

Мониторинг подземных вод берега Байкала в режиме реального времени: основной контролирующий фактор возмущений ОВП магнитными бурями в начале 2025 г.

С.В. Рассказов^{1,2}, И.А. Асламов³, С.В. Снопков^{2,4}, В.И. Архипенко³, А.М. Ильясова¹
Е.П. Чебыкин^{1,3}

¹Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

²Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

³Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. Приводятся результаты мониторинга в режиме реального времени с января до начала марта 2025 г окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в подземных водах двух скважин Култукского полигона на берегу Байкала. Выявляется основной контролирующий фактор возмущений ОВП магнитными бурями с запаздыванием относительно них. Делается вывод о разном характере соотношений ОВП с землетрясениями и с лунно-солнечными приливами, и об изменении условий проявления этих процессов в 2025 г. по сравнению с 2024 г.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, окислительно-восстановительный потенциал, землетрясения, Байкал

Real-Time Monitoring of Redox Potential in Groundwater from the Baikal Coast: The Main Controlling Factor of ORP Disturbances by Magnetic Storms in Early 2025

S.V. Rasskazov^{1,2}, I.A. Aslamov³, S.V. Snopkov^{2,4}, V.I. Archipenko³, A.M. Ilyasova¹, E.P. Chebykin^{1,3}

¹Institute of the Earth's Crust, SB RAS, Irkutsk, Russia

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Results of real-time monitoring from January to early March 2025 of the oxidation-reduction potential (ORP) in groundwater from two wells of the Kultuk area on the shore of Lake Baikal are presented. The main controlling factor of disturbances of the ORP by magnetic storms with a delay relative to them is substantiated. It is inferred that the nature of the ORP relationships with earthquakes

Статья получена: 14.02.2025; исправлена: 24.02.2025; принята: 28.03.2025.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Мониторинг подземных вод берега Байкала в режиме реального времени: основной контролирующий фактор возмущений ОВП магнитными бурями в начале 2025 г. // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 1. С. 114-128. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.114. EDN: [DFPEBC](#)

Article received: 14.02.2025; corrected: 24.02.2025; accepted: 28.03.2025.

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Real-Time Monitoring of Redox Potential in Groundwater from the Baikal Coast: The Main Controlling Factor of ORP Disturbances by Magnetic Storms in Early 2025 // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 114-128 DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.114. EDN: [DFPEBC](#)

and lunar-solar tides are different and that the conditions for displaying these processes in 2025 have changed compared to 2024.

Keywords: groundwater, monitoring, redox potential, earthquakes, Baikal

Введение

Сенсоры, измеряющие окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), рН и температуру подземных вод в режиме реального времени (измерения через 2 минуты), были установлены на берегу западной оконечности Байкала в начале декабря 2023 г. в двух скважинах (ст. 9 и 184). Зонды были установлены на расстоянии 1624 м друг от друга: ст. 9 – в зоне активного Обручевского разлома, по

которому ложе Южно-Байкальской впадины опущено в позднем кайнозое приблизительно на 4 км, ст. 184 – на торцовой Култукской тектонической ступени Южно-Байкальской впадины, наклоненной к востоку, в сторону Байкала (рис. 1). На ст. 9 сенсор находится приблизительно на уровне зеркала Байкала, на ст. 184 – на 18 м выше уровня Байкала. Подробная характеристика приборов и условия их установки приведены в работе (Рассказов и др., 2023).



Рис. 1. Схематическая карта расположения станций мониторинга в режиме реального времени относительно активных разломов и станций гидрогеохимического мониторинга на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Палеосейсмодислокации шовной зоны Главного Саянского разлома (ГСР) показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 1. Schematic map of the location of real-time monitoring stations relative to active faults and hydrogeochemical monitoring stations on the western coast of Lake Baikal (Kultuk area). Paleoseismic dislocations of the suture zone in the Main Sayan Fault (ГСР) are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

Вода скважин каждый день обновляется короткими прокачками. Кроме того, на ст. 9 раз в неделю прокачка интенсифицируется. Благодаря такому режиму эксплуатации скважин измеряются параметры вод, активно циркулирующих в верхней части коры.

За время наблюдений, продолжающихся более года, зарегистрированы сильные сигналы ОВП, связанные с разрушением ледового покрова на Байкале, с приходом магнитных бурь, с проявлением лунно-солнечных приливов и с ходом сейсмической активности в коре центральной части Байкальской

рифтовой системы (БРС) (Асламов и др., 2024; Рассказов и др., 2024; Снопков и др., 2024; Чебыкин и др., 2024).

Основная задача мониторинга – выявлять закономерности изменений ОВП в зависимости от протекающих (в том числе, опасных) природных явлений и использовать эти закономерности для их своевременного предупреждения. В процессе мониторинга представляется важным реагировать на любые сигналы ОВП, выяснять их причину в начале

проявления и выстраивать текущий прогноз развития природного процесса, производящего сигналы.

В январе и феврале 2025 г. ОВП ст. 9 характеризуется режимом без видимых закономерностей, но в начале марта проявляется некоторый порядок. Цель настоящей работы – определить характер и причины возмущений этого параметра с января до начала марта, чтобы в дальнейшем отследить возмущения ОВП с элементами прогноза.

