

МОНИТОРИНГ ПРИРОДНЫХ ПРОЦЕССОВ

УДК 550.844+546.791.027+632.126

<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2026.2.21>EDN: [MFMHEI](#)

Мониторинг окислительно-восстановительного потенциала подземных вод в 2024–2026 гг.: снижение пьезоэлектрических эффектов ледовых покровов оз. Байкал или потеря чувствительности приема сигналов?

С.В. Рассказов^{1,2}, И.А. Асламов³, С.В. Снопков^{2,4}, Е.П. Чебыкин¹, А.М. Ильясова¹¹Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия²Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия³Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация. Выполнен сравнительный анализ записей окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) подземных вод Култукского полигона в ледоставы Байкала 2024, 2025 и 2026 гг. В вариациях ОВП января-марта 2024 г. выявлены отчетливые пьезоэлектрические эффекты, наблюдавшиеся в виде регулярных ОВП-минимумов, сопровождавших деформации ледового покрова озера. Во время ледостава января-апреля 2025 г. в записях ОВП установлены только редкие ОВП-минимумы, а во время ледостава января-апреля 2026 г. зарегистрированы два осложнения записей, связанные с деформацией ледового покрова: резкое снижение значений ОВП в начале (26 января) и единственный глубокий минимум в конце (13 апреля). Выявлена зависимость проявления вариаций ОВП, соответствующих пьезоэлектрическим эффектам льда, от сейсмогенных деформаций в коре Байкальской рифтовой системы (БРС) и магнитных бурь, хотя не исключена возможность исчезновения минимумов ОВП в записях 2025–2026 гг. вследствие нарушения чувствительности приема сигналов сенсором.

Keywords: подземные воды, мониторинг, окислительно-восстановительный потенциал, землетрясения, Байкал

Groundwater Oxidation-Reduction Potential Monitoring 2024–2026: Reduction of Piezoelectric Effects of Lake Baikal Ice Covers or Loss of Signal Reception Sensitivity?

S.V. Rasskazov^{1,2}, I.A. Aslamov³, S.V. Snopkov^{2,4}, E.P. Chebykin¹, A.M. Ilyasova¹¹Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

Статья получена: 05.07.2026; исправлена: 16.07.2026; принята: 17.07.2026.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П., Мониторинг окислительно-восстановительного потенциала подземных вод в 2024–2026 гг.: снижение пьезоэлектрических эффектов ледовых покровов оз. Байкал или потеря чувствительности приема сигналов? // Геология и окружающая среда. 2026. Т. 6, № 2. С. 21–34. DOI 10.26516/2541-9641.2026.2.21. EDN: MFMHEI

Article received: 05.07.2026; corrected: 16.07.2026; accepted: 17.07.2026.

FOR CITATION: Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Groundwater oxidation-reduction potential monitoring 2024–2026: Reduction of piezoelectric effects of Lake Baikal ice covers or loss of signal reception sensitivity? // Geology and Environment. 2026. Vol. 6, No. 2. P. 21–34. DOI 10.26516/2541-9641.2026.2.21. EDN: MFMHEI

²Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

³Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. A comparative analysis of the oxidation-reduction potential (ORP) records of groundwater in the Kultuk area during the 2024, 2025, and 2026 Baikal freeze-ups was performed. Distinct piezoelectric effects were revealed in the ORP variations in January–March 2024, observed as regular ORP minima accompanying the deformations of the lake ice cover. During the January–April 2025 freeze-up, only rare ORP minima were revealed in the ORP records, and during the January–April 2026 freeze-up, two complications in the records associated with ice cover deformations were recorded: a sharp decrease in ORP values at the beginning (January 26) and a single deep minimum at the end (April 13). A dependence of ORP variations corresponding to the piezoelectric effects of ice on seismogenic deformations in the crust of the Baikal Rift System (BRS) and magnetic storms has been revealed, although the possibility of the disappearance of ORP minima in the records of 2025–2026 due to a violation of the sensitivity of signal reception by the sensor cannot be ruled out.

