭТП и стали проводиться непрерывные измерения. При создании системы применены новейшие аппаратные и программные разработки, обеспечивающие высокое качество регистрируемых сигналов ЭТП. Свообразным тестом чувствительности этой системы к деформационным процессам в Земле стала реакция на землетрясение умеренной магнитуды ($M = 3.4$), произошедшее 09.08.23 на расстоянии в 10 км от места измерений ЭТП. В условиях умеренной сейсмичности на территории о. Сахалин это довольно редкий случай, когда очаг землетрясения такой магнитуды оказывается вблизи пункта измерений. В период с июля по сентябрь 2023 г. в записях горизонтальных компонент ЭТП в ночное время были обнаружены сигналы, следующие с характерным периодом повторяемости 140–160 с [24]. В асейсмичный период, с сентября 2023 г. по февраль 2024 г., такие сигналы не наблюдались.

В декабре 2023 г. на том же полигоне была введена в эксплуатацию система измерения вертикальной составляющей ЭТП, и с этого времени в ИМГиГ ДВО РАН проводятся непрерывные измерения всех трех компонент электрического поля Земли в диапазоне частот 0–150 Гц для горизонтальных компонент и 0–10 Гц для вертикальной.

Учитывая ограниченное число исследований вертикальной компоненты ЭТП и предполагаемую помехоустойчивость, выявленную в работах камчатских геофизиков, актуальным представляется изучение вариаций вертикального ЭТП в условиях сейсмичности юга о. Сахалин для оценки их связи с гедеформационными процессами.

В работе представлено исследование поведения вертикальной компоненты ЭТП в период с 01.01.2024 по 30.11.2024 с выявлением аномалий, которые могут быть ассоциированы с проявлениями сейсмической активности.

Методика измерений и аппаратное обеспечение

Вертикальная система измерений была интегрирована с уже действующими измерительными каналами горизонтальных компонент ЭТП. Функциональная схема системы измерений ЭТП представлена на рис. 1. Первичные преобразователи горизонтального ЭТП представляют собой три диполя, направленных, соответственно, на запад (W), север (N) и северо-запад (NW) от общего полюса (рис. 1 а). В качестве заземлителя используется электрод из нержавеющей стали, заглубленный в грунт на 2 м и соединенный с центральным измерительным модулем, в котором смонтирована материнская плата «TIGD-C113» форм-фактора «Mini-ITX», а также плата АЦП модели «L-780M» производства компании «L-Card» (<https://www.lcard.ru/products/boards/l-780>). Подробное описание методики измерения горизонтальной компоненты ЭТП представлено в [24].

При проектировании систем электродов для измерения вертикального ЭТП учитывался подход, разработанный в конце 1980-х годов на Камчатке Д.А. Кузнецовым [22]. На глубине около 2 м были установлены две системы электродов (рис. 1 с), расположенные на расстоянии 10 м друг от друга. Каждая система (по сути, первичный преобразователь) состоит из трех пластин размером 50 × 50 см, расположенных соосно и параллельно друг другу на расстоянии 50 см. Пластины изготовлены из нержавеющей стали. На одной из поверхностей каждой

пластины нанесено изолирующее покрытие. Промежутки между пластинами заполнены грунтом. Пластины установлены таким образом, что грунт между нижней и промежуточной пластинами контактирует с металлической поверхностью, а грунт между промежуточной и верхней – с изолирующим покрытием. Таким образом, для обращенных друг к другу поверхностей пластин условия гальванического контакта или изоляции одинаковы (в отличие от конфигурации электродов в методике [22]). Это может уменьшить нежелательный вклад приэлектродных эффектов в измеряемую разность потенциалов между пластинами.

Разность потенциалов для средних и верхних пластин определяется относительно нижних (каналы CH1, CH2, CH7, CH8, рис 1 c). В качестве АЦП используется 8-канальный модуль аналогового ввода модели «ADAM-4017» (рис. 1 b) (<https://www.advantech.com/ru-ru/products/gf-5vtd/adam-4017>), который находится в непосредственной близости к электродам, а с главным измерительным модулем соединен

линией длиной 30 м по шине RS-485. Модуль «ADAM-4017» расположен в отдельном корпусе, в котором функционирует система термостабилизации. Измерения осуществляются в диапазоне частот 0–10 Гц. Модуль включает в себя фильтр низких частот, а также режекторный фильтр для подавления промышленных помех. Было создано программное обеспечение (язык программирования C++), которое считывает данные с «ADAM-4017», создавая 4-часовые файлы в непрерывном режиме.

Нержавеющая сталь выбрана для электродов благодаря ее высокой коррозионной стойкости, что критично для многолетнего мониторинга в естественных условиях. В отличие от неполяризуемых электродов, таких как Cu/CuSO₄, которые требуют регулярного обслуживания и стабильного электролитического контакта, стальные пластины сохраняют целостность при длительном нахождении в грунте в условиях низких зимних температур. Известно, что такие электроды могут создавать контактный потенциал из-за

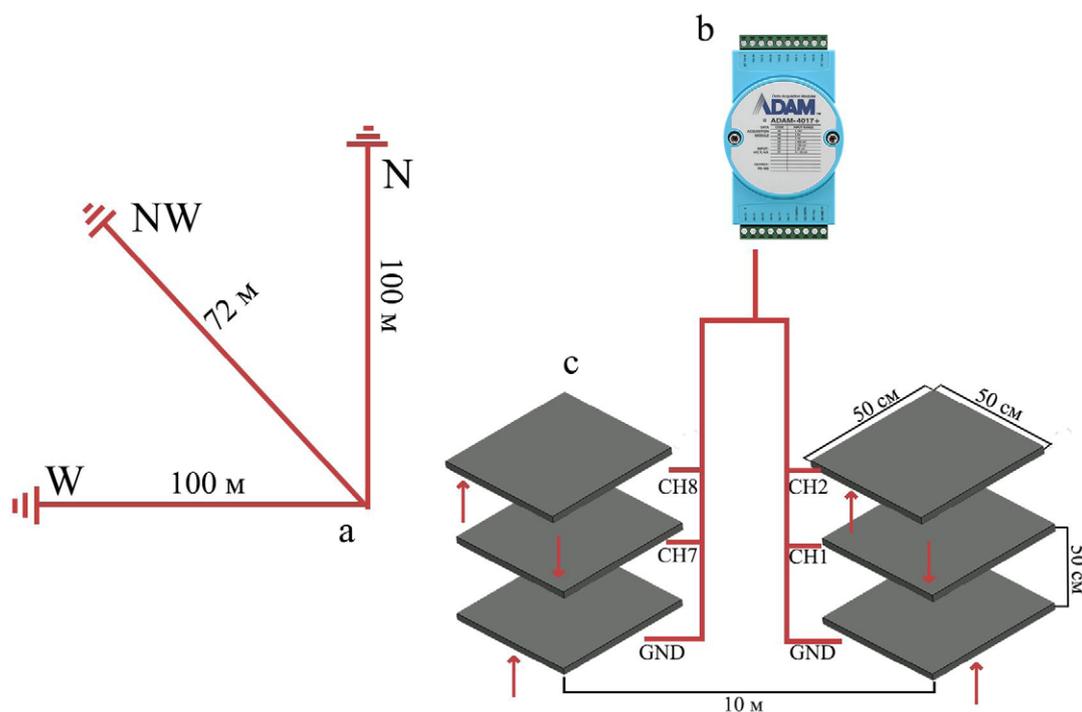


Рис. 1. Функциональная схема измерения ЭТП на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне. (a) Диполи W (запад), NW (северо-запад), N (север); (b) 8-канальный модуль аналогового ввода «ADAM-4017»; (c) системы вертикальных электродов. Стрелки показывают стороны пластин, на которые было нанесено изолирующее покрытие.

Fig. 1. Functional scheme of the ETP measurement at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site. (a) Dipoles W (west), NW (northwest), N (north); (b) 8-channel analog input module “ADAM-4017”; (c) systems of vertical electrodes. Arrows indicate the surfaces of the plates coated with an insulating layer.

электрохимических процессов на границе металл–грунт (поляризация). Но, как будет показано в разделе «Связь аномалий ЭТП с сейсмической активностью», фоновое смещение напряженности поля не превышает 20 мВ/м, что существенно меньше наблюдаемых резких «бухтообразных» изменений (до 912 мВ/м), которые нельзя объяснить влиянием экзогенных факторов (температура, влажность и т.д.).

Таким образом, возможное смещение напряженности поля из-за поляризации (0–20 мВ/м) хоть и не позволяет измерить истинное значение вертикального электротеллурического поля, однако значительные амплитуды аномалий (до 912 мВ/м) и их стабильное выделение на фоне постоянной составляющей сигнала подтверждают применимость используемых нами электродов для оценки изменений ЭТП, связанных с сейсмическими событиями на юге Сахалина.

В мае 2024 г были проведены малоглубинные электрозондирования однополярными импульсами с регистрацией откликов на каналах горизонтальных диполей N, W, NW (рис. 2 а). Дополнительно регистрировались сигналы по каналам вертикального ЭТП (рис. 2 б, с). Данные на графиках приведены в мкВ/м. Для электрозондирования использовался первичный возбуждающий диполь длиной 100 м, центр которого располагался на расстоянии 160 м от центра диполя N горизонтальной компоненты ЭТП. На концах возбуждающего диполя на глубину 1 м были вбиты стержневые