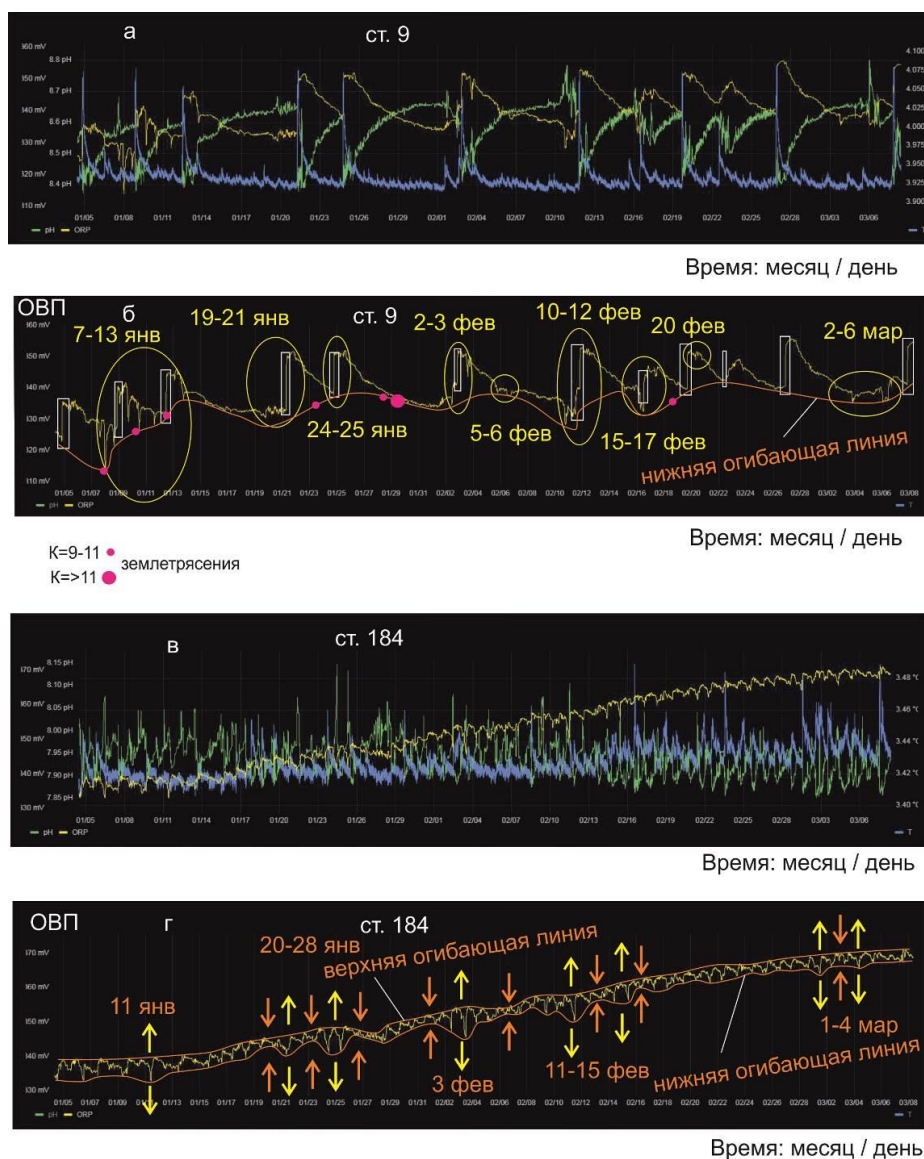


Рис. 2. Графики наблюдений в январе, феврале и начале марта 2025 г.: а – ОВП, рН и температуры подземных вод ст. 9; б – ОВП ст. 9; в – ОВП, рН и температуры подземных вод ст. 184; г – ОВП ст. 184. С течением времени, существенное поднятие ОВП ст. 184 на панелях в и г сопровождается слабым возрастанием температуры и снижением рН на панели в. Здесь и далее все данные приводятся по Иркутскому времени (опережает время по Гринвичу на 8 ч). Землетрясения приводятся по данным сайта (Карта..., 2025).

Fig. 2. Observation graphs in January, February, and early March 2025: *a* – ORP, pH, and temperature of groundwater at station 9; *b* – ORP at station 9; *c* – ORP, pH and temperature of groundwater at station 184; *d* – ORP at station 184. Over time, a significant increase in ORP at station 184 in panels *c* and *d* is accompanied by a slight increase in temperature and a decrease in pH in panel *c*. From here on, all data are given in Irkutsk time (8 hours ahead of Greenwich Mean Time). Data on earthquakes are taken from the website (Map..., 2025).

Возмущения ОВП в январе – феврале 2025 г.

Непрерывная серия возмущений отслеживается с 7-го января (начало в 13 ч 26 мин) до 13-го января (окончание в 18 ч 10 мин). Серия продолжается 6 дней 5 ч. и слегка нарушается двумя прокачками скважины, вызывающими резкое повышение значений ОВП. Тем не менее, сильные природные наложенные сигналы имеют резкое выражение на графике в виде минимумов (рис. 26).

Следующие две серии откликов ОВП имели место 19–21-го и 24–25-го января. Нестабильность первого эпизода начинается 19-го января в 7 ч 18 мин и завершается около полуночи с 21-го на 22-е января. Нестабильность второго эпизода начинается 24 января в 10 ч 18 мин и завершается 25-го января в 17 ч 52 мин. Общая продолжительность двух эпизодов (6 дней и 10 ч), включая интервал между ними без возмущений, сопоставим с продолжительностью возмущений 7–13-го января. Эпизоды сочетаются во времени с эффектами двух прокачек скважин. Возмущения ОВП 19–25-го января отделяются от возмущений 7–13-го января интервалом без возмущений продолжительностью 5 дней 15 ч. После 25 января интервал без заметных колебаний ОВП длится до 1 февраля. В феврале определяется 5 эпизодов возмущения ОВП подземных вод ст. 9: 2–3-го, 5–6-го, 10–12-го, 15–17-го и 20-го февраля.

В подземных водах ст. 184 с течение времени наблюдается существенное поднятие ОВП, сопровождающееся слабым возрастанием температуры и снижением pH. Возрастание ОВП описывает плавная верхняя огибающая линия. Более изменчивая нижняя огибающая линия обуславливает схождение и расхождение верхней и нижней огибающих линий ОВП. Расхождения имеют место 11-го, 20–28-го января, 3-го, 11–15-го февраля и 1–4-го марта. Эти аномалии подземных вод ст. 184, по крайней мере, частично совпадают по

времени с возмущениями ОВП в подземных водах ст. 9.

Последовательное усиление ОВП-импульсов 1–8 марта 2025 г.

В начале марта проявляется последовательное усиление возмущений ОВП подземных вод ст. 9. С 1 по 8 марта наблюдаются три возмущения: 2-го, 3–4-го и 5–6-го марта (рис. 36). Первое из них было слабым. Оно началось в 12 ч 46 мин (ОВП=342 мВт) с выходом на минимум ОВП в 14 ч 08 мин (ОВП=340 мВт) с последующей релаксацией. Второе возмущение было сильнее: началось 3 марта в 17 ч 42 мин (ОВП=339 мВт) и вышло на минимум ОВП в 19 ч 32 мин (ОВП=336 мВт). Эта нестабильность завершилась 4 марта в 09 ч 20 мин. Третье возмущение ОВП проявилось еще сильнее. Оно началось 5 марта в 08 ч 12 мин (ОВП=339 мВт) и после продолжительных колебаний вышло на минимум 06 марта в 00 ч 52 мин (ОВП=336 мВт). Низкие значения ОВП сохранялись до 09 ч 34 мин. После поднятия до значения ОВП=343 мВт, последовал еще один минимум в 15 ч 44 мин (ОВП=340 мВт) с последующим выходом на плато без заметных колебаний.

Возмущения ОВП 2-го и 3–4-го марта не сопровождались изменениями pH и температуры, тогда как более сильное возмущение ОВП 5–6-го марта ассоциировалось с колебаниями pH с выходом этого параметра на максимум (заметных изменений температуры не наблюдается). Следовательно, два предшествующих эпизода возмущений ОВП можно считать как предваряющие событие, произошедшее 5–6-го марта. Включение режима прокачки 7 марта с 20 ч 00 мин до 21 ч 20 мин сопровождается понижением pH и возрастанием температуры (рис. 3а). Сигналы прокачки как артефакты явно отличаются от природных сигналов ОВП, проявившихся со 2-го до 6-го марта.

На ст. 184 широкие колебания параметров подземных вод вызывает дневная прокачка

скважины (рис. 3в). В период с 1 по 8 марта намечаются интервалы сближения и расхождения верхней и нижней огибающих линий.

Линии расходятся 4 марта, а затем сближаются между собой (рис. 3г).

