

© Авторы 2024 г. Открытый доступ.
Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)



© The Authors 2024. Open access.
Content is available under Creative Commons Attribution
License 4.0 International (CC BY 4.0)

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ

УДК 550.343(571.642)

<https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.091-103>
<https://www.elibrary.ru/idofpc>

Проявления геомагнитной активности (солнечные вспышки и магнитные бури) в изменении электротеллурических потенциалов по данным измерений на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне

A. S. Zakupin[@], N. S. Stovbun, S. A. Gulyakov, A. I. Kazakov, I. P. Dudchenko

^{@E-mail:} a.zakupin@imgg.ru

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

Резюме. Представлены результаты анализа изменений электротеллурических потенциалов (ЭТП) на Сахалине во время вспышечных солнечных событий высоких классов и магнитных бурь с высоким индексом. Изучены данные в период с 20 июля по 12 октября 2023 гг. Показано отсутствие характерных изменений ЭТП (интегрального усиления или ослабления шума в низкочастотной области) в зависимости от наличия или отсутствия вспышечного события. В то же время в некоторых случаях обнаружены совпадения сильнейших вспышек с появлением сигналов типа GUV (Geysler type ULF Variation). В течение почти трех месяцев наблюдалось пять квазипериодических серий GUV, четыре из которых совпадают полностью или частично со временами вспышек и магнитных бурь. Отметим, что ранее в литературе появление этих сигналов не соотносилось с каким-либо физическим процессом. В то же время выявление подобных закономерностей является неотъемлемой частью большой работы по выделению в ЭТП прогностических признаков подготовки землетрясений.

Ключевые слова: серия электрических сигналов, вспышка на солнце, теллурические потенциалы, магнитная буря, GUV

The manifestations of geomagnetic activity (solar flares and magnetic storms) in the change of electrotelluric potentials according to measurements at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site

Aleksander S. Zakupin[@], Nikolai S. Stovbun, Sergei A. Gulyakov,

Artem I. Kazakov, Ilya P. Dudchenko

^{@E-mail:} a.zakupin@imgg.ru

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

Abstract. The results of the analysis of changes in electrotelluric potentials (ETP) during the observation of intense solar flare events and intense magnetic storms on Sakhalin are presented. The data were studied in the period from July 20 to October 12, 2023. The absence of characteristic changes in the ETP (integral amplification or attenuation of noise in the low-frequency region) depending on the presence or absence of a solar flare event is shown. At the same time, in some cases, the strongest flashes were found to coincide with the appearance of signals of the GUV type (Geysler type ULF Variation). For almost three months of observations, five cases of quasi-periodic GUV series have been identified, four of which coincide completely or partially with the times of solar flares and magnetic storms. It should be noted that earlier in the

The full text of this article in English can be found on the website of the «Geosystems of Transition Zones» journal:
<http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2024-2-2.pdf>

literature, the appearance of these signals was not correlated with any physical process. At the same time, the identification of such patterns is an integral part of extensive work on identifying predictive signs of earthquake preparation in the ETP.

Keywords: a series of electrical signals, solar flare, telluric potentials, magnetic storm, GUV

Для цитирования: Закупин А.С., Стовбун Н.С., Гуляков С.А., Казаков А.И., Дудченко И.П. Проявления геомагнитной активности (солнечные вспышки и магнитные бури) в изменении электротеллурических потенциалов по данным измерений на Южно-Сахалинском геофизическом полигоне. *Геосистемы переходных зон*, 2024, т. 8, № 2, с. 91–103. <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.091-103>; <https://www.elibrary.ru/idofpc>

For citation: Zakupin A.S., Stovbun N.S., Gulyakov S.A., Kazakov A.I., Dudchenko I.P. The manifestations of geomagnetic activity (solar flares and magnetic storms) in the change of electrotelluric potentials according to measurements at the Yuzhno-Sakhalinsk geophysical test site. *Geosistemy perehodnykh zon = Geosystems of Transition Zones*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 91-103. (In Russ. & in Engl.). URL: <http://journal.imgg.ru/web/full/f-e2024-2-2.pdf>; <https://doi.org/10.30730/gtr.2024.8.2.091-103>

Благодарности

Авторы благодарят уважаемых рецензентов за внимание к данной работе и конструктивные замечания.

Acknowledgements

The authors thank the respected Reviewers for their attention to this paper and constructive comments.

Введение

Механизмы взаимодействия между Землей и окружающим ее макрокосмосом, между геосферами и внутри каждой из них определяются разнообразием геофизических полей и их природой. Электрическое поле Земли представляет особый интерес для исследований, поскольку электрические эффекты не только оказывают значительное влияние на ход природных явлений и процессов, но также значимы для современного человека при организации производственно-технологических циклов [1]. В прикладной геофизике особое внимание уделяется электрическим полям регионального масштаба, поскольку они охватывают большие объемы прилегающих к поверхности участков земной коры и тропосферы, где и формируются условия для жизнедеятельности человека. Региональные поля электротеллурических токов являются сложными токовыми системами, образующимися под влиянием внешних и внутренних факторов. Существенное влияние на изменение составляющих поля электротеллурических токов оказывает корпускулярная радиация Солнца. В результате взаимодействия сверхзвукового солнечного ветра с магнитосферой и ионосферой возникают колебания электромагнитных полей от 0,0001 Гц до первых сотен герц.

Для инструментальных наблюдений за нестационарными переменными региональными электрическими полями земной коры используют метод теллурических токов и его модификации, теоретические основы которого

были заложены еще в 1930-х годах под руководством К. Шлюмберже [2]. В обобщенном виде установка для регистрации поля теллурических токов состоит из регистрирующей аппаратуры и двух пар электродов-заземлителей, располагаемых перпендикулярно. Несмотря на относительную простоту, сеть электротеллурических станций на Земле очень редкая [3].

В Сахалинской области постоянно действующих пунктов регистрации электротеллурического поля не было. В 2023 г. первый такой пункт начал работу в Институте морской геологии и геофизики ДВО РАН (ИМГиГ ДВО РАН). К июню в институте был создан измерительный модуль, на базе которого развернут автономный пункт регистрации поля теллурических токов [4]. Почти за год непрерывной работы были накоплены значительные объемы данных, включающие в себя сигналы от разных источников, в том числе вызванные антропогенными факторами, поскольку наблюдения ведутся на территории института, расположенного в черте города Южно-Сахалинск. В преобладающем числе публикаций и пособий рекомендуют пункт регистрации располагать в районах с низким промышленным шумом [1, 5], но в эпоху стремительно развивающейся индустриализации-урбанизации без государственной поддержки реализовать это не просто. Однако известны случаи, когда подобного рода исследования успешно проводились и в городских условиях. Например, открытая в 1958 г. электротеллурическая станция расположена в г. Гурбаново на территории геомагнитной об-

серватории [6]. Обработку регистрируемых явлений в [6] проводили статистическим путем, классифицируя их по группам: 1) особые явления, 2) короткопериодические колебания (с периодом более 100 с), 3) бури, 4) возмущения. На основе обработанных результатов составляли бюллетени, в которых при помощи типовых обозначений указывали тип явления, качество, время начала и конца, максимальную амплитуду, средний (максимальный, минимальный) период [6]. Подобный подход актуален и сегодня, поскольку накопленный банк событий можно использовать совместно с алгоритмами искусственного интеллекта для автоматизации процесса обработки и поиска корреляций, например, с сейсмическими волнами. В работе [7] на основании результатов комплексного анализа, численного моделирования, лабораторных и полевых испытаний с применением существующих мировых технологических методик авторы предлагают решения для реализации электрического мониторинга при наблюдении за инженерно-геологическими процессами в условиях городских и промышленных районов.