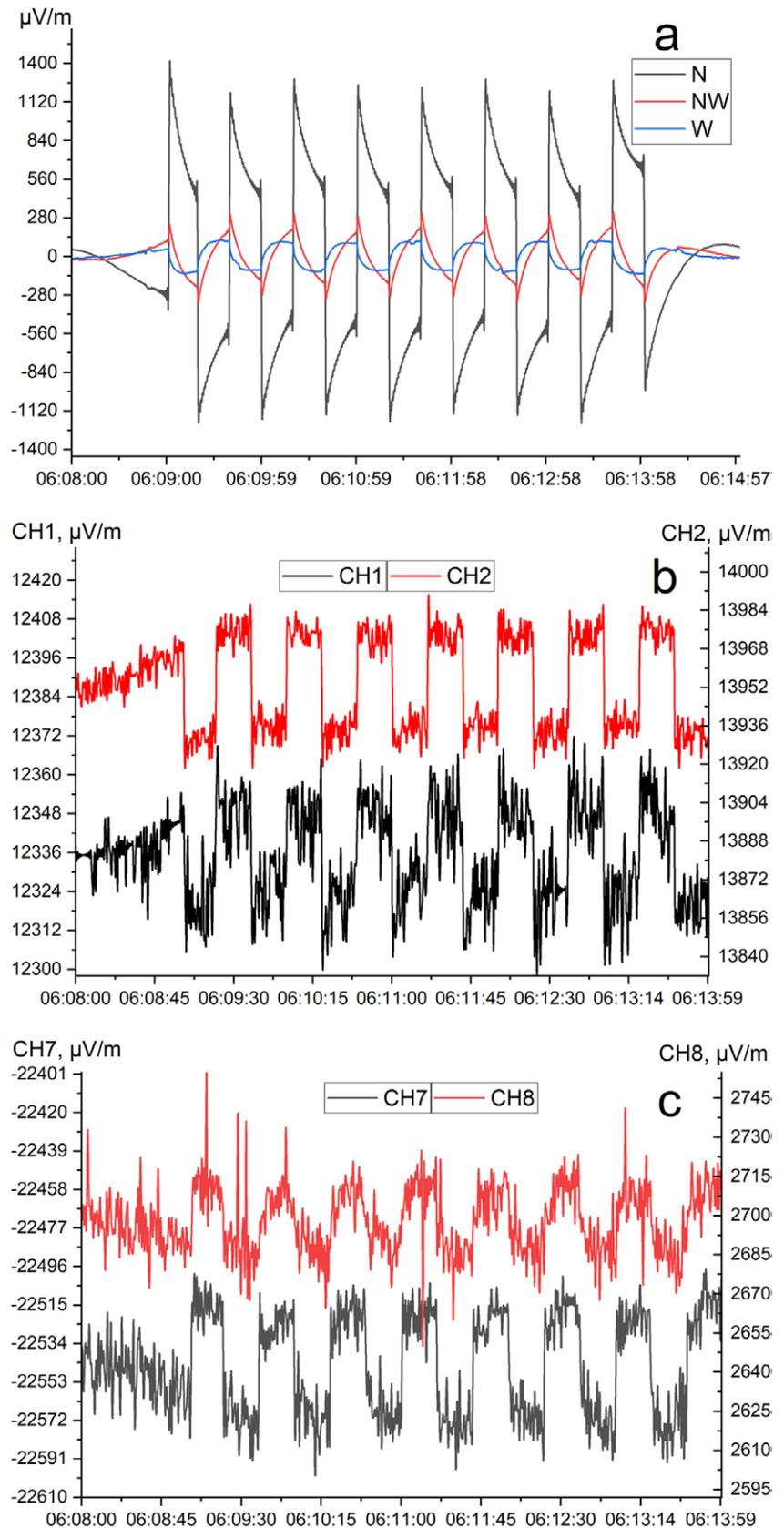


Рис. 2. Изменения по каналам горизонтальных (а) и вертикальной (б, с) компонент ЭТП во время электрозондирования.

Fig. 2. Variations in the data of channels of horizontal (a) and vertical (b, c) components of ETF during electrical sounding.

электроды из нержавеющей стали. Аппаратура и методика, применяемые нами для электрозондирований, описаны в [25]. В ходе эксперимента на возбуждающий диполь подавали 300 В постоянного напряжения с током 5.5 А. Подача напряжения осуществлялась импульсами по 20 с с паузами 20 с между ними. Данные со всех каналов были отфильтрованы полосовым фильтром в диапазоне 0.01–1 Гц для подавления низкочастотных трендов и высокочастотных помех. На рис. 2 видно, что на всех каналах горизонтального поля наблюдается реакция на электрозондирование – импульсы с волновой формой, подобные зондирующим. Наибольшая амплитуда отклика отмечена на диполе N (1420 мкВ/м), ближайшем к источнику зондирований, а наименьшая – на диполях NW (230 мкВ/м) и W (115 мкВ/м). Тем самым была подтверждена исправность измерительных каналов и отсутствие аппаратных ошибок или обрывов в линиях N, NW, W.

Для подтверждения чувствительности системы вертикальных пластин к напряженности вертикальной компоненты электрического поля E_z были проанализированы отклики каналов СН1, СН2, СН7, СН8 на электрозондирование (рис. 1 с, 2 б, с). Амплитуда импульсов для каналов СН1, СН2, СН7, СН8 составила 46, 52, 80 и 37 мкВ/м соответственно. Полярность импульсов на каналах СН1, СН2 отрицательная, в то время как для СН7, СН8 положительная. Амплитуды отклика на каналах СН7, СН8 различаются в 2.16 раза (80 и 37 мкВ/м), тогда как на каналах СН1 и СН2 они близки (46 и 52 мкВ/м). Для сравнения с измеренными откликами каналов СН1, СН2, СН7, СН8 было рассчитано значение вертикального электрического поля E_z в точке расположения электродов. Используя данные для возбуждающего диполя и измерительного диполя N и применяя диполь-дипольную расчетную схему [26], мы предварительно рассчитали кажущееся удельное сопротивление грунта. Величина кажущегося удельного сопротивления составила 121 Ом·м. Потенциал в точке расположения пластин относительно концов возбуждающего диполя определяем по формуле [26]:

$$V = \frac{I \times \rho}{2\pi} \times \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (1)$$

где V – потенциал в точке, вызванный электрическим полем от токов, протекающих через электроды возбуждающего диполя, R_1, R_2 – расстояние от электродов возбуждающего диполя до точки, I – ток, ρ – удельное сопротивление. Компоненты электрического поля можно вычислить, если взять частные производные по координатам:

$$E_x = \frac{-\partial V}{\partial x}, \quad E_y = \frac{-\partial V}{\partial y}, \quad E_z = \frac{-\partial V}{\partial z}. \quad (2)$$

Вертикальная компонента E_z была определена путем дифференцирования потенциала V (уравнение 1) по координате z (уравнение 2 для E_z), что дало уравнение:

$$E_z = \frac{I \times \rho}{2\pi} \times \left(\frac{z - z_a}{R_1^3} + \frac{z - z_b}{R_2^3} \right), \quad (3)$$

где z, z_a, z_b – глубины точки наблюдения (z) и концов диполя (z_a, z_b). Расчеты были проведены для пластин на глубинах 1 м и 1.5 м (каналы СН1, СН2, СН7, СН8). В результате расчета получились значения E_z 58 и 46 мкВ/м для каналов СН1, СН2 и 56 и 45 мкВ/м для СН7, СН8. Расчетные значения E_z (45–58 мкВ/м) близки к измеренным амплитудам откликов (46–80 мкВ/м), что подтверждает чувствительность измерительной системы к изменениям напряженности E_z с амплитудой больше или порядка десятков мкВ/м и ее способность надежно регистрировать изменения вертикальной компоненты ЭТП с более высокой амплитудой (десятки-сотни мВ/м). Хотя круговой электрический диполь [27] остается актуальным подходом, вышеприведенный метод был выбран из-за ограниченного пространства на участке и наличия готового оборудования.

Система измерений показала себя устойчивой к погодным условиям юга Сахалина. Даже длительные периоды низких температур не повлияли на непрерывность сбора данных. При отключениях электроэнергии были потери данных за периоды от нескольких часов до нескольких дней – в сумме 7.72 % потерянных данных от всего объема измерений в 11 мес.

На данный момент накоплен почти годовой объем данных по вертикальной компоненте ЭТП, что приемлемо для первичного анализа и сопоставления с данными сейсмических каталогов. В качестве рабочего каталога 2024 г. использовался оперативный каталог землетрясений, сформированный на основе данных регионального информационного обрабатывающего центра (РИОЦ) «Южно-Сахалинск».

Результаты

Анализ вариаций вертикальной компоненты ЭТП

Для визуализации данных вертикальной составляющей ЭТП использовался программный пакет «Origin Pro 2022». Для соединения и обработки 4-часовых файлов с модуля «ADAM-4017» применялось ПО собственной разработки (язык программирования C++). Вертикальная компонента напряженности ЭТП (E_z) пропорциональна разности потенциалов, регистрируемой по каналам СН1, СН2, СН7, СН8. На графиках ниже представлена динамика изменения E_z в течение времени (в формате UTC).

Анализ вертикальной составляющей ЭТП заключался в поиске так называемых аномалий, которые характеризуются значительным отклонением величины E_z от фонового уровня. В исследуемый период на всех каналах одновременно наблюдались четыре продолжительных интервала времени, в которые зафиксированы «бухтообразные» аномалии разной длительности и формы. Примеры двух аномалий представлены на рис. 3, где изображен график изменения E_z на канале СН2 с 20.05.2024 по 20.08.2024.

Аномалии ярко выражены по отношению к фоновому уровню. Они начинаются резким увеличением амплитуды сигнала, которая остается высокой на протяжении определенного периода времени с последующим спадом к фоновым значениям.

Для определения точного времени начала и конца аномалий данные за весь период измерений усреднялись с использованием скользящего среднеквадратичного отклонения (СКО) с окном в двое суток. Это позволило выделить резкие отклонения от среднего уровня. Далее для отфильтрованного сигнала вычислялось медианное значение, так как оно менее чувствительно к выбросам данных. Началом аномалии считается выход отфильтрованного сигнала за пределы медианного значения (на более чем сутки), а возврат в его пределы считается окончанием аномалии. На рис. 4 представлен пример определения начала и конца аномалии по вышеописанному алгоритму. В результате выделяются границы аномалий – первая с 03.06.2024 по 14.06.2024 и следующая с 15.07.2024 по 07.08.2024; кратковременное падение СКО до нуля отражает стабилизацию сигнала, не нарушая целостности аномального периода.

Временные границы выделенных аномальных интервалов ограничены началом самой первой аномалии из четырех каналов и окончанием последней. Такой подход обусловлен тем, что аномалии на каналах происходят с разницей в несколько дней. В аномальные интервалы включаются только те периоды, где аномалии наблюдаются на всех каналах. На рис. 5 представлены изменения E_z на каналах СН1, СН2, СН7 и СН8 в период с 1 января по

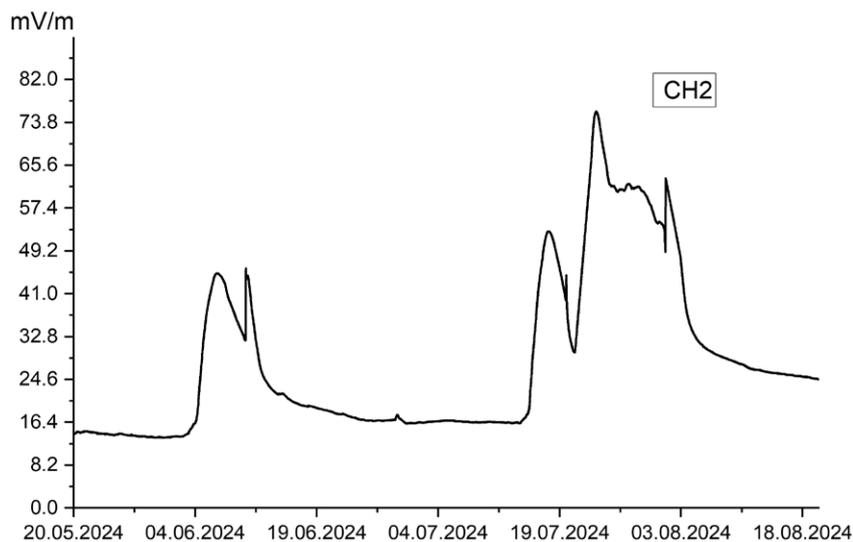


Рис. 3. Изменения напряженности поля E_z на канале СН2 с 20.05.2024 по 20.08.2024.