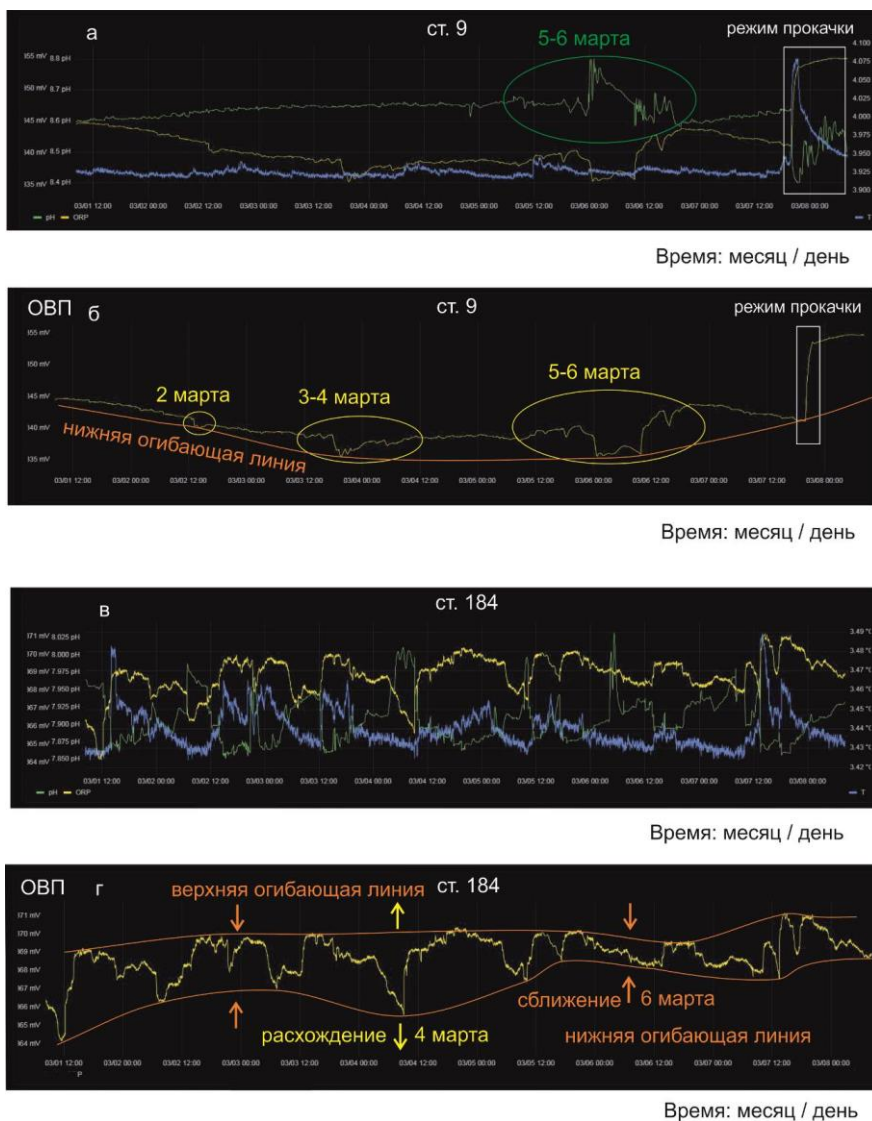


Рис. 3. Графики наблюдений 1–8 марта 2025 г.: а – ОВП, рН и температуры подземных вод ст. 9; б – ОВП ст. 9; в – ОВП, рН и температуры подземных вод ст. 184; г – ОВП ст. 184. Последовательному усилению возмущений ОВП ст. 9 на панели б соответствует расхождение и сближение огибающих линий на панели г.

Fig. 3. Graphs of observations for March 1–8, 2025: а – ORP, pH, and temperatures of groundwater at station 9; б – ORP at station 9; в – ORP, pH, and temperatures of groundwater at station 184; г – ORP at station 184. The consistent increase in ORP disturbances at station 9 in panel б corresponds to the divergence and convergence of the envelope lines in panel г.

Обсуждение результатов

Предварительное замечание

2025-й год отличается от 2024-го года более теплой зимой. Лед сковал Байкал в районе Култукского полигона в 2024 г. около 15 января, а в 2025 г. – около 28 января. В 2025

г. на Байкале образовалось тонкое ледовое покрытие. Такое отличие может иметь отпечаток на результатах мониторинга подземных вод ст. 9, сенсор которой находится в скважине, приблизительно, на уровне зеркала оз. Байкал.

Регулярность ОВП-импульсов в начале 2024 г. как отражение лунно-солнечных

приливов и отсутствие регулярности в начале 2025 г.

Весьма выразительно регулярные отрицательные ОВП-импульсы в подземных водах ст. 9 проявляются с 07 февраля до 07 марта 2024 г. В каждом ОВП-импульсе вода резко получает порцию электронов. После достижения минимума наблюдается кривая релаксации сигнала с выходом на уровень плато. Предполагается, что 30-суточная активность импульс-генерирующего процесса февраля–марта 2024 г. регулируется квадратурными и сизигийными лунно-солнечными приливами (Снопков и др., 2024; Асламов и др., 2024).

С января до марта 2025 г. ОВП-импульсы с характерным строением (Снопков и др., 2024) отсутствуют. Импульс нарушения плавности кривой имеет характер возмущения, распадающегося на 2, 3 и более минимумов, объединяющихся в интервал от первых

часов до нескольких дней. В январе и феврале регулярность в ОВП-импульсах не наблюдается. Элемент упорядоченности воспринимается только в относительном нарастании продолжительности ОВП-эффектов в начале марта 2025 г.

Очевидно, что лунно-солнечные приливы отражаются в ОВП подземных вод ст. 9 с 07 февраля до 07 марта 2024 г. только как исключительный случай сочетания этого руководящего фактора с другими благоприятными обстоятельствами. В 2025 г. такого сочетания обстоятельств не было.

Возмущения ОВП подземных вод ст. 9 и магнитные бури

В конце 2023 г. выразительные минимумы ОВП проявляются в подземных водах ст. 9 в течение короткого временного интервала 22–24 декабря (рис. 4).