С учетом изложенного представляет интерес анализ данных теллурического мониторинга пункта наблюдений ИМГиГ ДВО РАН с целью поиска возможных корреляций с магнитными бурями от вспышечных событий на Солнце. Отметим, что эти события не всегда совпадают и определяющими следует считать геомагнитные индексы, но обсерватории есть далеко не везде, а потому стоит включать в рассмотрение наряду с планетарным индексом Кр и моменты вспышек высоких классов. Подобного рода анализ недавно проводился авторами работы [8] для г. Якутск в период большой магнитной бури 07–09.09.2017 г. Обнаружен достаточно высокий коэффициент корреляции 0.5–0.9. Такой же высокий показатель корреляции был получен с использованием методики, описанной в работе [9], при исследовании влияния геомагнитно-индуцированных токов на электрические сети района Камчатки [10].

В отличие от перечисленных работ, при которых в составе измерительной установки были магнитометры, на нашем пункте возможны только электрические диполи. Несмотря на это, считаем целесообразным такое исследо-

вание выполнить. Одним из мотивов является применение новых подходов в регистрации и обработке данных. Так, в нашей недавней работе [4] было показано, что существенное увеличение частоты дискретизации при измерении электротеллурического потенциала (ЭТП) позволяет обнаружить сигналы, которые ранее было просто невозможно зарегистрировать. Более того, благодаря новым решениям в электротеллурических наблюдениях были установлены, предположительно, корреляции между квазипериодическими сериями таких сигналов и землетрясением в ближней зоне [4]. Это сделало возможным по-иному взглянуть на получаемые данные и обратить внимание на другие взаимосвязанные процессы, что в комплексе может внести вклад в решение задачи прогноза землетрясений. Опираясь, в том числе, и на глубокий обзор состояния исследований в геоэлектрике, опубликованный совсем недавно В.А. Пилипенко [12], можем констатировать актуальность нашей работы, несмотря на небольшие, с точки зрения геофизиков, периоды наблюдений.

Данные

Данные электротеллурических измерений

Электротеллурические измерения на полигоне ИМГиГ ДВО РАН – это измерения на новом уровне, с учетом достижений современной науки в области приборостроения и программ обработки длинных временных рядов. До этого исследование ЭТП проводилось в режиме полевых измерений и имело ряд практических недостатков. О новой концепции, аппаратурной и программной компонентах комплекса ЭТП-измерений, а также первых результатах подробно написано в работе [4]. Отметим ключевые аспекты аппаратурных решений – это быстродействующие аналого-цифровые преобразователи, минимальные аппаратурные шумы и высокая частота дискретизации. В обработке, естественно, применяются математические пакеты (на данный момент зарубежные), которые могут производить построение и быстрое преобразование Фурье (FFT, Fast Fourier Transform), фильтрацию временных рядов в десятки миллионов отсчетов. Данные измерений ЭТП представлены отдельными пакетами текстового

формата, где размещены измерения по трем каналам (три диполя NS, WE, NWSE), произведенные с частотой дискретизации 300 Гц. Исходя из максимально возможного количества отсчетов для обработки в пакете Origin Pro 92 млн, один пакет может вмещать записи измерений нескольких суток. База данных ЭТП-измерений включает непрерывные записи с 20.07.2023 г. по настоящее время. В этой работе для анализа мы выбрали данные по дате последней записи в каталоге вспышек (см. ниже), т.е. по 12.10.2023 г. Данные предварительно отфильтровали полосовым фильтром 0.01–1 Гц. Отметим, что этот шаг значительно повышает качество анализа, ведь в высокочастотной области довольно много помех, а уровень шума для широкополосного сигнала в 4 раза превышает шум фильтрованного сигнала в полосе от 0.01 до 1 Гц.

Данные по вспышечным событиям на Солнце

Для анализа был использован накопительный каталог солнечных вспышечных событий рентгеновского класса M1–X > 17.5 XXV цик-

ла солнечной активности (I.2020 – VI.2030, <https://doi.org/10.2205/ESDB-SAD-FE-03>), который размещен в открытом доступе (автор В.Н. Ишков, Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН; Геофизический центр РАН). Каталог скачан в версии 5 (октябрь 2023 г.), и, соответственно, последние данные в нем датируются 12 октября 2023 г. Для нашего исследования были использованы записи с 20.07.2023 г., т.е. с момента начала регистрации ЭТП на полигоне ИМГиГ ДВО РАН. В данной работе мы сфокусировали наше внимание на вспышках большой мощности, которые способны вызывать заметные ионосферные возмущения. В табл. 1 показаны те немногие события класса M с индексом 5 и более, которые были зафиксированы с 20 июля по 12 октября 2023 г. Время приведено в формате UTC для удобства сопоставления (для получения местного, сахалинского времени необходимо добавить 11 ч).

Как видно из табл. 1, выделяются три периода активности, причем 5 из 6 событий приходится на два из них – с 5 по 7 августа и с 20

Таблица 1. Солнечные вспышечные события рентгеновского класса от M5 с 20 июля по 12 октября 2023 г.
Table 1. X-ray-class solar flare events from M5 from July 20 to October 12, 2023

| Date, dd.mm.yyyy | Time, h:m | | | Class, X-ray/opt | $L (J \cdot m^{-2})$ |
|---------------------|-----------|-------|-------|---------------------|----------------------|
| | t_0 | t_m | t_e | | |
| 05.08.2023 | 21:45 | 22:21 | 22:44 | X1.6 | 0.3 |
| 06.08.2023 | 18:20 | 18:40 | 19:11 | M5.5/SN | 0.06 |
| 07.08.2023 | 20:30 | 20:46 | 21:18 | X1.5 | 0.28 |
| 03.09.2023 | 08:09 | 08:36 | 08:56 | M6.0 | 0.064 |
| 20.09.2023 | 14:11 | 14:19 | 14:25 | M8.2 | 0.036 |
| 21.09.2023 | 12:42 | 12:54 | 13:02 | M8.7 | 0.001 |

Примечания. Date (dd.mm.yyyy) – дата реализации солнечного вспышечного события. Time (UTC): t_0 , t_m , t_e – время начала, максимума, конца полного вспышечного события соответственно; вспышки в H α (спектральная линия серии Бальмера атома водорода) и всплеска в диапазоне мягкого рентгена (1–8 Å = 12.5–1 кэВ). t_0 и t_e определяются, соответственно, по более раннему началу и по более позднему концу в этих диапазонах, t_m – по всплеску в рентгене. Если наблюдается только рентгеновский всплеск, то конец события определяется по точке спада на половину интенсивности от I_{max} до фона. Class: X-ray/opt – рентгеновский класс и оптический балл вспышечного события. $L (J \cdot m^{-2})$ – интегральный поток в стандартном рентгеновском диапазоне от начала всплеска через максимум до 1/2 максимальной интенсивности.