Fig. 3. Variations in the electric field strength E_z on the СН2 channel from 20.05.2024 to 20.08.2024.

30 ноября 2024 г. (сигнал децимирован до 1 Гц). Аномальные интервалы на рис. 5 ограничены синими линиями и пронумерованы по порядку их появления (A1–A4). Первый период (A1), самый продолжительный, длился 102 сут. Ано-

малия характеризовалась максимальной амплитудой напряженности – 912 мВ/м (СН1). Второй аномальный период (A2) был самым коротким (17 сут) и имел наименьшую амплитуду напряженности поля среди всех за-

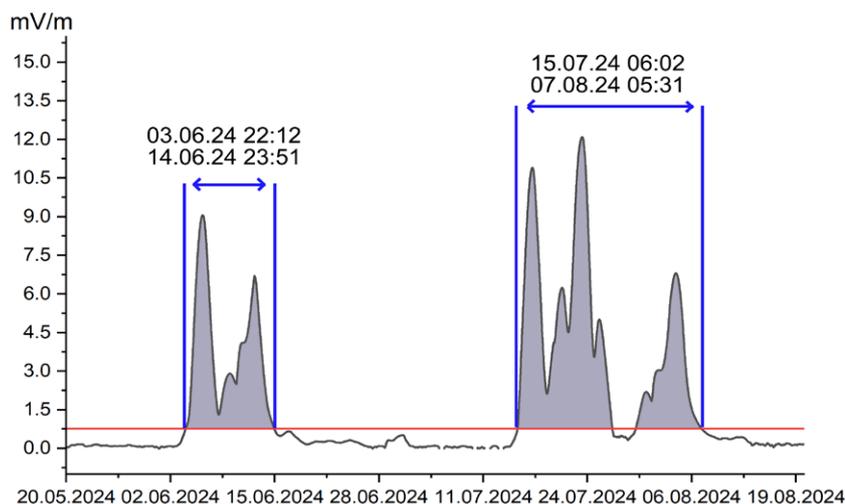


Рис. 4. Пример определения границ аномальных интервалов в данных канала CH2 с 20.05.2024 по 20.08.2024 (даты и время здесь и далее приводятся в формате UTC). Черная линия – данные канала CH2, отфильтрованные среднеквадратичным отклонением с окном в двое суток; красная линия – медианное значение E_z для канала CH2. Аномалии выделены серым цветом.

Fig. 4. An example of determining the borders of anomaly periods in the CH2 channel from 20.05.2024 to 20.08.2024. Black line indicate CH2 channel data filtered by standard deviation with a two-day window; red line indicates median value of E_z for the CH2 channel. Anomalies are highlighted in gray.

регистрованных аномалий – 24 мВ/м (СН8). Таким образом, максимальная амплитуда аномалии E_z , зафиксированная за период измерений, превышает фон в 35 раз, а минимальная – в 5 раз. Длительность периодов и другие характеристики аномалий приведены в табл. 1.

За весь период наблюдений форма аномалий ЭТП (пропорциональных разностям потенциалов между пластинами) различалась для каналов СН1 и СН2, а для каналов СН7, СН8 (рис. 1 с) была идентичной. Различия в амплитудах аномалий для каналов СН1 и СН7 (измерения между нижними и средними пластинами) были в пределах 40–170 мВ/м. Для каналов СН2 и СН8 (измерения

Таблица 1. Параметры аномальных вариаций вертикальной компоненты ЭТП за период измерений

Table 1. Parameters of anomalies of the vertical ETF for the measurement period

№	Дата и время, начало	Дата и время, окончание	Длительность, сутки	Максимальная амплитуда аномалии, мВ/м	Средняя амплитуда по двум системам, мВ/м
A1	05.01.2024 14:52	16.04.2024 04:44	102	СН1 = 912 СН7 = 870 СН2 = 57 СН8 = 451	891 254
A2	31.05.2024 01:30	16.06.2024 21:06	17	СН1 = 48 СН7 = 98 СН2 = 32 СН8 = 24	73 28
A3	16.07.2024 17:07	07.08.2024 05:56	22	СН1 = 476 СН7 = 374 СН2 = 59 СН8 = 150	425 104
A4	16.09.2024 10:44	28.10.2024 11:48	43	СН1 = 640 СН7 = 464 СН2 = 95 СН8 = 221	552 158

между нижними и верхними пластинами) амплитуды были разными для отдельных аномальных периодов. Например, для А2 амплитуды были близки (32 и 24 мВ/м), а для А1 разница в амплитудах составила почти 400 мВ/м.

Связь аномалий ЭТП с сейсмической активностью

В предшествующих работах по электромагнитным измерениям [8–11] установлено, что аномалии, связанные с подготовкой землетрясений, могут фиксироваться за несколько недель до главного сейсмического события. В этой связи представляет интерес выявление совпадений периодов выделенных аномалий с сейсмическими событиями, которые произошли в ближней зоне. Для анализа связи аномалий ЭТП с сейсмической активностью были рассмотрены землетрясения с магнитудой $M \geq 3$, зарегистрированные в южной части о. Сахалин в 2024 г. (табл. 2; рис. 6) в пределах прямоугольной зоны с координатами 47.8° с.ш., 145.6° в.д. – 45.6° с.ш., 139.9° в.д. В табл. 2 приведены параметры землетрясений и расстояния от гипоцентров до пункта регистрации ЭТП.

На рис. 6 показано расположение эпицентров землетрясений, перечисленных в табл. 2. Дополнительно на карту нанесены разломные структуры [28]. Большинство из землетрясений (21 событие из 30) – глубокофокусные, с гипоцентрами под Охотским морем. Самое сильное землетрясение с магнитудой $M = 6.1$ произошло 10.08.2024. Из 9 очагов коровых землетрясений 6 лежат около Западно-Сахалинского разлома (ЗСР), один (№ 11) – под Охотским морем, а два (№ 15, 20) попадают в ближнюю от измерительного пункта зону. Гипоцентр самого близкого землетрясения (событие № 15 от 31.03.2024, $M = 3.0$) находился всего в 42 км от пункта регистрации ЭТП, второго близкого землетрясения (№ 20 от 15.06.2024, $M = 4.1$) – в 49 км.

На рис. 7 приведены изменения напряженности поля E_z со всех измерительных каналов в период измерений, отмечены также землетрясения из табл. 2. Для 24 из 30 землетрясений с магнитудой $M \geq 3$ время событий совпадает с периодами обнаруженных аномалий.

На первый аномальный период выпадает 16 землетрясений, 7 из которых коровые,

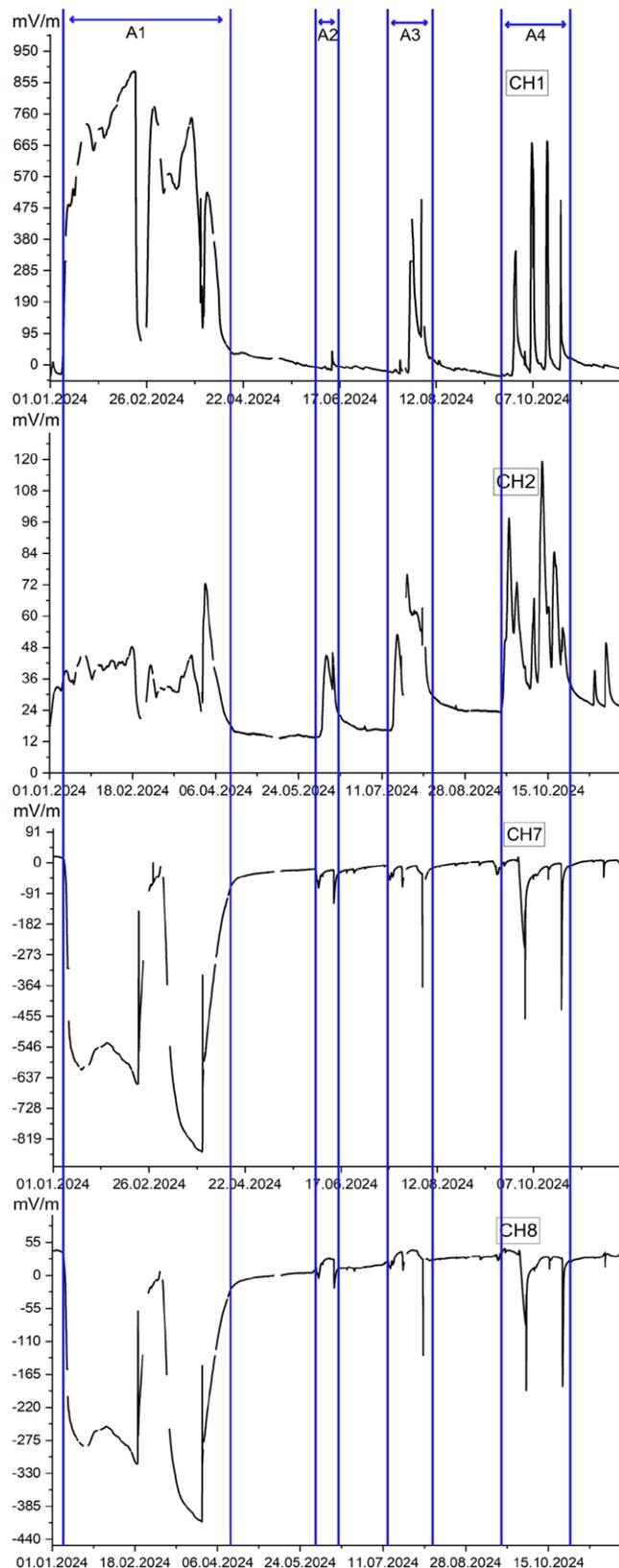


Рис. 5. Изменения напряженности поля E_z на каналах CH1, CH2, CH7 и CH8 в период с 01.01.2024 по 30.11.2024 в аномальные периоды А1–А4 (табл. 1).

Fig. 5. Variations in electric field strength E_z on channels CH1, CH2, CH7 and CH8 from 01.01.2024 to 30.11.2024 and anomaly periods А1–А4 (Table 1).

Таблица 2. Землетрясения с $M \geq 3$, произошедшие с 01.01.2024 по 30.11.2024 в пределах прямоугольной зоны с координатами 47.8° с.ш., 145.6° в.д. – 45.6° с.ш., 139.9° в.д.

Table 2. Earthquakes with $M \geq 3$ that occurred from 01.01.2024 to 30.11.2024 within the rectangular area bounded by coordinates 47.8° N, 145.6° E – 45.6° N, 139.9° E.