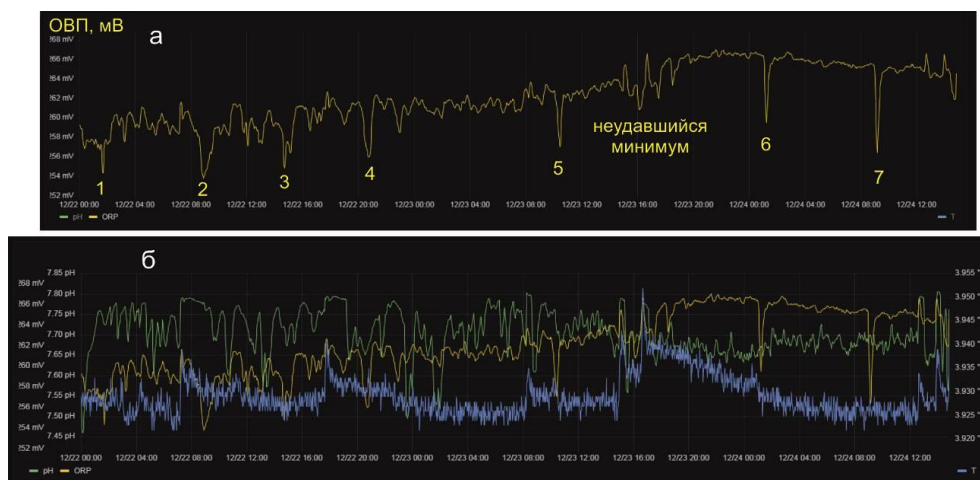


Рис. 4. Графики ОВП ст. 9 с 22 декабря 00:00 до 14:52 24 декабря 2023 г. (а) и сопоставление графиков ОВП, рН и температуры станции в этом же временном интервале (б). На панели а цифрами от 1 до 7 обозначены сравнительно глубокие минимумы.

Fig. 4. ORP graphs of station 9 from 00:00 on December 22 to 14:52 on December 24, 2023 (a) and those of comparison of ORP, pH, and temperature of the station in the same time interval (b). In panel a, numbers from 1 to 7 indicate relatively deep minima.

В интервале температурного перелома 22–23 декабря в воде ст. 9 проявляется 7 глубоких ОВП-минимумов через временные интервалы от 5 час. 46 мин. до 9 час. 32 мин. Эти ОВП-импульсы не согласуются с изменениями рН и температуры (см. рис. 4а,б). В последующее более теплое время декабря ОВП-минимумов не наблюдается.

Первые 4 ОВП-минимума 22 декабря со значениями 254–256 мВ разделены между собой сравнительно небольшими временными интервалами (от 5 час. 46 мин. до 7 час. 14 мин.). В промежутках между минимумами наблюдаются заметные фоновые колебания

значений ОВП. После события 4 (22 декабря, 20:44, 256 мВ) амплитуда фоновых колебаний сокращается приблизительно в 2 раза с выходом на минимум события 5 (23 декабря, 10:26, 257 мВ) через 13 час. 42 мин.

Между минимумами 5 и 7 фоновые колебания имеют еще более сокращенную амплитуду. В средней части интервала между этими минимумами амплитуда колебаний резко увеличивается. Здесь должен был проявиться следующий минимум, но вместо него наблюдается только слабое возмущение ОВП. Неудавшийся минимум связан либо с избыточной прокачкой скважины в это

время, отразившейся в возрастании температуры воды (рис. 4б), либо со снижением температуры и возрастанием давления атмосферы в районе Байкала. Без учета неудавшегося минимума пауза между ОВП-импульсами 5 и 6 составляет 14 час. 50 мин.

Далее, отчетливо выражены ОВП-импульсы 6 (24 декабря, 01:14, 260 мВ) и 7 (24 декабря, 09:10, 256 мВ) с паузой между ними, длившейся 7 ч. 56 мин. По наиболее слабым фоновым вариациям ОВП и значительным амплитудам (соответственно, 6 и 10 мВ) минимумы 6 и 7 имеют наибольшее сходство с февральскими ОВП-минимумами.

С одной стороны, в начале и середине декабря в пос. Култук долгое время стояла низкая температура воздуха. С 8 до 20 декабря дневная максимальная температура $-24-33$ °С сменялась минимальной ночной температурой $-24-36$ °С. С 21 декабря температура воздуха начала меняться в сторону потепления, а с 24 до 31 декабря выдерживалась более высокая температура: максимальная дневная $-2-7$ °С и минимальная ночная $-6-10$ °С (рис. 5). С другой стороны, серия ОВП-импульсов 22–24 декабря 2023 г. запаздывает относительно серии магнитных бурь, продолжавшихся с 12-го до 20-го декабря 2023 г. (рис. 6).

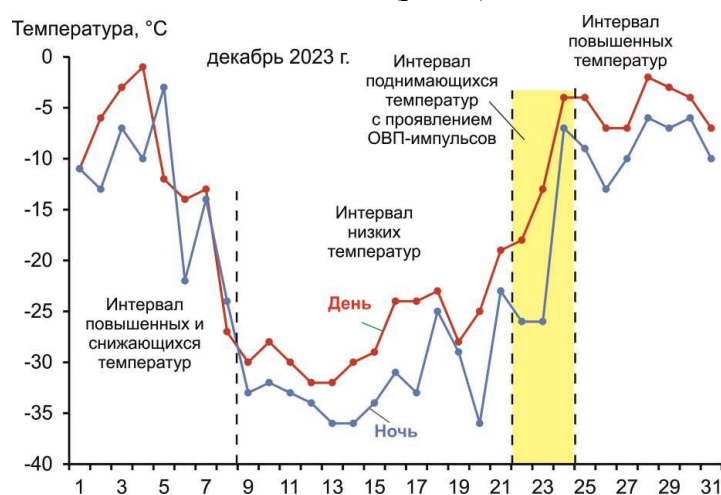


Рис. 5. Интервал проявления ОВП-импульсов в подземных водах ст. 9 (22–24 декабря) на графике изменения температуры воздуха в декабре 2023 г. в районе Култука (температура по данным сайта World Weather <https://world-weather.ru/pogoda/russia/kultuk/february-2024/>).

Fig. 5. The interval of ORP pulses displaying in groundwater at station 9 (December 22–24) on the graph of air temperature changes in December 2023 in the Kultuk area (temperature according to the World Weather website)

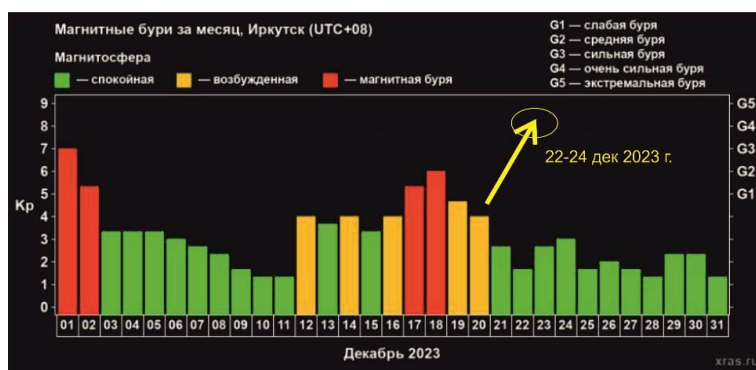


Рис. 6. График запаздывания ОВП подземных вод ст. 9 относительно магнитных бурь 22–24 декабря 2023 г. (запаздывание показано желтой стрелкой). Данные по магнитным бурям с сайта: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

Fig. 6. Graph of the delay of the redox potential of groundwater at station 9 relative to the magnetic storms of December 22–24, 2023 (delay is shown by yellow arrow). Magnetic storm data are from the website: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

В течение 2024 г. магнитные бури происходили неоднократно. Серия магнитных бурь вызвала крупноамплитудные возмущения ОВП на ст. 9 во временном интервале 20–27-го марта (Чебыкин и др., 2024). Еще одна магнитная буря отозвалась в возмущениях ОВП подземных вод ст. 9 20-го апреля 2024 г. (рис. 7).