Notes. Date (dd.mm.yyyy) of implementation of the solar flare event. Time (UTC): t_0 , t_m , and t_e indicate the time of the beginning, maximum, and end of the full flare event, respectively; a flare in H α (spectral line of the Balmer series of the hydrogen atom) and a burst in the soft X-ray range (1–8 Å = 12.5–1 keV). Accordingly, t_0 and t_e are determined by the earlier start and later end in these ranges, t_m – by the burst in X-rays. If only an X-ray burst is observed, then the end of the event is determined by the point where the intensity decreases by half from I_{max} to the background. Class: X-ray/opt – is X-ray class and optical score of the flare event. $L (J \cdot m^{-2})$, – integral flux in the standard X-ray range from the beginning of the burst through the maximum to 1/2 of the maximum intensity.

по 21 сентября. Одно событие, причем самое слабое (M6), приходится на 3 сентября. Наиболее выделяется первый период с двумя вспышками X-класса. Еще можно отметить невысокую интенсивность потока от событий 20 и 21 сентября при их достаточно высоком классе.

Данные по магнитным бурям

В качестве источника данных был использован интернет-проект «Лаборатория солнечной астрономии» Института космических исследований РАН и Института солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН (https://xras.ru/magnetic_storms.html). Лаборатория в открытом доступе предоставляет информацию о геомагнитной активности Земли и солнечных явлениях. Данные представлены в гистограммах, содержащих информацию о динамике изменения планетарного Kp-индекса. На основе данного индекса расчи-

тана шкала G интенсивности геомагнитного шторма. Из архива были выбраны и сведены в таблицу данные о магнитных бурях индекса G1 и выше в период с 20.07 по 12.10.2023 г. За данный период наблюдалось 9 магнитных бурь, 7 из которых уровня G1, 2 – уровня G2 (табл. 2). В таблицу внесен период максимума активности каждой бури и соответствующее ему значение Kp-индекса. На рис. 1 мы демонстрируем 6 периодов, в которые попали 9 магнитных бурь из табл. 2.

Корреляции между солнечными вспышками и магнитными бурями – очень сложная тема, это задача отдельных исследований специалистов. При простом сопоставлении солнечных вспышек и магнитных бурь четкая связь не просматривается. Даже первые записи из табл. 1 и 2 вызывают вопросы. В данной работе мы этих вопросов не касаемся.

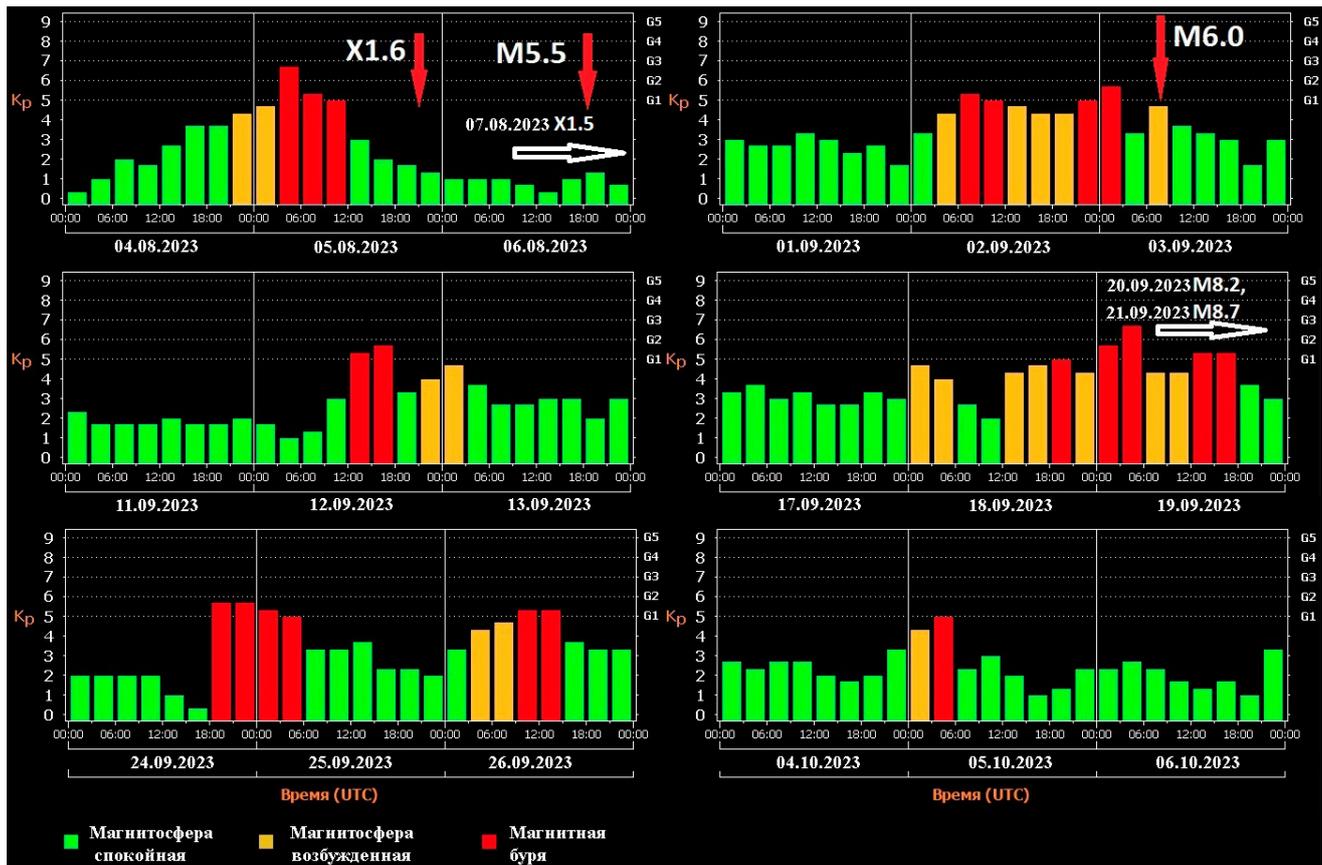


Рис. 1. Периоды с магнитными бурями, у которых G-индекс больше или равен 1, с 20.07 по 12.10.2023. Стрелками показаны моменты вспышек из табл. 1. Интенсивность магнитной бури: G1 – слабая, G2 – средняя, G3 – сильная, G4 – очень сильная, G5 – экстремально сильная.

Fig. 1. Periods with magnetic storms for which the G-index is greater than or equal to 1 from July 20 to October 12, 2023. The arrows show the flash points from Table 1. The intensity of the magnetic storm: G1, weak; G2, medium; G3, strong; G4, very strong; G5, extremely strong.