№	Дата	Время (UTC)	Координаты, N°; E°	Глубина, км	Магнитуда, ML	Расстояние от пункта ЭТП до гипоцентра, км
1	04.01.2024	12:42:42	46.62; 141.78	17	3.6	85
2	15.01.2024	00:15:03	45.66; 142.81	314	4.1	348
3	19.01.2024	16:56:59	46.82; 141.57	7	4.6	89
4	23.01.2024	15:36:14	45.79; 143.22	333	3.3	362
5	29.01.2024	16:53:52	46.26; 141.56	10	3.2	121
6	06.02.2024	03:39:31	45.75; 142.94	349	3	377
7	11.02.2024	05:16:30	45.80; 141.76	12	3.9	153
8	13.02.2024	07:15:09	45.82; 141.94	10	3.7	145
9	16.02.2024	22:55:38	46.48; 143.97	361	3.7	378
10	19.02.2024	09:32:50	46.72; 145.00	421	3.4	457
11	25.02.2024	06:22:57	45.62; 143.20	25	3.3	162
12	12.03.2024	18:22:28	45.64; 142.16	317	4.7	355
13	23.03.2024	19:45:53	46.77; 144.71	385	3.9	415
14	31.03.2024	09:37:57	45.98; 141.81	5	3	134
15	31.03.2024	23:37:28	47.31; 142.47	19	3	42
16	03.04.2024	17:37:26	46.62; 144.77	391	3.8	423
17	05.04.2024	09:22:47	45.63; 143.29	329	3	366
18	30.04.2024	16:32:55	45.79; 143.41	332	3.8	363
19	12.06.2024	12:17:13	46.82; 145.21	398	3.1	441
20	15.06.2024	13:35:30	46.67; 142.34	7	4.1	49
21	18.07.2024	05:53:24	46.64; 144.72	390	3.8	421
22	18.07.2024	22:54:36	45.71; 143.36	330	4.5	364
23	21.07.2024	10:11:34	45.68; 143.56	318	3.6	357
24	05.08.2024	04:35:29	45.76; 143.21	309	3	341
25	10.08.2024	03:28:31	46.97; 144.65	428	6.1	453
26	25.08.2024	05:42:40	45.86; 143.65	318	3.4	350
27	09.10.2024	13:17:28	46.25; 144.68	362	3.2	401
28	12.10.2024	03:32:41	45.67; 143.40	317	3.1	355
29	03.11.2024	04:35:02	46.63; 144.75	412	3.9	442
30	16.11.2024	18:03:36	46.06; 143.51	347	4.3	368

Примечание. Выделены сведения о ближайших к измерительному пункту событиях.

Note. The events closest to the ETF station are highlighted.

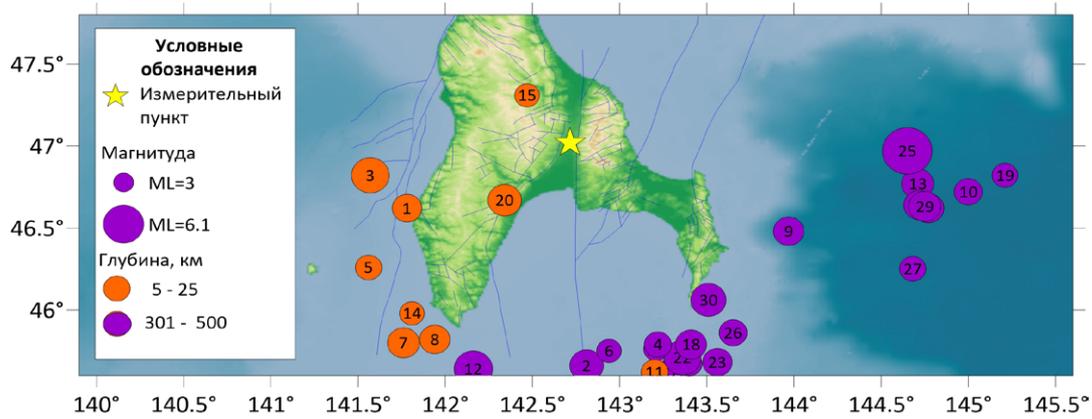


Рис. 6. Карта эпицентров землетрясений, произошедших на юге Сахалина с 01.01.2024 по 30.11.2024 ($M \geq 3$). Линиями обозначены разломные структуры по данным [28].

Fig. 6. Map of earthquake epicenters that occurred on the south Sakhalin Island from 01.01.2024 to 30.11.2024 ($M \geq 3$). The lines indicate fault structures according to data from [28].

а 9 глубокофокусные; на второй – два события, одно из которых коровое; третье аномальное изменение сопровождается четырьмя глубокофокусными землетрясениями; четвертое – двумя глубокофокусными. Остальные 6 событий (табл. 2, № 1, 18, 25, 26, 29, 30) не отмечены аномалиями. Из них одно коровое, остальные глубокофокусные. Данные о количестве и типе сейсмических событий в аномальные периоды приведены в табл. 3.

Приведенные данные дают основание предположить, что аномальные изменения вертикальной компоненты ЭТП коррелируют с общей активизацией сейсмичности в южной части Сахалина, поскольку в аномальные периоды, составляющие 55 % времени измерений (184 дня из 334), попадают 80 % землетрясений. В пользу этого предположения может также говорить соответствие длительности периодов аномалий и количества событий: в период наиболее значительной по продолжительности и отклонению от фона аномалии (A1, 102 сут, т.е. около 30 % от времени наблюдений) произошло в сумме 16 землетрясений. Стоит также отметить, что на аномалию A1 приходится 7 из 9 всех коровых землетрясений, которые произошли за период измерений. На аномальный период A2 длительностью 17 сут

приходится 2 события, а период A3 (22 дня) включает в себя 4 события. А вот аномальный период A4 не укладывается в данную закономерность, включая в себя 2 события при длительности в 43 дня, т.е. отличается низкой сейсмической активностью при значительной длительности. Возможно, аномалия A4 обусловлена внешними факторами, такими как техногенные или ионосферные шумы, не связанные с сейсмической активностью. Для уточнения природы подобных аномалий необходимы дополнительные исследования.

Рассмотрим возможные связи аномалий ЭТП с ближайшими к пункту измерения

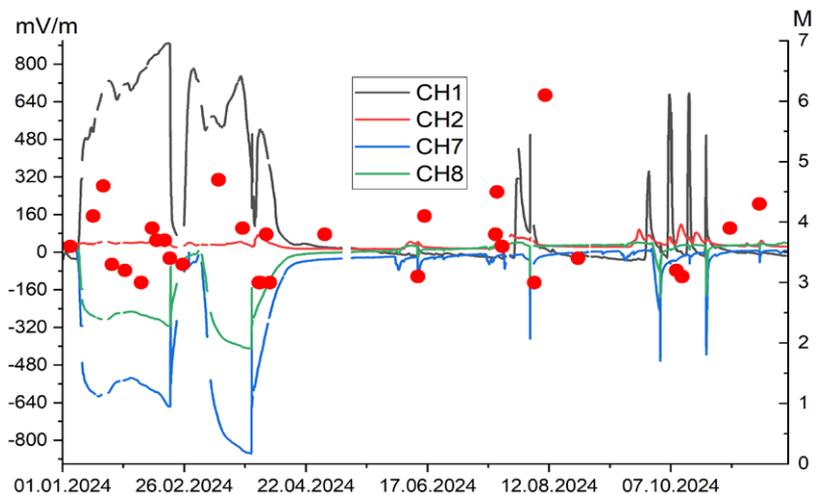


Рис. 7. Изменения напряженности поля E_z на каналах CH1, CH2, CH7 и CH8 в период с 01.01.2024 по 30.11.2024 и произошедшие в этот период землетрясения (отмечены красными точками).

Fig. 7. Variations in electric field strength E_z on channels CH1, CH2, CH7, and CH8 from 01.01.2024 to 30.11.2024 and earthquakes that occurred during this period (indicated by red dots).

сейсмическими событиями. На рис. 8 представлены изменения напряженности поля E_z в аномальные периоды и происходившие в это время землетрясения. Фоновый уровень E_z в отсутствие аномалий не превышает 20 мВ/м (ср. с замечанием о контактных потенциалах в разделе «Методика измерений и аппаратурное обеспечение»).

На рис. 8 а обратим внимание на землетрясение № 15 ($M = 3$), гипоцентр которого находится в 42 км от измерительного пункта (самое близкое событие за весь период измерений). Оно произошло в конце аномального периода. К моменту окончания периода А2 (рис. 8 б) происходит землетрясение № 20 с $M = 4.1$ (48 км от измерительного пункта). Во время периода А3 (рис. 8 с) близких землетрясений не было. Тем не менее через 69 ч после А3 произошло глубокофокусное землетрясение с $M = 6.1$ (№ 25). Его гипоцентр на-

ходился в 453 км от измерительного пункта. В последний аномальный период (рис. 8 д) отсутствует какое-либо значительное землетрясение, которое можно «привязать» к окончанию аномального изменения вертикальной компоненты ЭТП.

Таблица 3. Количество землетрясений, произошедших во время аномалий ЭТП и в обычные периоды (БА)

Table 3. Number of earthquakes that occurred during ETF anomalies and in normal periods

№	Длительность периодов, сут.	Землетрясения	
		коровые	глубоко-фокусные
A1	102	7	9
A2	17	1	1
A3	22	–	4
A4	43	–	2
БА	150	1	5