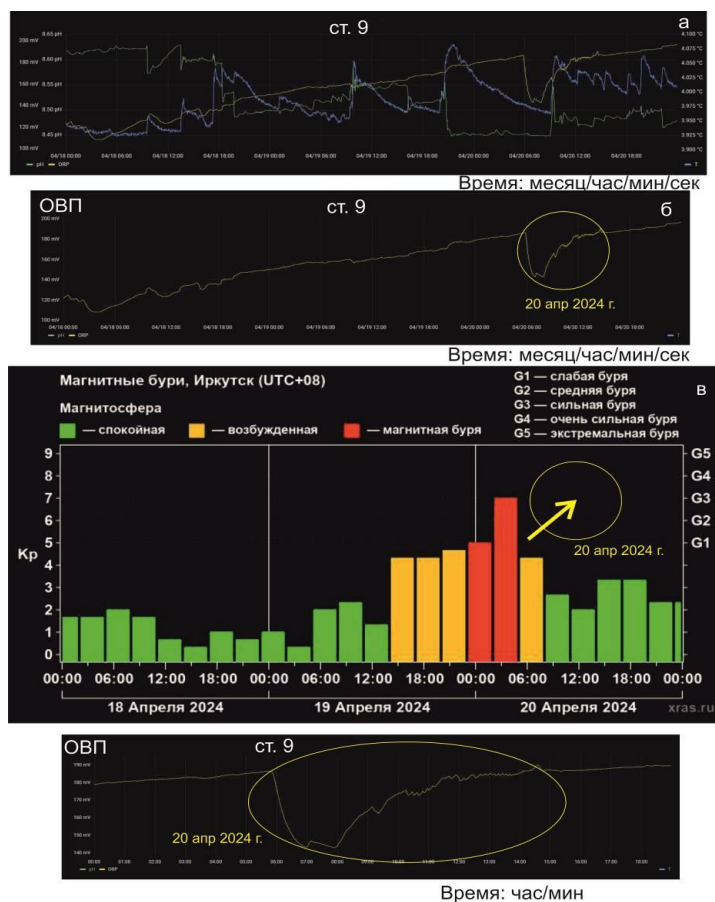


Рис. 7. Графики ст. 9 в интервале 18–20 апреля 2024 г.: а – ОВП, рН и температуры подземных вод; б – ОВП; в – магнитные бури и г – более детальный график ОВП подземных вод ст. 9 20-апреля. Крупноамплитудный ОВП-импульс 20 апреля запаздывает относительно магнитной бури (запаздывание показано желтой стрелкой). Данные по магнитным бурям с сайта: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

Fig. 7. Graphs of station 9 in the time interval of April 18–20, 2024: а – ORP, pH, and temperatures of groundwater; б – ORP; в – magnetic storms, and г – a more detailed graph of ORP of groundwater at station 9 on April 20. The large amplitude ORP impulse on April 20 is delayed relative to the magnetic storm (delay is shown by yellow arrow). Magnetic storm data are from the website: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

В течение трех дней, с 18 по 20 апреля значения ОВП постепенно возрастали со 105 мВ до 187 мВ. Несмотря на прокачки, отразившиеся в скачкообразном возрастании температуры и снижении рН, линия ОВП оставалась относительно ровной. 20 апреля в интервале от 06 ч 46 мин до 06 ч 56 мин ОВП резко снизилось от 187 мВ до 143 мВ. На минимуме линия стала мелко-зубчатой и постепенно поднималась с выходом на плато (187 мВ) до 14 ч 46 мин, после чего выровнялась (рис. 7г).

Зубчатые фрагменты линии ОВП наблюдались в серию магнитных бурь 20–27-го марта 2024 г. (Чебыкин и др., 2024). Также крупноамплитудные ОВП запаздывали относительно магнитных бурь 20–27-го марта 2024 г., минимум ОВП 20 апреля 2024 г. запаздывал относительно магнитной бури, вступление которой наблюдается 19 апреля в 14 ч. с достижением максимального $K_p=7$ в 02–05 ч 20 апреля. С 5 до 8 ч, когда наблюдается спад K_p , образуется минимум ОВП (рис. 7б,в).

Магнитная буря проходит, а зубчатые эффекты некоторое время продолжают (рис. 7Г).

На рис. 8 возмущения ОВП начала 2025 г. сравниваются со шкалой магнитных бурь в Иркутске. Декабрь 2024 г. в отношении магнитных бурь был спокойным. Возбуждение

магнитосферы началось 31 декабря в 23 ч. и переросло 1 января к 12 ч в сильную магнитную бурю. Возмущенная магнитосфера поддерживалась с перерывами до 6 января. После завершения этих процессов начались возмущения ОВП, продолжавшиеся с 07-го до 13-го января.

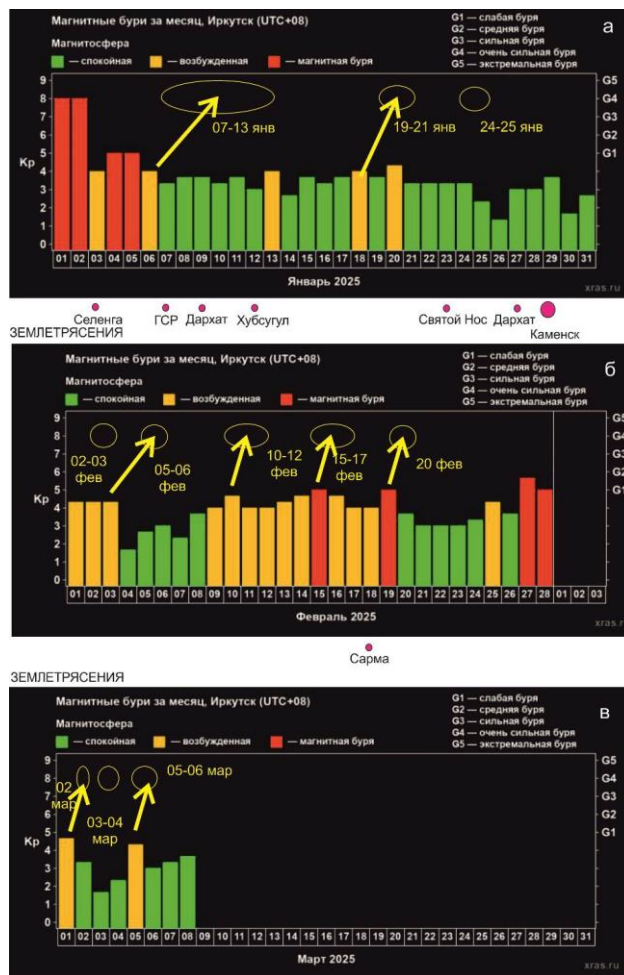


Рис. 8. Графики магнитных бурь в сопоставлении с возмущениями ОВП ст. 9 и землетрясениями в центральной части БРС в январе (а), феврале (б) и начале марта (в). Условные обозначения возмущений ОВП см. на рис. 5. Данные по магнитным бурям с сайта: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

Fig. 8. Graphs of magnetic storms in comparison with disturbances of ORP in station 9 and earthquakes in the central part of the BRS in January (a), February (b), and early March (c). Symbols are as in Fig. 5. Magnetic storm data are from the website: https://xras.ru/magnetic_storms.html.