Таблица 2. Магнитные бури с 20.07 по 12.10.2023
Table 2. Magnetic storms from July 20 to October 12, 2023

| № | Date, dd.mm.yyyy | Time, h:m | | | G-index | Kp-index |
|---|---------------------|-----------|-------------|-------|---------|----------|
| | | Start | Maximum | End | | |
| 1 | 05.08.2023 | 01:00 | 01:00–07:00 | 13:00 | G2 | 6.67 |
| 2 | 02.09.2023 | 04:00 | 04:00–10:00 | 13:00 | G1 | 5.33 |
| 3 | 02–03.09.2023 | 19:00 | 22:00–04:00 | 04:00 | G1 | 5.67 |
| 4 | 12.09.2023 | 10:00 | 13:00–19:00 | 19:00 | G1 | 5.67 |
| 5 | 18–19.09.2023 | 16:00 | 01:00–07:00 | 07:00 | G2 | 6.67 |
| 6 | 19.09.2023 | 10:00 | Absent | 19:00 | G1 | 5.33 |
| 7 | 24–25.09.2023 | 16:00 | 16:00–01:00 | 07:00 | G1 | 5.67 |
| 8 | 26.09.2023 | 07:00 | Absent | 16:00 | G1 | 5.33 |
| 9 | 05.10.2023 | 01:00 | Absent | 07:00 | G1 | 5 |

Наша цель – сопоставить вариации ЭТП с моментами возникновения солнечных вспышек, а затем с магнитными бурями. Заметим, что сопоставление данных с магнитными бурями, конечно, имеет гораздо больший физический смысл, чем с солнечными вспышками, впрочем, это не лишает смысла и интереса сопоставление всех трех явлений одновременно.

Результаты

Для демонстрации больших периодов времени по ЭТП, в которые попадали солнечные вспышки и на которых можно было бы оценить продолжительное влияние магнитных бурь, были подготовлены нарезки данных ЭТП длительностью по 3–4 дня (рис. 3). Эти нарезки не всегда заканчиваются целыми сутками, но четко следуют по времени друг за другом. В целом удалось вставить в каждые три графика около 10 сут. На всех далее представленных графиках с вариациями ЭТП соблюдается единый масштаб для каждого канала и, кроме того, нанесены ключевые события (вспышки и землетрясения). Графики ориентированы на периоды, которые охватывают все события из табл. 1 и большинство событий из табл. 2. Несмотря на то что анализ возможной связи сейсмичности с вариациями ЭТП не входит в задачи данного сообщения (это задача дальнейших исследований), считаем полезным показать на графиках значимые землетрясения (с $M > 3$), которые произошли в пределах измеритель-

ного полигона (в радиусе 25–30 км). Список таких землетрясений представлен в табл. 3, а карта сейсмичности в период с 20.07 по 12.10.2023 – на рис. 2.

На рис. 2 и в табл. 3 приведены локальные магнитуды. Динамика сейсмичности за такой весьма короткий промежуток времени не выделяется чем-то особенным, а вот два землетрясения с $M > 3$ для окрестности полигона явление очень редкое, что отмечено нами в работе [4]. Итак, рассмотрим данные ЭТП (рис. 3).

Первый период вспышечной активности (рис. 3 А) совпадает с одним из знаковых событий нашего первого исследования [4] – землетрясением 08.08.2023 с $M = 3.8$.

Заметим попутно, что на рис. 3 А хорошо видны ночные серии сигналов, которые в исследовании [4] были обнаружены нами с 20.07 по 11.09.2023 и наблюдались каждые сутки на всем периоде. В [4] отмечалось, что в этот период ночные серии квазипериодических импульсов меняли параметры перед сейсмическим событием в районе полигона (09.08.2023) и после него. И на наших графиках этот ключевой момент как раз оказался запечатлен. Мы видим нарастание и стабилизацию амплитуды сигналов, а затем, уже после землетрясения, нарушение целостности сигналов, составляющих серии. Два самых сильных вспышечных события за период в 82 дня происходят за сутки и трое суток перед одним из двух сильнейших землетрясений в исследуемом райо-

не. Это, несомненно, интересное наблюдение и даже предмет будущего исследования, задача же данной работы – определение возможного влияния вспышек на изменение теллурических потенциалов. При детальном рассмотрении вариаций ЭТП на всех каналах и всем периоде времени (рис. 3) нам не удалось обнаружить заметного увеличения количества или амплитуды вариаций, равно как и сигналов определенной формы или периодичности (или квазипериодичности, как в ночных сериях).

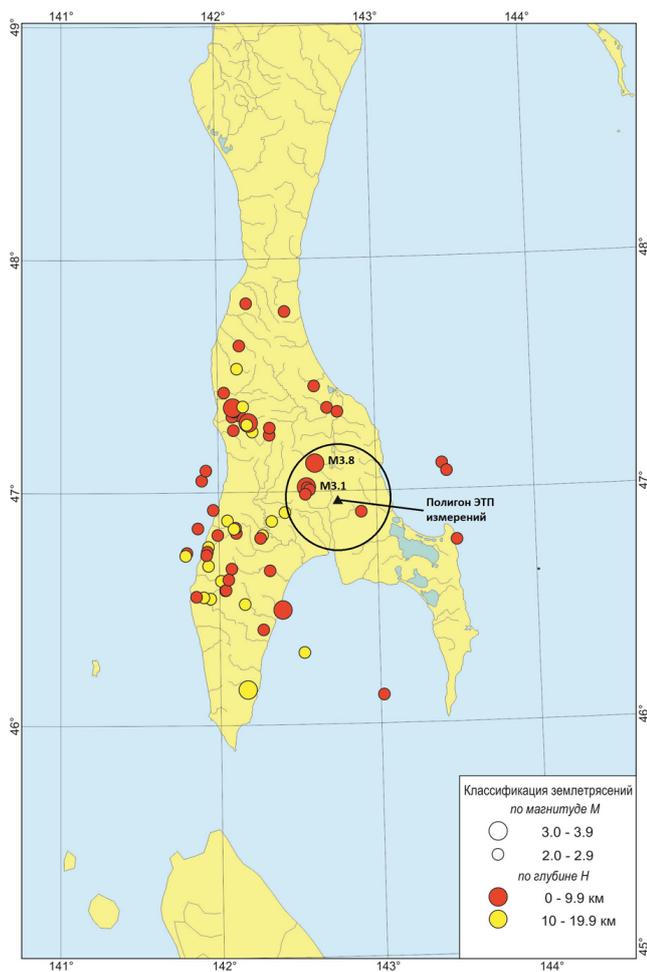


Рис. 2. Карта сейсмичности юга о. Сахалин с 20.07 по 12.10.2023 г.