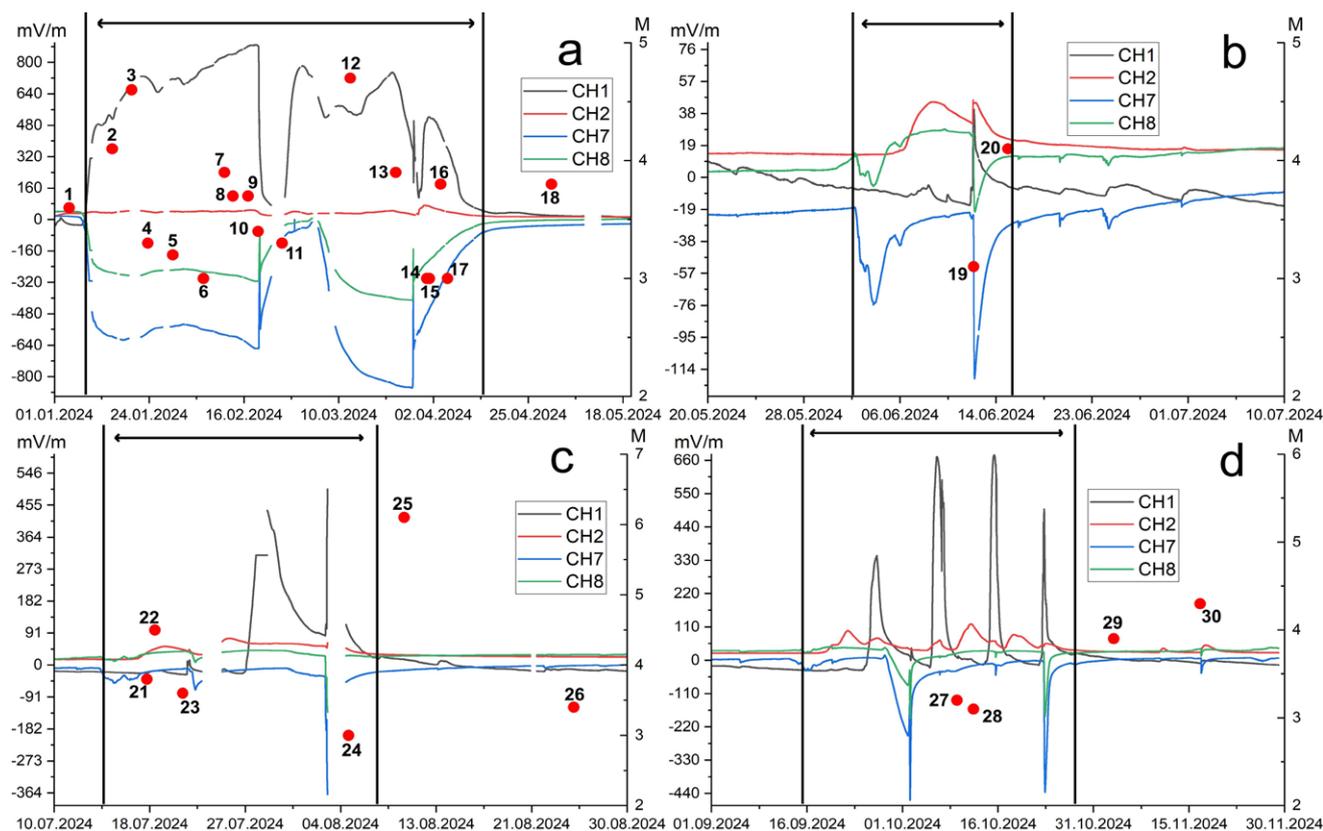


Рис. 8. Изменения напряженности электрического поля по каналам CH1, CH2, CH7 и CH8 в периоды, покрывающие аномальные интервалы А1 (а), А2 (б), А3 (с), А4 (д) (см. табл. 3). Происшедшие в этот период землетрясения показаны красными точками. Номера землетрясений соответствуют номерам в табл. 2. Интервалы с аномалиями ограничены вертикальными линиями.

Fig. 8. Variations in electric strength on channels CH1, CH2, CH7, and CH8 during periods covering anomalous intervals A1 (a), A2 (b), A3 (c), and A4 (d) (Table 3). Earthquakes that occurred during these periods are marked by red dots, with numbers corresponding Table 2. The periods with anomalies are delimited by vertical lines.

Обсуждение результатов

Факторы, влияющие на вариации ЭТП

Аномальные периоды оказались весьма продолжительными, что практически сразу же позволяет отвергнуть в качестве причины элементы хозяйственной деятельности человека. Детальный анализ возможных сигналов техногенной природы вблизи измерительного пункта уже рассматривался в [24]. Вблизи станции отсутствуют потенциальные источники, способные вызывать длительные многосуточные аномалии ЭТП в частотном диапазоне 0–10 Гц.

Одним из естественных факторов, которые могут повлиять на вариации ЭТП, являются геомагнитные бури. Изменения геомагнитного поля могут вызывать повышение плотности электротеллурических токов [29] и искажение сигналов [30].

Если сравнить графики изменения Кр-индекса, характеризующего глобальную геомагнитную активность в рассматриваемое время (см. сайт интернет-проекта «Лаборатория солнечной астрономии» Института космических исследований РАН и Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН https://xras.ru/magnetic_storms.html), и графики изменения вертикальной компоненты ЭТП (рис. 7), то можно заметить, что, например, в период с января по февраль 2024 г. магнитные бури отсутствуют, в то время как в январе начинается аномалия А1. Достаточно большая геомагнитная активность наблюдается с середины апреля по конец мая (например, 11 мая – магнитная буря с индексом G5), но в этот период каналы ЭТП находятся вблизи нулевой отметки и не показывают каких-либо изменений, похожих на аномалии в А1–А4.

Влияние метеорологических параметров – скорости ветра, атмосферного давления, абсолютной влажности и температуры воздуха – на изменения ЭТП следует рассмотреть

подробнее. На рис. 9 показаны изменения этих параметров с 01.01.2024 по 30.11.2024 г. в Южно-Сахалинске. Используются данные ближайшей метеостанции (<https://rp5.ru>), которая расположена в 16 км от станции ЭТП. Измерения на ней проводятся с периодом в 1 ч.

Для каждого метеопараметра и канала ЭТП был рассчитан коэффициент корреляции Спирмена. Для этого данные ЭТП были децимированы до 1 ч. Кроме того, ряды метеорологических данных и напряженности ЭТП были отфильтрованы скользящим средним с двухсуточным окном. Результаты расчетов приведены в табл. 4.

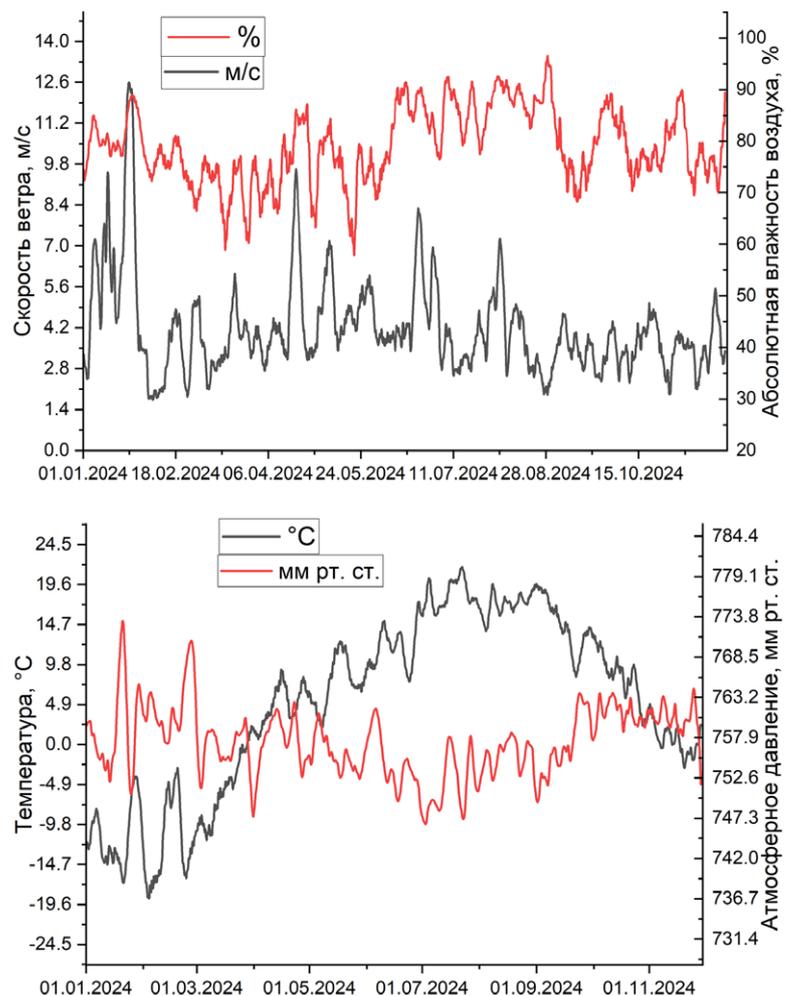


Рис. 9. Изменения во времени метеорологических параметров с 01.01.2024 по 30.11.2024 по данным гидрометеостанции Южно-Сахалинска. Вверху – скорость ветра на высоте 10–12 м и относительная влажность воздуха. Внизу – температура воздуха на высоте 2 м над поверхностью земли и атмосферное давление. Все данные отфильтрованы скользящим средним с окном в 7 сут.

Fig. 9. Variations in time in meteorological parameters from 01.01.2024 to 30.11.2024, based on data from the Yuzhno-Sakhalinsk hydrometeorological station. Top: wind speed at 10–12 m height and relative air humidity. Bottom: air temperature at 2 m above ground level and atmospheric pressure. All data are filtered by a moving average with a seven-day window

Для всех каналов ЭТП значение коэффициента корреляции между напряженностью поля E_z и давлением, влажностью, скоростью ветра весьма невелико (не более 0.24), что указывает на отсутствие взаимосвязи в изменениях этих параметров. Для корреляций между изменениями ЭТП и температурой воздуха картина сложнее. Наибольший коэффициент корреляции с температурой получился для канала СН1 ($k = -0.66$), что говорит о заметной (по шкале Чеддока) отрицательной корреляции. Для канала СН2 абсолютное значение коэффициента корреляции наименьшее. Для каналов СН7 и СН8 получена заметная положительная корреляция, но абсолютное значение коэффициента корреляции меньше, чем для канала СН1.

Наличие противофазных изменений (отрицательной корреляции) между напряженностью ЭТП и температурой проявляется при более детальном анализе временных рядов на суточных и недельных интервалах. На рис. 10 представлены изменения E_z по каналу СН1 и температуры за три периода: с 20 мая по 20 августа (рис. 10 а), с 18 по 28 августа (рис. 10 б), с 12 по 20 июля (рис. 10 с) 2024 г. На графиках за два последних периода (рис. 10 б, с) можно заметить уменьшение уровня E_z на канале СН1 при повышении температуры и, наоборот, увеличение при ее снижении, хотя амплитуды изменений в десятки раз меньше, чем размах аномалий. Эти изменения и дают отрицательную корреляцию.

Третий интервал детального анализа (рис. 10 а) включает в себя два аномальных периода: А2 и А3. Можно видеть, что суточные и недельные перепады температур происходят как в периоды аномалий ЭТП, так и в их отсутствие. Тем самым подтверждается, что резкие

изменения на каналах ЭТП не связаны с изменениями метеорологических параметров.

Обсудим механизм взаимосвязи изменений температуры и вертикального поля E_z . Слабые вариации вертикальной составляющей ЭТП при изменениях температуры воздуха, наиболее вероятно, определяются изменениями уровня подпочвенного радона под воздействием температур. Это было обосновано в работе [31], где анализировалась связь метеорологических факторов, уровня концентрации подпочвенного Rn и изменений вертикальной составляющей напряженности электрического поля в атмосфере (измерения проводились в обсерватории Паратунка ИКИР ДВО РАН, п-ов Камчатка). При повышении температуры концентрация подпочвенного радона увеличивается (и наоборот), что, в свою очередь, приводит к изменению E_z в атмосфере. По всей видимости, эту закономерность можно распространить и на изменения E_z в грунте около дневной поверхности. В другой работе [32] изучались возмущения вертикальной составляющей напряженности E_z на площадке обсерватории Михнево ИДГ РАН (Московская обл.) при прохождении мощных атмосферных фронтов. Показано, что в величине E_z наблюдаются изменения как за несколько часов, так и непосредственно во время прохождения атмосферного фронта (в том числе с грозовой активностью). Периоды этих изменений лежат в часовых и суточных диапазонах.