Судя по запаздыванию ОВП-регистрации ст. 9 относительно магнитных бурь, этот временной интервал возмущения ОВП также подчиняется той же закономерности: возмущения ОВП следуют после серии сильных бурь. После спокойного режима слабое возбуждение магнитосферы 18 и 20 января повлекло за собой возмущение ОВП ст. 9 19–21-го января. Возмущения ОВП 24–25-го января

приходится на спокойный режим магнитосферы. Обращает на себя внимание, однако, совпадение по времени с этим возмущением ОВП землетрясений Святого Носа, Дархата и Каменска (рис. 8а). Магнитные бури как причина ОВП-импульсов уступают место другой причине – деформациям коры.

Далее, возмущения ОВП 02–03-го февраля соответствуют слабому возбуждению

магнитосферы, возмущения ОВП 05–06-го февраля – на относительное понижение Кр, возмущения ОВП 10–12-го и 15–17-го февраля – на длительный интервал слабого возбуждения магнитосферы и возмущение ОВП 20-го февраля – на относительное понижение Кр (рис. 8б). В марте начальные слабые возмущения ОВП 02-го и 03–04-го марта приходятся на пониженное Кр, более сильное возмущение 05–06-го марта – на перепад повышения и снижения Кр (рис. 8в).

Мы приходим к выводу о том, что большинство возмущений ОВП подземных вод в январе – начале марта 2025 г., так же как в начале 2024 г. может объясняться запаздывающими эффектами подземных вод, производными магнитных бурь.

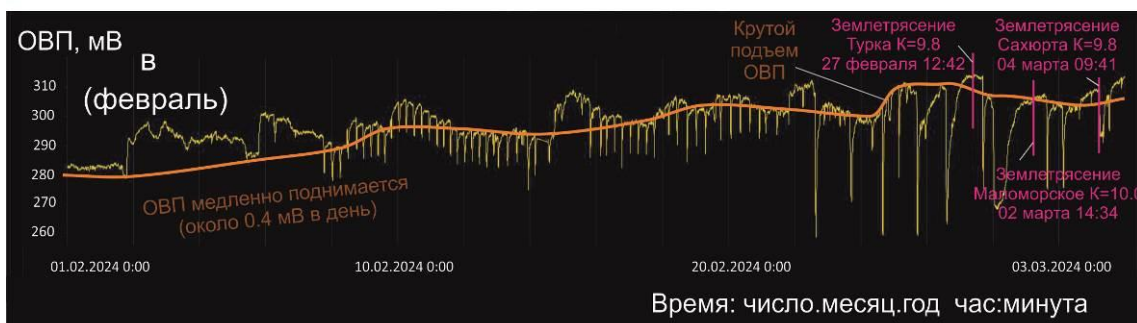
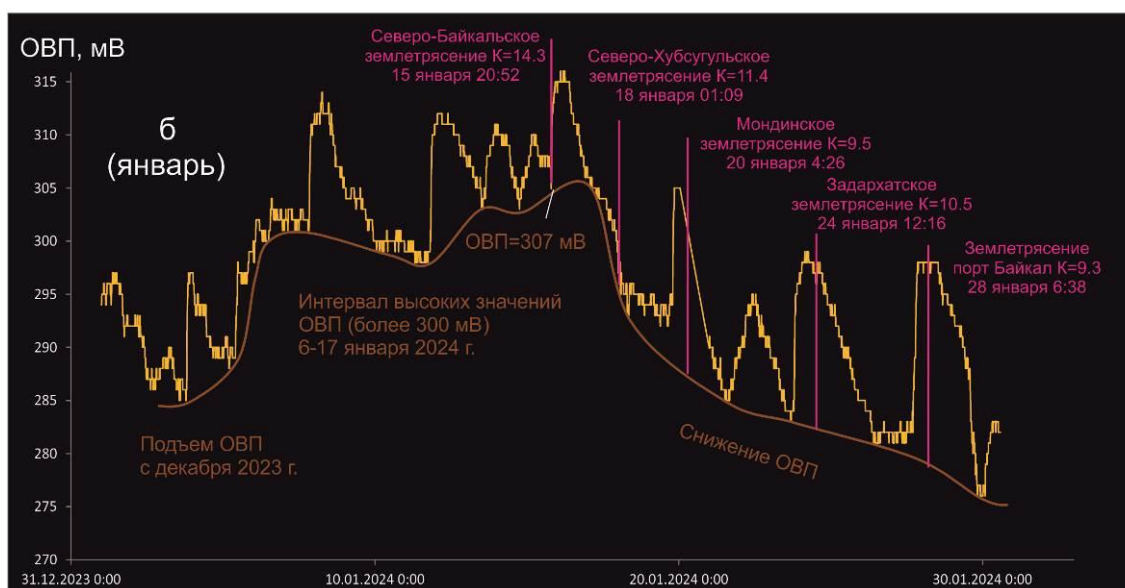
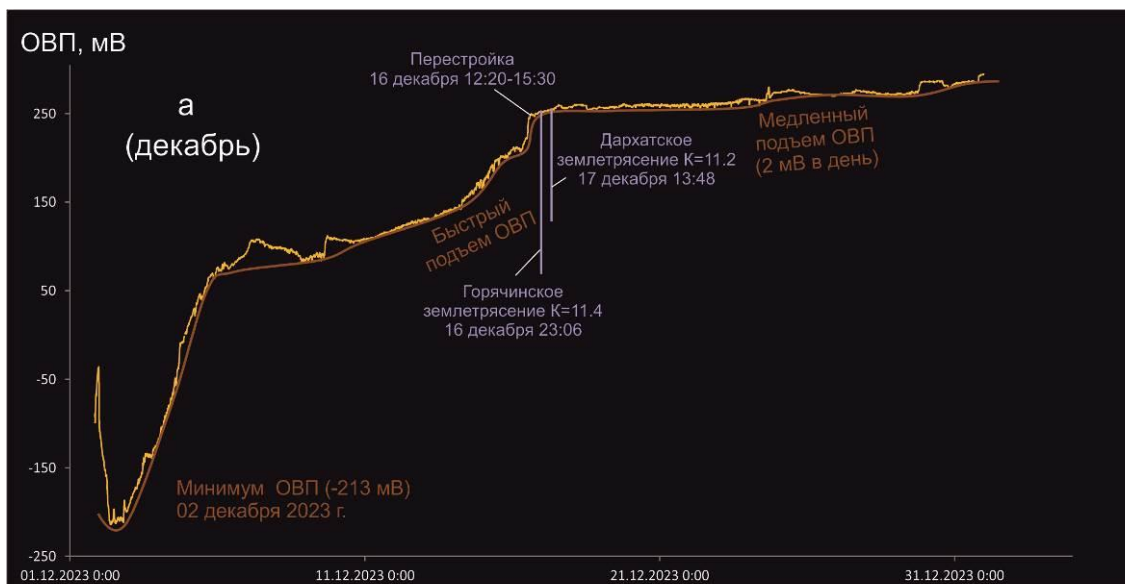
Соотношение ОВП и землетрясений в январе–марте 2024 и 2025 гг.