Fig. 2. Seismicity map of the south of Sakhalin Island from July 20 to October 12, 2023

Таблица 3. Землетрясения с $M > 3$ в радиусе 0.25° от пункта измерений

Table 3. Earthquakes with $M > 3$ within a radius of 0.25° from the measurement point

| Date, dd.mm.yyyy | Time, h:m:s | Coordinates | Depth, km | Magnitude, M |
|------------------|-------------|------------------|-----------|--------------|
| 08.08.2023 | 18:14:34 | 47.02°N 142.56°E | 6 | 3.8 |
| 18.09.2023 | 15:49:33 | 47.12°N 142.61°E | 9 | 3.1 |

На рис. 3 С показан период с 31.08 по 09.09.2023, в котором произошла вспышка, по классу близкая к нижней границе выбранного нами диапазона, однако по интенсивности излучения сопоставимая со вспышками более высокого класса (табл. 1).

Этот период также примечателен тем, что в нем ночные серии сигналов уже значительно потеряли силу (на канале NS их уже не видно). Напомним, что эти серии после 11.09.2023 (до 01.05.2024) не регистрировались нами более. Однако в этих графиках внимание привлекает усиление уровня сигнала 3 сентября. На канале WE мы поместили это событие как GUV. Отметка GUV выбрана не случайно. Аббревиатура переводится как Geysier type ULF Variation. Такое название сигналы на ультра-низких частотах получили из-за сходства временного изменения электрической силы с изменением высоты воды в гейзере [11]. Впрочем, в работе [11] не раскрывается их связь с каким-либо физическим явлением.

На нашем графике мы видим не просто усиление шумовой компоненты, а квазипериодическую серию типичных GUV сигналов (увеличенный фрагмент показан на рис. 4). В работе [4] мы упоминали о том, что подобные сигналы есть в наших измерениях, правда, тогда мы не ставили задачу выяснить их происхождение или выявить какие-либо корреляции с другими явлениями. Как видно на рис. 4, сигналы GUV у нас идут с переменной полярностью, их амплитуда на канале NS около 5 мВ, длительность около 5 с, а период по однополярным сигналам около 95 с.

Всего серия длилась около 6 ч и началась приблизительно через 14 ч после солнечной вспышки. Последние вспышки из табл. 1 произошли также в сентябре 2023 г. (рис. 3 D).

В этот же период наблюдалось второе землетрясение из табл. 3, которое произошло

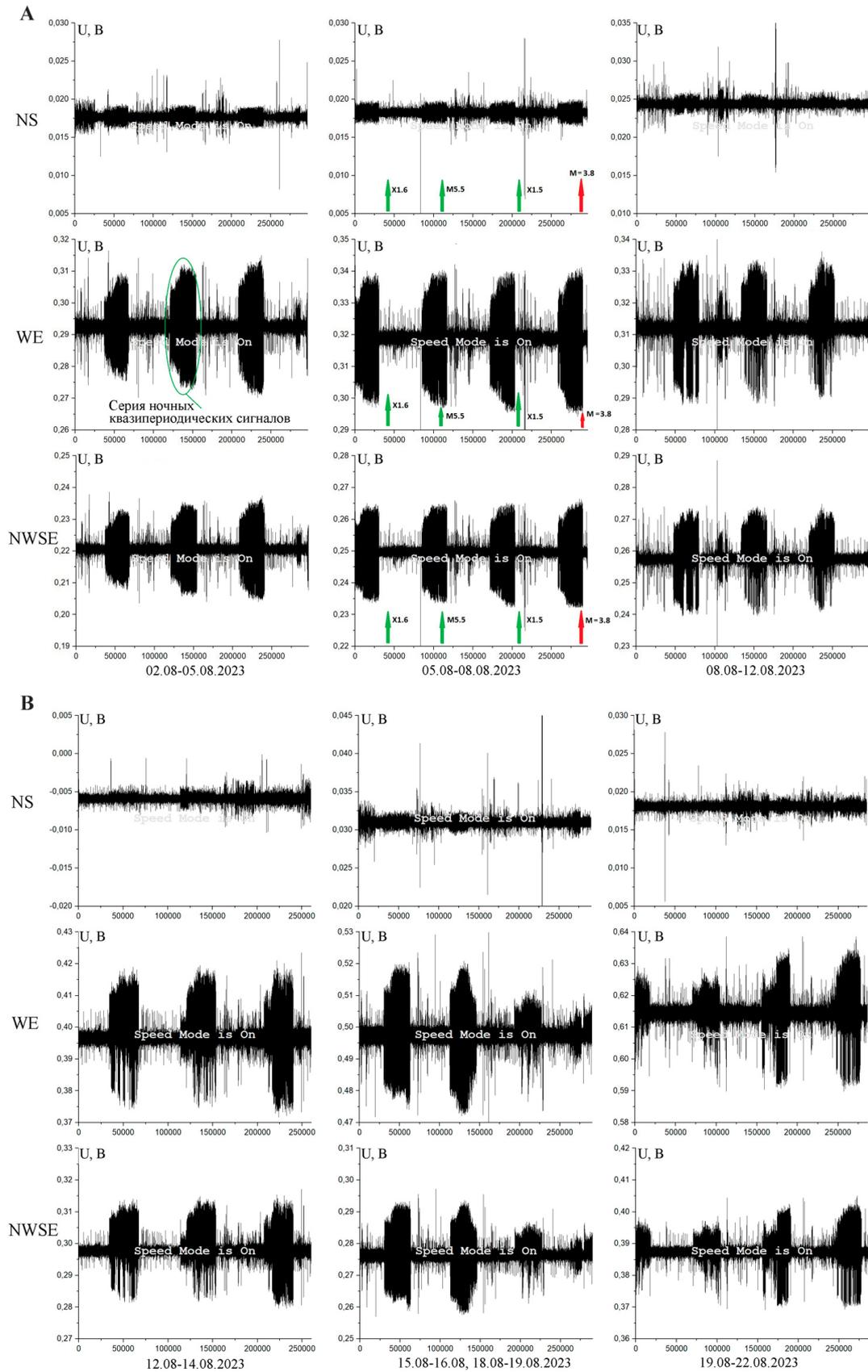


Рис. 3. Изменение потенциала на диполях NS, WE и NWSE в периоды: (A) 02.08–12.08.2023; (B) 12.08–16.08 и 18.08–22.08.2023; (C) 31.08.2023 – 09.09.2023; (D) 15.09–23.09.2023. Зелеными стрелками показаны моменты вспыхивных событий (t_0) и их класс, красной стрелкой – землетрясение с указанием магнитуды. Красным контуром и символом GUV отмечена серия квазипериодических сигналов.