Сравнение изменений вертикальной и горизонтальных компонент ЭТП

Как отмечалось выше, система регистрации вертикальной компоненты ЭТП, предпо-

Таблица 4. Коэффициенты корреляции между метеорологическими параметрами и вариациями вертикальной компоненты ЭТП

Table 4. Correlation coefficients between meteorological parameters and variations in vertical ETF

Канал ЭТП	Температура, °С	Давление, мм рт. ст.	Влажность, %	Скорость ветра, м/с
СН1	-0.66	0.23	-0.19	0.05
СН2	-0.22	0.22	0.019	-0.078
СН7	0.49	-0.074	0.21	-0.1
СН8	0.58	-0.071	0.24	-0.12

ложительно, является более по-
 мехоустойчивой по сравнению
 с измерениями горизонтальных
 компонент. Для проверки этой
 гипотезы рассмотрим измене-
 ния горизонтальных компонент
 ЭТП с 01.01.2024 по 30.11.2024.
 На рис. 11 представлены вари-
 ации ЭТП на каналах N, NW,
 W (левая ось ординат). Для
 сравнения на графике также
 приведены данные канала CH2
 вертикальной компоненты ЭТП
 (рис 11, правая ось ординат).
 Для выделения низкочастотной
 составляющей записи всех трех
 горизонтальных каналов были
 обработаны фильтром низких
 частот (библиотека «Kiss FFT») с
 частотой среза 1 Гц. Далее
 данные были децимированы
 до 1 с и отфильтрованы скользя-
 щим средним с двухсуточным
 окном. На рис. 11 видно, что на
 каналах N и W зарегистриро-
 ваны синхронные, но противо-
 фазные вариации, а изменения
 ЭТП на канале NW не коррели-
 руют с записями по другим
 каналам. Обработка записей го-
 ризонтальных компонент ЭТП
 проводилась с использованием
 идентичного анализа, включа-
 ющего сопоставление вариаций
 с землетрясениями ($M \geq 3$) в
 период 01.01.2024 – 30.11.2024
 (табл. 2). Однако в данных го-
 ризонтальных каналов аномалии,
 подобные А1–А4, не выявлены.

Сравнивая временные за-
 писи изменений вертикальной
 и горизонтальных компонент
 ЭТП, можно заключить, что
 аномалии E_z имеют место вне
 зависимости от размаха вари-
 аций горизонтальных компонент
 ЭТП. Результат о приурочен-
 ности периодов с аномалия-
 ми E_z к изменениям режима

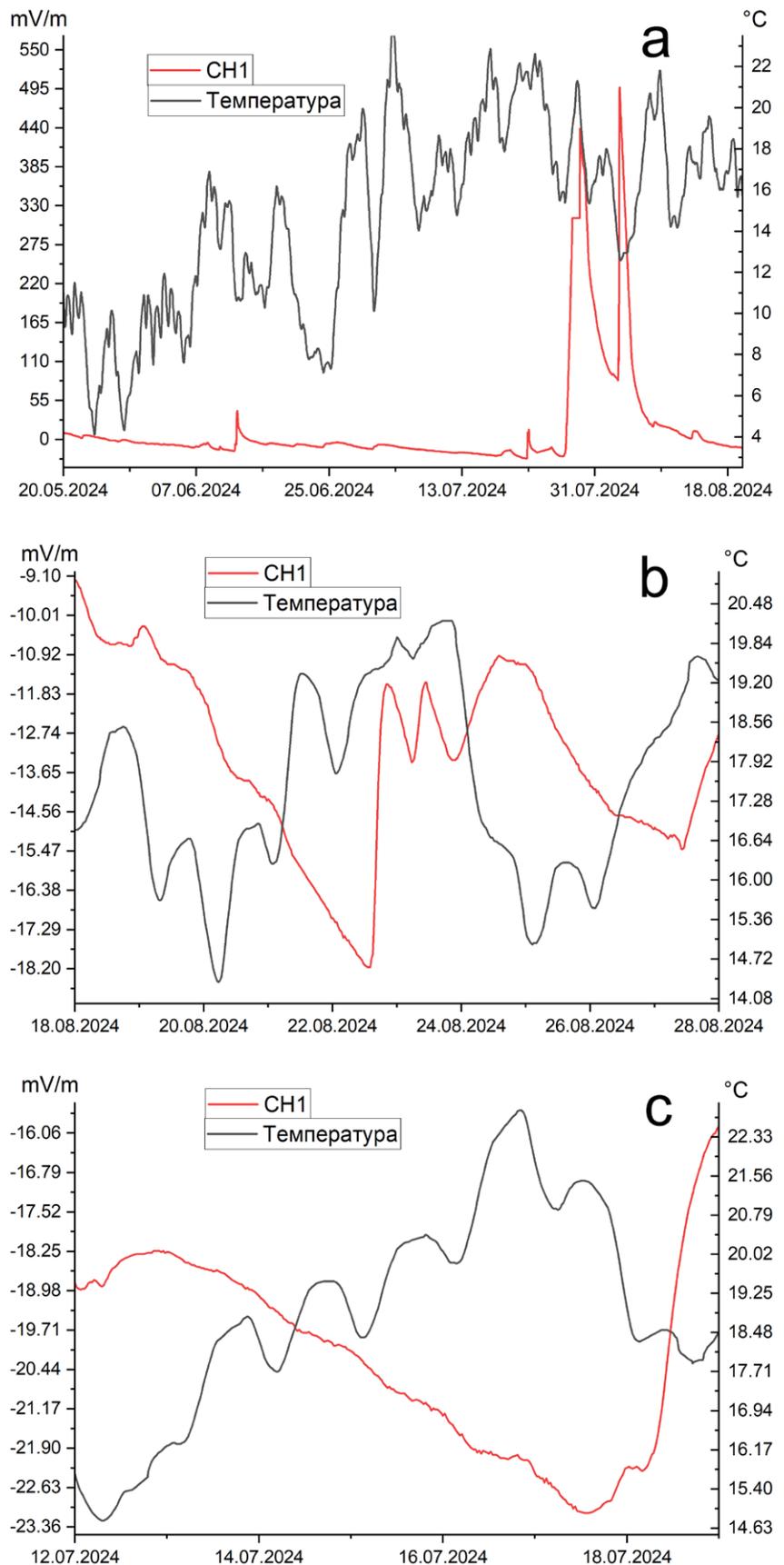


Рис. 10. Изменения напряженности поля E_z на канале CH1 и температуры воздуха.
 Fig. 10. Variations in electric strength E_z on the CH1 channel and in air temperature.

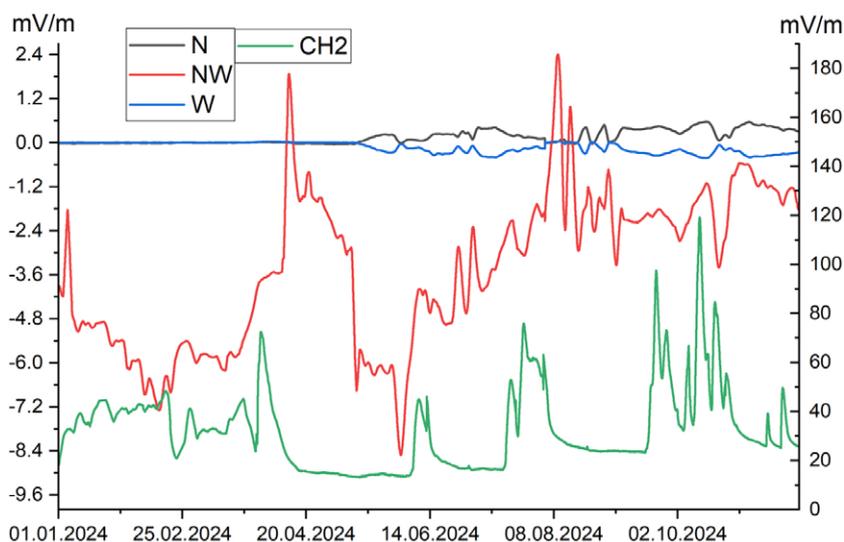


Рис. 11. Вариации горизонтальных компонент ЭТП (левая ось) и вертикальной компоненты на канале CH2 (правая ось) с 01.01.2024 по 30.11.2024.

Fig. 11. Variations of the horizontal components of the ETF (left axis) and variations of the vertical component on the CH2 channel (right axis) from 01.01.2024 to 30.11.2024.

сейсмичности согласуется с работой [22], где были обобщены результаты регистрации вертикальной компоненты ЭТП по методике Д.А. Кузнецова. Также стоит отметить определенное соответствие полученных результатов выводам работ [19–21] о вариациях E_z в приземном слое атмосферы перед сильными землетрясениями.

Статистическая оценка взаимосвязи аномалий вертикальной компоненты ЭТП с вариациями локальной сейсмичности

Для оценки того, не является ли случайным совпадение по времени периодов аномалий вертикальной компоненты ЭТП и повышенного числа сейсмических событий, воспользуемся точным критерием Фишера [33]. В качестве нулевой гипотезы примем, что выпадение 24 из 30 землетрясений на аномальные периоды является случайным. В качестве критического уровня значимости установим величину P-value (расчетный параметр теста Фишера) равной 0.05 (5 %). Параметры сопряженности для вычисления точного критерия Фишера следующие: на 184 дня аномальных периодов приходится 24 землетрясения, на 150 дней периодов отсутствия аномалий – 6 землетрясений.

Для расчетов использовались интернет-калькуляторы, при этом вычислялся двусторон-

ний точный критерий Фишера (<https://www.socscistatistics.com/tests/>). Вычисленное P-value для вероятности реализации нулевой гипотезы составляет 0.0112, что ниже критического уровня значимости 0.05, соответствующего 95%-му уровню доверия. Поэтому нулевую гипотезу следует отвергнуть и принять альтернативную гипотезу – наличие статистически значимой связи между аномалиями вертикальной компоненты ЭТП и сейсмичностью на юге Сахалина за период с 01.01.2024 по 30.11.2024.

Заключение

Проведены непрерывные измерения вертикальной составляющей электротеллурического поля на полигоне Института морской геологии и геофизики ДВО РАН в период с 01.01.2024 по 30.11.2024. В качестве первичных преобразователей использовались две системы плоских электродов, погруженных на глубину 2 м. Регистрация данных проводилась с помощью аналого-цифрового преобразователя, а сами измерения интегрированы с ранее развернутой системой измерения горизонтальных компонент ЭТП.