16 декабря 2023 г. быстрый подъем ОВП ст. 9 сменяется медленным подъемом этого параметра (2 мВ в день). Перестройка ОВП сопровождается Горячинским землетрясением 16 декабря в 23:06 и Дархатским землетрясением 17 декабря в 13:48 (рис. 5а). После продолжительного подъема ОВП выходит на максимум 06–17 января 2024 г. На максимуме ОВП 15 января 2024 г. в 20:52 происходит сильное Северо-Байкальское землетрясение ($K=14.3$). После этого землетрясения ОВП снижается. На фоне снижения ОВП до конца января следуют еще четыре землетрясения.

Весь февраль ОВП ст. 9 медленно поднимается (в среднем на 0.4 мВ в день).

Землетрясения в это время отсутствуют. С 11:00 24 февраля до 07:00 25 февраля значение ОВП возрастает на 13 мВ (с 299 до 312 мВ). Через 2 дня (27 февраля) в 12:42 на Среднем Байкале регистрируется слабое землетрясение Турка, за которым 02–04 марта на Среднем Байкале следуют еще два сейсмических толчка. 04 марта поддерживается повышенное значение ОВП (317 мВ), которое снижается к 06 марта до 296 мВ. В это время происходит Орликское землетрясение, которое по энергетическому классу ($K=10.3$) превышает (хотя и незначительно) все другие землетрясения февраль-мартовского интервала. Остальные три землетрясения (08, 09 и 10 марта) регистрируются на фоне заметного возрастания ОВП, достигающего к 11 марта 340 мВ (рис. 9б–г).

За временной отрезок наблюдений 2024 г. выявляется разный характер вариаций ОВП ст. 9 при землетрясениях: 1) короткий декабрьский сейсмический эпизод сопровождается резкой перестройкой тренда ОВП от крутого подъема к пологому, 2) январский сейсмический интервал, начинающийся сильным Северо-Байкальским землетрясением, сопровождается перестройкой тренда ОВП на максимуме с последующим снижением этого параметра, 3) февраль-мартовский сейсмический интервал, начинающийся группой слабых сейсмических событий Среднего Байкала, сопровождается новой перестройкой тренда ОВП на максимуме с последующим волнообразным снижением и возрастанием значений этого параметра.



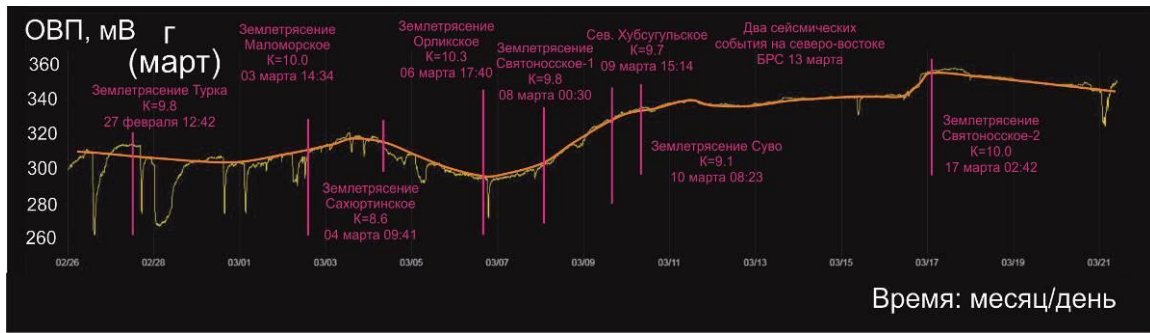


Рис. 9. Вариации ОВП подземных вод ст. 9 с 01 до 31 декабря 2023 г. (а), с 31 декабря 2023 г. до 30 января 2024 г. (б), с 31 января до 05 марта (в) и с 26 февраля до 21 марта 2024 г. (г). На панелях а и б генеральная линия огибает варьирующие значения ОВП снизу, при появлении отрицательных импульсов на панели в – соответствует минимумам значений фона. Пастельно-голубым цветом выделены короткие эпизоды проявления землетрясений, пурпурным – временные интервалы более продолжительных серий. Землетрясения приводятся по данным сайта (Карта..., 2025). Из работы (Рассказов и др., 2024).

Fig. 9. Groundwater ORP variations at station 9 from December 1 to 31, 2023 (a), from December 31, 2023 to January 30, 2024 (b), from January 31 to March 5 (c), and from February 26 to March 21, 2024 (d). In panels a and b, the general line bends around the varying ORP values from below; when negative pulses appear in panel c, it corresponds to the minimal values of the background values. Short episodes of earthquakes are highlighted in pastel-blue; time intervals of longer series are highlighted in purple. Earthquakes are given according to the website (Map..., 2025). After (Rasskazov et al., 2024).

В 2025 г. землетрясение 07 января совпало с минимумом ОВП ст. 9. В течение интервала возмущения ОВП 7–13 января последовало еще два землетрясения на фоне подъема нижней огибающей линии. Землетрясение 23 января случилось между возмущениями ОВП 19–21-го и 24–25-го января. Землетрясения 28 и 29 января приходятся на высокое поднятие огибающей линии ОВП и на интервал между возмущениями ОВП 24–25-го января и 02–03-го февраля 2025 г. Последнее из этих землетрясений было наиболее сильным ($K=11.1$). После него сейсмичность в центральной части БРС утасла. В целом в начале 2025 г. наблюдается низкая сейсмическая активность, по сравнению с сейсмической активностью в начале 2024 г. Возможно, поэтому в 2024 и 2025 гг. прослеживается разный характер соотношений землетрясений с ОВП. В 2024 г. сильное землетрясение 15 января произошедшее при максимуме ОВП, начало серию землетрясений, произошедших на фоне снижения ОВП. В 2025 г., землетрясение 07 января, произошедшее на минимуме ОВП, начало серию землетрясений на фоне возрастания ОВП. Произошедшие изменения в характере соотношений землетрясений с ОВП в 2024 и 2025 гг. будут учитываться в

последующих интерпретациях данных мониторинга.

Заключение

Приведены результаты наблюдений ОВП в подземных водах двух скважин Култукского полигона берега Байкала в режиме реального времени с января до начала марта 2025 г. В январе и феврале выявлены возмущения ОВП, запаздывающие относительно магнитных бурь. В начале марта установлены три последовательно усиливающихся импульса. Механизм ОВП-возмущений, следующих после магнитных бурь, проявился и в начале 2024 г., и в начале 2025 г.