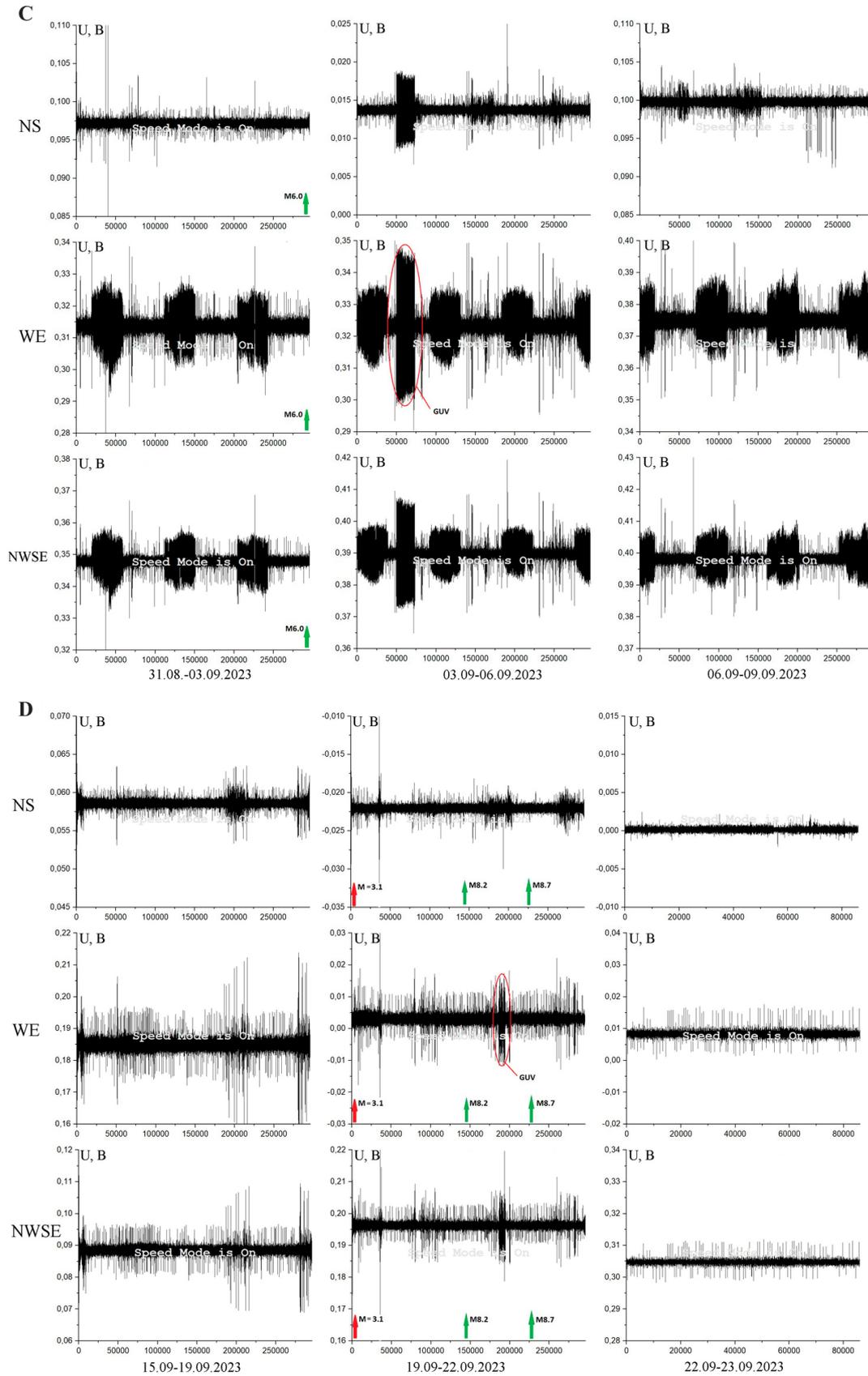


Fig. 3. Potential changes on the NS, WE, and NWSE dipoles: (A) 02.08–12.08.2023; (B) 12.08–16.08 and 18.08–22.08.2023; (C) 31.08.2023 – 09.09.2023; (D) 15.09–23.09.2023. Green arrows show the moments of flare events (t_0) and their class. A series of quasi-periodic signals is marked with a red outline and the GUV symbol.

в 15 ч 19.09.2023 (UTC) и имело магнитуду $M = 3.1$. Однако первое событие оказалось точно после двух бурь X-класса, а вот второе произошло за сутки до двух вспышек класса M8. На графиках можно отметить существенное понижение уровня вариаций и их количества через сутки после последней вспышки. Однако самое интересное – это обнаружение серии GUV-сигналов (серия отмечена на канале WE, рис. 3 D) 21 сентября, которые хоть и значительно слабее, чем 3 сентября (на канале NS сигналы вообще неразличимы), но выделяются надежно (рис. 4).

Серия обнаружена через 12 ч после первого вспышечного события 21 сентября и дли-

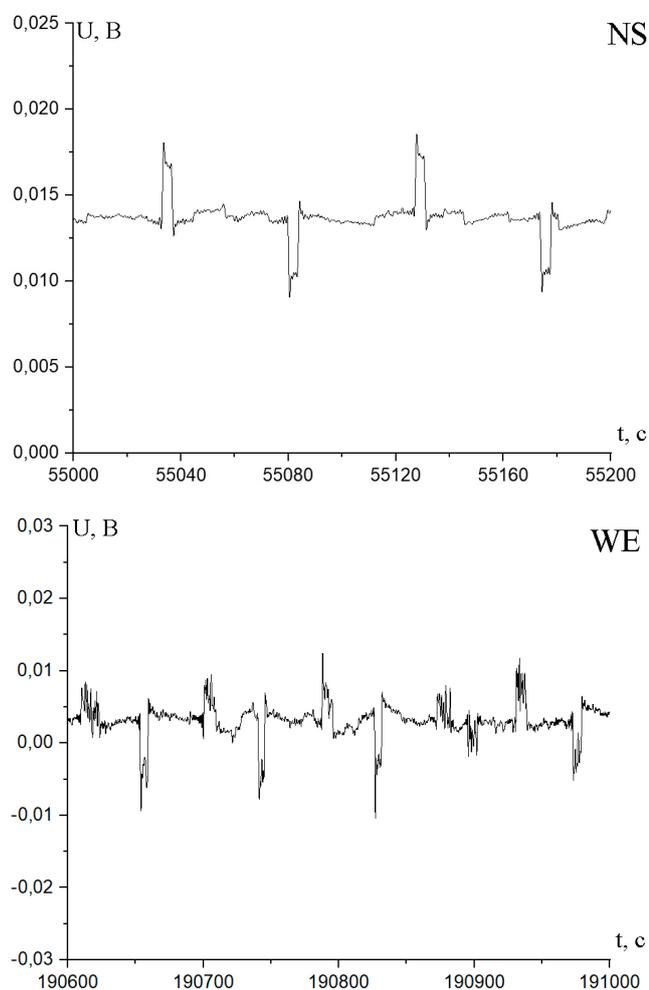


Рис. 4. Фрагменты изменения потенциала на канале NS 3 сентября 2023 г. (верхний график) и на канале WE 21 сентября 2023 г. Представлены отдельные сигналы типа GUV, составляющие квазипериодические серии.

Fig. 4. Fragments of potential changes on the NS channel on September 3, 2023 (upper graph) and on the WE channel on September 21, 2023. Separate GUV type signals are presented, which make up quasi-periodic series.

лась всего около 2 ч. Это уже второй случай, и, несмотря на то что после вспышек X-класса в начале августа (рис. 3 C) подобного не обнаружено, следует поговорить об этом подробнее. Мы это сделаем позже, но сначала предлагаем рассмотреть сопоставимый по времени отрезок, когда активность солнца была на минимуме (рис. 3 B), т.е. отсутствовали вспышки, а геомагнитный индекс был в зеленой зоне ($Kp < 4$).