Данные эксперимента по малоглубинному электротеллурическому зондированию среды показали хорошее соответствие измеренной напряженности вертикального электрического поля с расчетными значениями. Тем самым проверена методика измерений напряженности E_z и доказана чувствительность измерительной системы к вариациям вертикальной компоненты ЭТП.

В 2024 г. на всех 4 каналах были зарегистрированы аномалии вертикальной компоненты E_z в виде резких всплесков амплитуды, максимальной в 35 раз, минимальной в 5 раз превышающей фоновый уровень. Самая продолжительная аномалия длилась 102 сут, самая короткая – 17. При сопоставлении с сейсмической активностью (землетрясения с $M \geq 3$ из

каталога юга Сахалина) установлено, что 24 из 30 событий совпали с периодами аномалий E_z .

Анализ с использованием точного критерия Фишера подтвердил статистически значимую связь аномалий E_z с сейсмической активностью юга Сахалина (P -value = 0.0112). Сравнение аномалий E_z с временем прохождения магнитных бурь и динамикой метеорологических параметров (давление, влажность, скорость ветра) не выявило значимых корреляций, тогда как корреляция с температурой (коэффициент Спирмена до -0.66) связана с суточными и недельными вариациями, не влияющими на многосуточные аномалии. Влияние техногенных факторов отвергнуто по параметрам рассматриваемых сигналов. Это подтверждает эндогенную природу аномалий.

Дальнейшие исследования вариаций ЭТП должны быть направлены на установление закономерностей появления аномалий вертикальной компоненты ЭТП при вариациях сейсмичности и изучение возможности использовать их в качестве предвестника сильного землетрясения.

Список литературы

1. Адушкин В.В., Спивак А.А., Кишкина С.Б., Локтев Д.Н., Соловьев С.П. **2006**. Динамические процессы в системе взаимодействующих геосфер на границе земная кора – атмосфера. *Физика Земли*, 7: 34–51. EDN: LJNPZV
2. Спивак А.А. **2009**. Актуальные проблемы взаимодействия геосфер на приповерхностных участках континентальной земной коры. В кн.: *Проблемы взаимодействующих геосфер*. М.: ГЕОС, с. 211–221.
3. Адушкин В.В., Спивак А.А. **2014**. *Физические поля в приповерхностной геофизике*. М.: ГЕОС, 360 с.
4. Зубков С.И. **2002**. *Предвестники землетрясений*. М.: ОИФЗ РАН, 140 с.
5. Довбня Б.В. **2014**. Электромагнитные предвестники землетрясений и их повторяемость. *Геофизический журнал*, 36(3): 160–165.
6. Johnston M.J.S. **2002**. 38 - Electromagnetic fields generated by earthquakes. *International Geophysics*, 81(Pt A): 621–635. [https://doi.org/10.1016/s0074-6142\(02\)80241-8](https://doi.org/10.1016/s0074-6142(02)80241-8)
7. Довбня Б.В., Пашинин А.Ю., Рахматулин Р.А. **2019**. Краткосрочные электромагнитные предвестники землетрясений. *Геофизика и тектонофизика*, 10(3): 731–740. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0438>
8. Луковенкова О.О., Малкин Е.И., Мищенко М.А., Солодчук А.А. **2021**. Аномалии перед камчатскими землетрясениями ($M_L \geq 4.75$) в сигналах электромагнитного излучения и геоакустической эмиссии в 2013 году. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 34(1): 137–149. doi:10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149
9. Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. **2009**. Исследование динамики геоэлектрической среды по данным электротеллурического поля. *Вулканология и сейсмология*, 1: 39–48. EDN: LLVIOJ
10. Гаврилов В.А., Полтавцева Е.В., Титков Н.Н., Пантелеев И.А., Бусс Ю.Ю. **2023**. Мониторинг изменений напряженно-деформированного состояния геосреды в районе Петропавловского геодинамического полигона по данным комплексных скважинных и GPS-измерений на активной фазе подготовки Жупановского землетрясения (30.01.2016; $M_w=7.2$). *Геодинамика и тектонофизика*, 14(6), 0732. doi:10.5800/GT-2023-14-6-0732
11. Li M., Lu J., Parrot M., Tan H., Chang Y., Zhang X., Wang Y. **2013**. Review of unprecedented ULF electromagnetic anomalous emissions possibly related to the Wenchuan $M_s = 8.0$ earthquake, on 12 May 2008. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 279–286. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-279-2013>
12. Cataldi D., Cataldi G., Straser V. **2024**. Electromagnetic signals that preceded the destructive earthquakes that occurred in Taiwan between April 2 and 3, **2024**. *New Concepts in Global Tectonics Journal*, 12(2): 132.
13. Семинский К.Ж., Добрынина А.А., Борняков С.А., Саньков В.А., Поспеев А.В., Рассказов С.В., Первалова Н.П., Семинский И.К., Лухнев А.В., Бобров А.А., Чебыкин Е.П., Едемский И.К., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Король С.А. **2022**. Комплексный мониторинг опасных геологических процессов в Прибайкалье: организация пилотной сети и первые результаты. *Геодинамика и тектонофизика*, 13(5), 0677. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>
14. Непейна К.С., Матюков В.Е. **2021**. Анализ вариаций геофизических параметров и сейсмических событий в пункте глубинного магнитотеллурического зондирования. *Интерэкспо Гео-Сибирь*, 2(2): 174–180. doi:10.33764/2618-981X-2021-2-2-174-180; EDN: IGUJHT
15. Vargas C.A., Gomez J.S., Gomez J.J., Solano J.M., Caneva A. **2023**. Space-time variations of the apparent resistivity associated with seismic activity by using 1D-Magnetotelluric (MT) data in the central part of Colombia (South America). *Applied Sciences*, 13, 1737. <https://doi.org/10.3390/app13031737>
16. Piriyev R.H. **2021**. Effectiveness of electromagnetic monitoring in studying earthquakes. *Geophysical Jour-*

- nal*, 43(2): 166–177. doi:10.24028/gzh.v43i2.230195; EDN: QARSAE
17. Fan Y., Hu W., Han B., Tang J., Wang X., Ye Q. **2023**. Characteristic identification of seismogenic electromagnetic anomalies based on station electromagnetic impedance. *Frontiers of Earth Science*, 11, 1110056. doi:10.3389/feart.2023.1110056
 18. Купцов А.В., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А., Руленко О.П., Шевцов Б.М., Щербина А.О. **2007**. О связи высокочастотной акустической эмиссии приповерхностных пород с электрическим полем в приземном слое атмосферы. *Вулканология и сейсмология*, 5: 71–76. EDN: LKSUEL
 19. Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Мищенко М.А., Шевцов Б.М. **2010**. Связь высокочастотной геоакустической эмиссии с электрическим полем в атмосфере при сейсмотектоническом процессе. *Доклады АН*, 431(2): 242–245. EDN: MXKCTN
 20. Марапулец Ю.В., Руленко О.П., Ларионов И.А., Мищенко М.А. **2011**. Одновременный отклик высокочастотной геоакустической эмиссии и атмосферного электрического поля на деформирование приповерхностных осадочных пород. *Доклады АН*, 440(3): 403–406. EDN: PECMAV
 21. Дружин Г.И., Марапулец Ю.В., Чернева Н.В., Исаев А.Ю., Солодчук А.А. **2017**. Акустические и электромагнитные излучения перед землетрясением на Камчатке. *Доклады АН*, 472(5): 584–589. EDN: BIRGXD
 22. Бобровский В.С. **2016**. Распределенная сеть электрических измерений в приповерхностных грунтах и некоторые полученные результаты. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*, 7-1: 129–138. EDN: WXFUGX
 23. Руленко О.П., Марапулец Ю.В., Мищенко М.А. **2014**. Анализ проявления связи между высокочастотной геоакустической эмиссией и электрическим полем в атмосфере у поверхности земли. *Вулканология и сейсмология*, 3: 53–64. doi:10.7868/S0203030614030055; EDN: SFAJLB
 24. Закупин А.С., Дудченко И.П., Богомолов Л.М., Гуляков С.А., Казаков А.И., Стовбун Н.С. **2024**. Кратковременные вариации электротеллурического поля вблизи очага землетрясения на о. Сахалин. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 46(1): 134–164. https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164; EDN: FIGWJO
 25. Гуляков С.А., Стовбун Н.С., Костылева Н.В. и др. **2025**. Оценка возможного воздействия экспериментального источника электроимпульсов на сейсмический и сейсмоакустический шум в зоне Центрально-Сахалинского разлома. *Геодинамика и тектонофизика*, 16(2), 818. https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-2-0818; EDN: NBEXOF
 26. Parasnis D.S. **1986**. *Principles of applied geophysics*. 4th ed. London: Chapman and Hall, 402 p. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4113-7
 27. Могилатов В.С., Злобинский А.В. **2014**. Свойства кругового электрического диполя как источника поля для электроразведки. *Геология и геофизика*, 55(11): 1692–1700. EDN: TAEZOR
 28. Рождественский В.С., Сапрыгин С.М. **1999**. Активные разломы и сейсмичность на Южном Сахалине. *Тихоокеанская геология*, 6: 59–70.
 29. Новиков В.А., Сорокин В.М., Яценко А.К., Мушкарев Г.Ю. **2023**. Физическая модель и численные оценки теллурических токов, генерируемых рентгеновским излучением солнечной вспышки. *Динамические процессы в геосферах*, 1(15): 23–44. https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_23; EDN: MEMWRN
 30. Chen H., Mizunaga H., Tanaka T. **2022**. Influence of geomagnetic storms on the quality of magnetotelluric impedance. *Earth Planets Space*, 74, 111. https://doi.org/10.1186/s40623-022-01659-6
 31. Чернева Н.В., Фирстов П.П. **2013**. Влияние метеорологических факторов на электрические параметры нижней атмосферы. *Метеорология и гидрология*, 3: 56–65.
 32. Спивак А.А., Овчинников В.М., Рыбнов Ю.С. и др. **2022**. Сейсмические, атмосферно-волновые, электрические и магнитные эффекты мощных атмосферных фронтов. *Физика Земли*, 4: 56–70. doi:10.31857/S0002333722040111; EDN: DKGUFT
 33. Nelson M. **2020**. Contingency tables, Chi-Squared test, and Fisher's exact test. In: *Statistics in nutrition and dietetics*. Chapter 8. https://doi.org/10.1002/9781119541509.ch8

References

1. Adushkin V.V., Spivak A.A., Kishkina S.B., Loktev D.N., Solov'ev S.P. **2006**. Dynamic processes in the system of interacting geospheres at the Earth's crust-atmosphere boundary. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 42(7): 567–584. doi:10.1134/S1069351306070044
2. Spivak A.A. **2009**. [Topical problems of interaction between the geospheres at the subsurface segments of the continental crust]. In: *Problems of interacting geospheres*. Moscow: GEOS, p. 211–221. (In Russ.).
3. Adushkin V.V., Spivak A.A. **2014**. [*Physical fields in near-surface geophysics*]. Moscow: GEOS, 360 p. (In Russ.). EDN WHELXR
4. Zubkov S.I. **2002**. [*Earthquake precursors*]. Moscow: OIFZ RAN, 140 p. (In Russ.).