30-дневный контроль ОВП-импульсов лунно-солнечными приливами, выявленный в начале 2024 г., в начале 2025 г. не проявился. В соотношениях землетрясений с ОВП в январе–марте 2024 и 2025 гг. также не соблюдается постоянства. Очевидно, что контролирующая роль этих факторов может иметь решающее значение в рамках ограниченных временных интервалов. Смена контролирующего фактора ведет к установлению новых закономерностей в развитии процесса. Механизмы лунно-солнечных приливов и деформаций коры, сопровождающихся землетрясениями, проявились в

начале 2024 г., но в начале 2025 г. не были достаточно сильными, чтобы контролировать ОВП-импульсы. Смена этих соотношений в 2024–2025 гг. может быть связана с деформациями коры, сопровождающимися относительным снижением сейсмической активности в центральной части Байкальской рифтовой системы.

Перспективы использования результатов

Полученные результаты мониторинга ОВП в режиме реального времени свидетельствует об отсутствии повторяемости процессов, вызываемых лунно-солнечными приливами и деформациями коры, сопровождающимися землетрясениями в начале 2024 и в начале 2025 гг. Эти процессы развиваются с течением времени при переходе процессов земной коры в новое качество. Произошедшие изменения в характере соотношений землетрясений с ОВП имеют практическое приложение. Временные изменения деформаций коры должны будут учитываться в последующих интерпретациях данных гидрогеохимического мониторинга.

Благодарности

Работа выполнена в рамках гранта № 075-15-2024-533 Министерства науки и высшего образования РФ на выполнение крупного научного проекта по приоритетным направлениям научно-технологического развития (проект «Фундаментальные исследования Байкальской природной территории на основе системы взаимосвязанных базовых методов, моделей, нейронных сетей и цифровой платформы экологического мониторинга окружающей среды»). 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/>). (Карта..., 2025).

Литература

Асламов И.А., Рассказов С.В., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Генерация ОВП-импульсов в подземных водах побережья Байкала в феврале-марте 2024 г.: 30-суточный мониторинг в режиме реального времени от зарождения до угасания // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 77–89. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.77>

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский Филиал Геофизической Службы, 2025. <http://www.seis-bykl.ru>

Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Первый опыт мониторинга косейсмических и асейсмических вариаций ОВП, pH и температуры подземных вод Култукского резервуара в режиме реального времени (Байкальская рифтовая система) // Геология и окружающая среда. 2023а. Т. 3, № 4. С. 161–181. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.161>

Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Мониторинг окислительно-восстановительного потенциала подземных вод в режиме реального времени на Култукском полигоне в конце 2023 – начале 2024 гг.: сопоставление электрических эффектов с землетрясениями в центральной части Байкальской рифтовой системы // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 42–60. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42>

Снопков С.В., Рассказов С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Экспресс-анализ проявления квазипериодических импульсов окислительно-восстановительного потенциала подземных вод берега Байкала при мониторинге в режиме реального времени (07–14 февраля 2024 г.) // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 61–76. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.61>

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Архипенко В.И., Ильясова А.М. Серия ОВП-импульсов подземных вод побережья Байкала 20–27 марта 2024 г.: вероятная связь с магнитными бурями // Геология и окружающая среда. 2024. Т. 4, № 1. С. 90–97. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.90>

Чипизубов А.В., Смекалин О.П. Палеосейсмодислокации и связанные с ними палеоземлетрясения по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.

https://xras.ru/magnetic_storms.html

<https://world-weather.ru/pogoda/russia/kultuk/february-2024/>

References

Aslamov I.A., Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Generation of ORP pulses in groundwater along the coast of Lake Baikal in February-March 2024: 30-day real-time monitoring from inception to extinction // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 77–89. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.77>

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M. Series of ORP pulses of groundwater along the coast of Lake Baikal on March 20–27, 2024: probable connection with magnetic storms // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 90–97. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.90>

Chipizubov A.V., Smekalin O.P. Paleoseis-modislocations and related paleoearthquakes at the Main Sayan Fault zone // *Russian Geology and Geophysics*. 1999. V. 40, No. 6. P. 936–937.

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Geophysical Service, 2025. <http://www.seis-bykl.ru>

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. The first experience of monitoring coseismic and aseismic variations of ORP, pH, and temperature of groundwater in the Kultuk reservoir in real time (Baikal rift system) // *Geology and Environment*. 2023a. Vol. 3, No. 4. P. 161–181. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.161>

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Monitoring the redox potential of groundwater in real time at the Kultuk area in late 2023 – early 2024: comparison of electrical effects with earthquakes in the central part of the Baikal rift system // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 42–60. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42>

Snopkov S.V., Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Express analysis of the manifestation of quasi-periodic pulses of the oxidation-reduction potential of groundwater on the shore of Lake Baikal during real-time monitoring (February 7–14, 2024) // *Geology and Environment*. 2024. Vol. 4, No. 1. Pp. 61–76. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.61>

https://xras.ru/magnetic_storms.html

<https://world-weather.ru/pogoda/russia/kultuk/february-2024/>

email: rassk@crust.irk.ru

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

заведующий кафедрой динамической геологии,

664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov Sergei Vasilievich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664003 Irkutsk, Lenin st., 3,

Irkutsk State University, Faculty of Geology,

Head of Dynamic Geology Char,

664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,

Institute of the Earth's Crust SB RAS,

Head of Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,

tel.: (3952) 51–16–59,

Асламов Илья Александрович,

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,

664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,

Лимнологический институт СО РАН,

email: ilya_aslamov@bk.ru

Aslamov Ilya Aleksandrovich,

Candidate of physical and mathematical sciences, Senior Researcher,

664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,

Limnological Institute SB RAS,

старший научный сотрудник,

email: ilya_aslamov@bk.ru

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

доцент,

664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,

*Иркутский национальный исследовательский технический университет, Сибирская школа геонаук, ведущий научный сотрудник,
email: snopkov_serg@mail.ru*

Snopkov Sergey Viktorovich,

*Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, assistant professor,
664003 Irkutsk, Lenin st., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
664074, Irkutsk, st. Kurchatova, 3,
Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences,
Leading Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru*

Архипенко Владислав Иванович,

*главный специалист по электронике,
664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
email: vladarxip@gmail.com,*

Arkhipenko Vladislav Ivanovich,

*main electronics engineer,
664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: vladarxip@gmail.com*

Ильясова Айгуль Маратовна,

*кандидат геолого-минералогических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,*

*Институт земной коры СО РАН,
ведущий инженер,*

email: ila@crust.irk.ru

Ilyasova Aigul Maratovna,

*candidate of geological and mineralogical sciences,
leading engineer,
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
email: ila@crust.irk.ru*

Чебыкин Евгений Павлович,

*кандидат химических наук,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
старший научный сотрудник,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
ведущий специалист,
email: epcheb@yandex.ru*

Chebykin Eugene Pavlovich,

Candidate of Chemical Sciences, Leading Specialist,

*664033, Irkutsk, st. Lermontova, 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Senior Researcher,
664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,
Limnological Institute SB RAS,
email: epcheb@yandex.ru*