Детальный анализ графиков показал, что каких-то заметных изменений в вариациях ЭТП по сравнению с предыдущими периодами не отмечается. Заметим, что продолжается деградация ночных серий, которые начали нарушаться с 10 августа. Также не отмечается никаких иных квазипериодических серий сигналов определенной и устойчивой формы, подобных GUV.

Теперь рассмотрим периоды времени, когда были зарегистрированы сильнейшие магнитные бури. Все 9 магнитных бурь удалось показать на 6 трехдневных периодах (рис. 1). Как следует из таблиц 1 и 2, а также из графиков на рис. 1, почти во всех случаях магнитные бури опережают солнечные вспышки. А, например, 12, 24–26 сентября и 5 октября, когда были зафиксированы магнитные бури, значимых вспышек не наблюдалось вовсе. Мы проанализировали данные ЭТП и в эти периоды. Ничего нового в связи с прохождением бурь мы не обнаружили, кроме уже знакомых серий сигналов GUV. Сразу отметим, что графики ЭТП для магнитных бурь, которые не попали на рисунки, равно как и схожие графики новых серий GUV, мы приводить не будем, так как результаты идентичны.

Вернемся к вопросу о возможной связи GUV с геомагнитными проявлениями. Данные за весь период исследования от 20 июля до 12 октября 2023 г. были рассмотрены детально именно с этой целью, т.е. все три канала по-суточно масштабировались в поисках наличия сигналов GUV. Заметим, что работа была проделана объемная, учитывая время загрузки в математический пакет суточных файлов, где содержатся записи по трем каналам с частотой дискретизации 300 Гц, и необходимость мас-

Таблица 4. Параметры серий GUV
Table 4. Parameters of GUV series

| № | Date (dd.mm.yyyy) and time (h:m) | | T (с) | t (с) | A(NS), B | A(NWSE), B | A(WE), B | Channels |
|---|----------------------------------|--------------------|-------|-------|----------|------------|----------|--------------|
| | Start | End | | | | | | |
| 1 | 03.09.2023 22:25 | 04.09.2023 4:31 | 87 с | 4.21 | 0.00451 | 0.0173 | 0.0241 | NS, WE, NWSE |
| 2 | 21.09.2023 2:14 | 21.09.2023 4:24 | 82 с | 5.3 | – | 0.0108 | 0.0126 | WE, NWSE |
| 3 | 25.09.2023 1:02 | 25.09.2023 5:12 | 82 с | 4.23 | 0.0015 | 0.012 | 0.015 | NS, WE, NWSE |
| 4 | 02.10.2023 1:30 | 02.10.2023 5:00 | 85 с | 4.64 | 0.00195 | 0.0104 | 0.0117 | NS, WE, NWSE |
| 5 | 05.10.2023 3:55 | 05.10.2023 4:51 | 86 с | 4.24 | 0.00239 | 0.0106 | 0.017 | NS, WE, NWSE |

Примечание. T – период между сигналами одинаковой полярности, t – длительность импульса, A – амплитуда импульса.
Note: T, period between signals of the same polarity; t, pulse duration; A, pulse amplitude.

штабирования пакетами по несколько десятков минут. Итоги данной работы представлены в табл. 4.

Всего серии сигналов типа GUV были отмечены пять раз, и в двух случаях они появлялись через 12–14 ч после вспышечного события (табл. 4, № 1, 2; рис. 3 C, D). В среднем серии длятся несколько часов, самая короткая около 1 ч и самая длинная почти 6 ч. Амплитуда и длительность импульсов, а также период между ними меняются незначительно. По отношению к дням недели избирательности нет. Начало появления серий разное, а вот окончание – в 15–17 ч по сахалинскому времени. Период между сигналами GUV в наших измерениях почти вдвое короче периода между сигналами, которые мы фиксировали в ночное время в августе–сентябре [4], но сопоставимы с ними по длительности импульса и амплитуде. Если сравнить данные таблиц 2 и 4, то появляется дополнительная информация. Рассмотрим каждую серию GUV отдельно.

1. Начинается 3 сентября в 22:25 после магнитных бурь № 2 и № 3, фактически через 12 ч после окончания бурь и появления вспышки.

2. Начинается 21 сентября в 2:14, в то время как магнитные бури закончились к вечеру 19 сентября (табл. 2, № 5, 6), а 20 и 21 сентября произошли вспышки M8.2 и M8.7.

3. Серия 25 сентября четко коррелирует с магнитной бурей № 7 из табл. 2, причем не только по дате, но и попадает в ее промежуток по времени. При этом вспышек в этот период нет.

4. Серия 2 октября не совпадает с какими-либо событиями.

5. Серия 5 октября четко коррелирует с бурей № 9 (табл. 2) не только по дате, но и по времени. Вспышек в этот период нет.

Получается, что четыре из пяти серий GUV коррелируют с магнитными бурями и/или вспышками. Причем у данной корреляции весьма интересные особенности. В 1-м и 2-м случаях есть задержка, но там есть и опережение бурями моментов вспышек. При отсутствии вспышки магнитные бури идеально совпадают с сериями GUV. Есть две бури, которые не сопровождались сериями сигналов – это 5 августа и 12 сентября. Такой результат заставляет думать о том, что корреляции если и существуют, то они как минимум нелинейные.

Итак, судя по полученным результатам, есть некоторые совпадения между вариациями ЭТП, вспышками на Солнце, а также магнитными бурями. Предположительно, эти связи в ЭТП проявляются как серии сигналов GUV. Безусловно, по данным всего трех месяцев измерений в зоне с большим уровнем помех преждевременно делать вывод о том, что магнит-

ные бури и серии GUV действительно имеют явную связь. Мы только хотели бы обратить внимание на то, в какой форме это предположительное влияние может проявиться. Многие с недоверием относились к ночным сериям сигналов [4], которые появлялись как бы мгновенно и прекращались таким же образом. Теперь же мы увидели серии типа GUV, которые хоть и наполнены сигналами иной формы, но с точностью повторяют поведение ночных серий (квазипериодичность, резкое появление), а самое главное, возможно, коррелируют с источником, который мог бы их сгенерировать, – вариациями в магнитосфере Земли.

Заключение

В данной работе рассмотрены изменения электротеллурических потенциалов на геофизическом полигоне Института морской геологии и геофизики ДВО РАН в Южно-Сахалинске в периоды, когда имели место вспышечные события на Солнце высоких классов и/или магнитные бури. Интегральное усиление или ослабление теллурического шума при вспышечных событиях, а также во время прохождения магнитных бурь в низкочастотном спектре не обнаружено. Для некоторых событий были обнаружены совпадения с появлением в ЭТП квазипериодических серий сигналов типа GUV (Geysers type ULF Variation). При этом для самых сильных событий X-класса таких серий не зарегистрировано. Также выявлены серии GUV, которые регистрировались в отсутствие вспышек, но при наличии магнитной бури. Всего четыре из пяти серий сигналов GUV совпадали полностью или частично с бурями и вспышками. На данном этапе исследований можно предположить, что есть вероятность обнаружить при анализе большего объема данных корреляции между вспышечными событиями высоких классов (от M5), магнитными бурями (G1 и более) и вариациями ЭТП. Мы полагаем, что данная работа явится дополнительным стимулом для использования предложенных новых аппаратных решений в задаче поиска предвестников землетрясений в вариациях ЭТП.