5. Dovbnya B.V. **2014**. [Electromagnetic precursors of earthquakes and their recurrence]. *Geophysical Journal*, 36(3): 160–165. (In Russ.).
6. Johnston M.J.S. **2002**. 38 - Electromagnetic fields generated by earthquakes. *International Geophysics*, 81(Pt A): 621–635. [https://doi.org/10.1016/s0074-6142\(02\)80241-8](https://doi.org/10.1016/s0074-6142(02)80241-8)
7. Dovbnya B.V., Pashinin A.Yu., Rakhmatulin R.A., **2019**. Short-term electromagnetic precursors of earthquakes. *Geodynamics & Tectonophysics*, 10(3): 731–740. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-3-0438>
8. Lukovenkova O.O., Malkin E.I., Mishchenko M.A., Solodchuk A.A. **2021**. Anomalies in electromagnetic and geoacoustic emission signals before Kamchatka earthquakes ($M_L \geq 4.75$) in 2013. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. Nauki*, 34(1): 137–149. (In Russ.). <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2021-34-1-137-149>
9. Moroz Yu.F., Moroz T.A. **2009**. A study in the dynamics of the geoelectrical medium from electrotelluric field data. *Journal of Volcanology and Seismology*, 3(1): 34–43. doi:10.1134/S0742046309010047
10. Gavrilov V.A., Poltavtseva E.V., Titkov N.N., Pantelev I.A., Buss Yu.Yu. **2023**. Monitoring of changes in the stress-strain state of geoenvironment at the Petropavlovsk Geodynamic Testing Site based on the multi-instrumental borehole and GPS data during the active phase of preparing the Zhupanovsky earthquake (January 30, 2016, M_w 7.2). *Geodynamics & Tectonophysics*, 14(6), 0732. (In Russ.). doi:10.5800/GT-2023-14-6-0732
11. Li M., Lu J., Parrot M., Tan H., Chang Y., Zhang X., Wang Y. **2013**. Review of unprecedented ULF electromagnetic anomalous emissions possibly related to the Wenchuan $M_s = 8.0$ earthquake, on 12 May 2008. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13: 279–286. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-279-2013>
12. Cataldi D., Cataldi G., Straser V. **2024**. Electromagnetic signals that preceded the destructive earthquakes that occurred in Taiwan between April 2 and 3, 2024. *New Concepts in Global Tectonics Journal*, 12(2): 132.
13. Seminsky K.Zh., Dobrynina A.A., Bornyakov S.A., Sankov V.A., Pospiev A.V., Rasskazov S.V., Perevalova N.P., Seminskiy I.K., Lukhnev A.V., Bobrov A.A., Chebykin E.P., Edemskiy I.K., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Korol S.A. **2022**. Integrated monitoring of hazardous geological processes in Pribaikalye: pilot network and first results. *Geodynamics & Tectonophysics*, 13(5), 0677. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-5-0677>
14. Nepeina K.S., Matiukov V.E. **2021**. Analysis of geophysical parameters variations and seismic events at the point of deep magnetotelluric sounding. *Interexpo GEO-Siberia*, 2(2): 174–180. (In Russ.). doi:10.33764/2618-981X-2021-2-2-174-180
15. Vargas C.A., Gomez J.S., Gomez J.J., Solano J.M., Caneva A. **2023**. Space-time variations of the apparent resistivity associated with seismic activity by using 1D-Magnetotelluric (MT) data in the central part of Colombia (South America). *Applied Sciences*, 13, 1737. <https://doi.org/10.3390/app13031737>
16. Piriyeve R.H. **2021**. Effectiveness of electromagnetic monitoring in studying earthquakes. *Geophysical Journal*, 43(2): 166–177. doi:10.24028/gzh.v43i2.230195
17. Fan Y., Hu W., Han B., Tang J., Wang X., Ye Q. **2023**. Characteristic identification of seismogenic electromagnetic anomalies based on station electromagnetic impedance. *Frontiers of Earth Science*, 11, 1110056. doi:10.3389/feart.2023.1110056
18. Kuptsov A.V., Marapulets Yu.V., Mishchenko M.A., Shevtsov B.M., Shcherbina A.O., Rulenko O.P. **2007**. On the relation between high frequency acoustic emissions in near-surface rocks and the electric field in the near-ground atmosphere. *Journal of Volcanology and Seismology*, 1, 349–353. <https://doi.org/10.1134/S0742046307050077>
19. Marapulets Yu.V., Rulenko O.P., Mishchenko M.A., Shevtsov B.M. **2010**. Relationship of high-frequency geoacoustic emission and electric field in the atmosphere in seismotectonic process. *Doklady Earth Sciences*, 431: 361–364. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10030207>
20. Marapulets Y.V., Rulenko O.P., Larionov I.A., Mishchenko M.A. **2011**. Simultaneous response of high-frequency geoacoustic emission and atmospheric electric field to strain of near-surface sedimentary rocks. *Doklady Earth Sciences*, 440: 1349–1352. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11090285>
21. Druzhin G.I., Marapulets Yu.V., Cherneva N.V., Isaev A.A., Solodchuk A.A. **2017**. Acoustic and electromagnetic emissions preceding the earthquake in Kamchatka. *Doklady Earth Sciences*, 472: 215–219. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17020118>. –
22. Bobrovsky V.S. **2016**. Distributed network of electrical measurements in the near-surface soils and some obtained results. *Izvestiya Tula State University. Technical Sciences*, 7-1: 129–138.
23. Rulenko O.P., Marapulets Yu.V., Mishchenko M.A. **2014**. An analysis of the relationships between high-frequency geoacoustic emissions and the electrical field in the atmosphere near the ground surface. *Journal of Volcanology and Seismology*, 8: 183–193. <https://doi.org/10.1134/S0742046314030051>
24. Zakupin A.S., Dudchenko I.P., Bogomolov L.M. et al. **2024**. Short temporal variations of electrotelluric field in the vicinity of the earthquake source-site in the Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNC. Fiz.-mat. nauki*, 46(1): 134–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164>

25. Gulyakov S.A., Stovbun N.S., Kostyleva N.V., Bogomolov L.M., Kostylev D.V., Dudchenko I.P., Kameney 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. (In Russ.). <https://doi.org/10.5800/GT-2025-16-2-0818>
26. Parasnis D.S. **1986**. *Principles of applied geophysics*. 4th ed. London: Chapman and Hall, 402 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-4113-7>
27. Mogilatov V.S., Zlobinsky A.V. **2014**. A circular electric dipole: A transmitter for TEM surveys. *Russian Geology and Geophysics*, 55(11): 1340–1346. (In Russ.). <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.10.009>
28. Rozhdestvensky V.S., Saprygin S.M. **1999**. Active faults and seismicity in the South Sakhalin. *Russian Journal of Pacific Geology*, 6: 59–70. (In Russ.).
29. Novikov V.A., Sorokin V.M., Yashchenko 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*, 1(15): 23–44. (In Russ.). https://doi.org/10.26006/29490995_2023_15_1_23
30. Chen H., Mizunaga H., Tanaka T. **2022**. Influence of geomagnetic storms on the quality of magnetotelluric impedance. *Earth Planets Space*, 74, 111. <https://doi.org/10.1186/s40623-022-01659-6>
31. Cherneva N.V., Firstov P.P. **2013**. Weather factor effects on electric parameters in the lower atmosphere. *Meteorology and Hydrology*, 38: 177–184. <https://doi.org/10.3103/s1068373913030060>
32. Spivak A.A., Ovtchinnikov V.M., Rybnov Yu.S., Riabova S.A., Kharlamov V.A. **2022**. Seismic, atmospheric-wave, electrical, and magnetic effects of powerful atmospheric. *Izv., Physics of the Solid Earth*, 58(4): 493–506. doi:10.31857/S0002333722040111
33. Nelson M. **2020**. Contingency tables, Chi-Squared test, and Fisher's exact test. In: *Statistics in nutrition and dietetics*. Chapter 8. <https://doi.org/10.1002/9781119541509.ch8>

Об авторах

Сотрудники Института морской геологии и геофизики ДВО РАН, Южно-Сахалинск, Россия:

Стовбун Николай Сергеевич (<https://orcid.org/0009-0004-1927-798X>), научный сотрудник лаборатории островных и прибрежных электроэнергетических систем, n1kolay19971997@yandex.ru

Закупин Александр Сергеевич (<https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>), кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмологии, a.zakupin@imgg.ru

Богомолов Леонид Михайлович (<https://orcid.org/0000-0002-9124-9797>), доктор физико-математических наук, директор, bleom@mail.ru

Дудченко Илья Павлович (<https://orcid.org/0000-0002-4967-7405>), кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории островных и прибрежных электроэнергетических систем, ilpadu@mail.ru

Гуляков Сергей Александрович (<https://orcid.org/0009-0001-7924-6972>), научный сотрудник лаборатории островных и прибрежных электроэнергетических систем, gulyakov_97@mail.ru

Сахалинский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН», Южно-Сахалинск, Россия:

Костылев Дмитрий Викторович (<https://orcid.org/0000-0002-8150-9575>), кандидат технических наук, директор, d.kostylev@imgg.ru

About the Authors

Employees of the Institute of Marine Geology and Geophysics of the Far Eastern Branch of RAS, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia:

Stovbun, Nikolai S. (<https://orcid.org/0009-0004-1927-798X>), Researcher, Laboratory of island and coastal electric power systems, n1kolay19971997@yandex.ru

Zakupin, Alexander S. (<https://orcid.org/0000-0003-0593-6417>), Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Seismology laboratory, a.zakupin@imgg.ru

Bogomolov, Leonid M. (<https://orcid.org/0000-0002-9124-9797>), Doctor of Physics and Mathematics, Director, bleom@mail.ru

Dudchenko, Ilya P. (<https://orcid.org/0000-0002-4967-7405>), Cand. of Sci. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of island and coastal electric power systems, ilpadu@mail.ru

Gulyakov, Sergey A. (<https://orcid.org/0009-0001-7924-6972>), Researcher, Laboratory of island and coastal electric power systems, gulyakov_97@mail.ru

Sakhalin Branch of the Federal Research Center “Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences”, Yuzhno-Sakhalinsk, Russia:

Kostylev, Dmitry V. (<https://orcid.org/0000-0002-8150-9575>), Cand. of Sci. (Engineering), Director, d.kostylev@imgg.ru

Поступила 12.02.2025

Принята к публикации 19.05.2025

Received 12 February 2025

Accepted 19 May 2025