Список литературы

1. Адушкин В.В., Спивак А.А. **2014**. *Физические поля в приповерхностной геофизике*. М.: ГЕОС, 360 с.
2. Дахнов В.Н. **1937**. *Теллурические токи и пути изучения их с целью проведения разведок полезных ископаемых*. М.: ГОНТИ, 56 с.
3. Волкова Е.Н. **2008**. *Физика Земли*. Ч. I. Саратов: Научная книга, 88 с.
4. 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
5. Мойланен Е.В., Пушкарев П.Ю., Шустов Н.Л. **2013**. Предварительные результаты глубинного магнитотеллурического зондирования на геофизической базе МГУ в Калужской области. *Записки Горного института*, 200: 65–70.
6. Kraјčović S., Marquart P. **1961**. Электротеллурическая станция в Гурбанове. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 5(4): 373–375. <https://doi.org/10.1007/bf02585409>
7. Богданов М.И., Калинин В.В., Модин И.Н. **2013**. Применение высокоточных низкочастотных электроразведочных комплексов для ведения длительного мониторинга опасных инженерно-геологических процессов. *Инженерные изыскания*, 10–11: 110–115.
8. Козлов В.И., Баишев Д.Г. **2018**. Вариации естественных электрических потенциалов в Якутске. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 5(25): 55–61. <https://doi.org/10.18454/2079-6641-2018-25-5-55-61>
9. Сивоконь В.П., Сероветников А.С., Писарев А.В. **2011**. Высшие гармоники как индикатор геомагнитно-индуцированных токов. *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*, 3: 30–34. EDN: MQABAV
10. Сероветников А.С., Сивоконь В.П. **2013**. Геомагнитно-индуцированные токи в электроэнергетических системах. *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*, 2(7): 24–32.
11. Fujinawa Y., Noda Y. **2020**. Progress of applied seismo-electromagnetism. *Open Journal of Earthquake Research*, 9(1): 1–18. <https://doi.org/10.4236/ojer.2020.91001>
12. Pilipenko V.A., Shiokawa K.A. **2024**. Closer cooperation between space and seismology communities – a way to avoid errors in hunting for earthquake precursors. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(1): 1–22. <https://doi.org/10.2205/2024ES000899>

References

1. Adushkin V.V., Spivak A.A. **2014**. [*Physical fields in near-surface geophysics*]. Moscow: GEOS, 360 p. (In Russ.).
2. Dakhnov V.N. **1937**. [*Telluric currents and ways to study them for the purpose of mineral exploration*]. Moscow: GONTI, 56 p. (In Russ.).
3. Volkova E.N. **2008**. [*Physics of the Earth*]. Pt I. Saratov: Nauchnaya kniga, 88 p. (In Russ.).
4. Zakupin A.S., Dudchenko I.P., Bogomolov L.M., Gulyakov S.A., Kazakov A.I., Stovbun N.S. **2024**. Short temporal variations of electrotelluric field in the vicinity of the earthquake source-site in the Sakhalin Island. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki = Bull. of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*, 46(1): 134–164. (In Russ.). <https://doi.org/10.26117/2079-6641-2024-46-1-134-164>; EDN: FIGWJO
5. Moilanen E.V., Pushkarev P.Yu., Shustov N.L. **2013**. Preliminary results of deep magnetotelluric sounding at the geophysical base of Moscow State University in the Kaluga region. *Journal of Mining Institute*, 200: 65–70.
6. Krajčovič S., Marquart P. **1961**. Electrotelluric station in Gurbanov. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 5(4): 373–375. <https://doi.org/10.1007/bf02585409>
7. Bogdanov M.I., Kalinin V.V., Modin I.N. **2013**. Application of high-precision low-frequency electrical exploration complexes for long-term monitoring of hazardous engineering-geological processes. *Inzhenernye izyskaniya*, 10–11: 110–115. EDN: RMTVIH
8. Kozlov V.I., Baishev D.G. **2018**. Variations of natural electrical potentials at Yakutsk. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki = Bull. of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*, 5(25): 55–61. (In Russ.). <https://krasec.ru/ru/kozlov-525/>
9. Sivokon V.P., Serovetnikov A.S., Pisarev A.V. **2011**. Higher harmonics as an indicator of geomagnetic-induced currents. *Elektro. Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotehnicheskaya promyshlennost'*, 3: 30–34. EDN: MQABAV
10. Serovetnikov A.S., Sivokon V.P. **2013**. Geomagnetic-induced currents in electrical power systems. *Vestnik KRAUNC. Fiziko-matematicheskie nauki = Bull. of KRAESC. Physical and Mathematical Sciences*, 2(7): 24–32. (In Russ.).
11. Fujinawa Y., Noda Y. **2020**. Progress of applied seismo-electromagnetism. *Open Journal of Earthquake Research*, 9(1): 1–18. <https://doi.org/10.4236/ojer.2020.91001>
12. Pilipenko V.A., Shiokawa K.A. **2024**. Closer cooperation between space and seismology communities – a way to avoid errors in hunting for earthquake precursors. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(1): 1–22. <https://doi.org/10.2205/2024ES000899>

Об авторах

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

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

Стовбун Николай Сергеевич (<https://orcid.org/0009-0004-1927-798X>), младший научный сотрудник, nikolay19972016@gmail.com

Гуляков Сергей Александрович (<https://orcid.org/0009-0001-7924-6972>), младший научный сотрудник, gulyakov_97@mail.ru

Казakov Артем Иванович (<https://orcid.org/0000-0002-1378-185X>), ведущий инженер, legn@inbox.ru

Дудченко Илья Павлович (<https://orcid.org/0000-0002-4967-7405>), кандидат технических наук, старший научный сотрудник, руководитель отдела исследования геофизических полей и физических свойств геоматериалов, ilpadu@mail.ru

Поступила 19.04.2024

Принята к публикации 04.06.2024

About the Authors

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

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

Stovbun, Nikolai S. (<https://orcid.org/0009-0004-1927-798X>), Junior Researcher, nikolay19972016@gmail.com

Gulyakov, Sergei A. (<https://orcid.org/0009-0001-7924-6972>), Junior Researcher, gulyakov_97@mail.ru

Kazakov, Artem I. (<https://orcid.org/0000-0002-1378-185X>), Leading Engineer, legn@inbox.ru

Dudchenko, Ilya P. (<https://orcid.org/0000-0002-4967-7405>), Cand. Sci. (Technology), Senior Researcher, Head of the Department of research of geophysical fields and physical properties of geomaterials, ilpadu@mail.ru

Received 19 April 2024

Accepted 4 June 2024