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

Введение

На Култукском полигоне Байкальской рифтовой системы (БРС) установлены два сенсора, регистрирующие окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) подземных вод, pH и температуру в режиме реального времени. Один сенсор (ст. 9, Земляничная) установлен в водозаборной скважине на Обручевском разломе, другой (ст. 184, Школьная) – в водозаборной скважине на Култукской тектонической ступени осевой части Байкальской рифтовой зоны (Рассказов и др., 2023). Основная задача мониторинга подземных вод заключается в оперативной оценке сейсмогенного состояния коры БРС по вариациям ОВП подземных вод.

После экспериментальных и теоретических работ по пьезоэлектрическим эффектам в кварце и других минералах как результата распространения сейсмических волн (Волярович, Пархоменко, 1954; Волярович, Соболев, 1965, 1969), теоретически предлагалось использовать для прогноза землетрясений наблюдения ОВП подземных вод (Balk et al., 2009; Bleier et al., 2010; Freund, 2013). В качестве причины изменения электрохимических параметров подземных вод предполагалось проявление пероксидных дефектов, существующих в структурах породообразующих минералов (кварца), с развитием электрохимических процессов при ведущей роли подземных вод в качестве электролита. Согласно теории, обычные магматические и метаморфические породы содержат спящие дефекты кристаллической структуры, которые при механическом напряжении высвобождают носители электронного заряда. Таким образом, порода представляет собой электрический аккумулятор. Носителями заряда в кварцевых породах являются дефектные электроны,

известные как «положительные дыры» – электронные состояния, связанные с O^- в матрице O^{2-} . Дефектные электроны перемещаются по градиентам напряжений на расстояния порядка метров в лабораторных экспериментах и километров в полевых условиях. На границе раздела порода–вода дефектные электроны порождают высокоактивные радикалы кислорода, которые окисляют воду (H_2O) до перекиси водорода (H_2O_2). При этом на каждые два носителя заряда образуется одна молекула H_2O_2 . В лабораторных экспериментах электрическая цепь замыкалась путем прокладки медного проводника от нагруженной породы к ненапряженной. В естественных условиях замыкание цепи может быть обеспечено за счет электролитической проводимости подземных вод (Balk et al., 2009).

На практике использование мониторинга для прогноза землетрясений, однако, до сих пор не реализовано. На Култукском полигоне измерения проводятся 3 года. Регистрации сейсмогенных деформаций коры по вариациям ОВП мешают деформации ледового покрова оз. Байкал. Каждый год озеро покрывается льдом. С приходом весны и возрастанием температуры воздуха лед расширяется и деформируется. ОВП-записи эффектов, сопровождающих деформации льда, можно принять за сигналы сейсмогенных деформаций коры.

Сенсор ст. 9 находится в скважине, приблизительно, на уровне зеркала озера, поэтому вариации ОВП в ее водах весьма чувствительны к пьезоэлектрическим эффектам, связанным с деформациями ледового покрова Байкала, тогда как сенсор ст. 184 находится на 20 м выше уровня Байкала, поэтому пьезоэлектрические эффекты на этой станции не регистрируются. На ст. 9 установлены

существенные различия ОВП-записей ледоставов 2024, 2025 и 2026 гг. Возникает вопрос о причинах различий. Во время каждого ледостава могло эпизодически включаться влияние различных факторов, отразившихся в вариациях ОВП, таких как магнитные бури, усиление и ослабление сейсмичности и вариации толщины ледового покрова. Возможно, были и другие (в том числе, технические) причины, вызывавшие искажения записей.

Цель настоящей статьи – провести сравнительный анализ различий ОВП-эффектов подземных вод, связанных с деформациями ледового покрова в 2024, 2025 и 2026 гг. и определить вероятные причины этих различий.

Сравнительный анализ результатов ОВП-записей в ледоставы 2024-2026 гг.

Выражение пьезоэлектрических эффектов в записях ОВП

В записях ОВП ст. 9 в 2024 г. наблюдались весьма отчетливые минимумы ОВП, вызванные пьезоэлектрическими эффектами деформаций ледового покрова озера. Электрический характер эффектов был выявлен в самом начале их появления 07–14 февраля 2024 г. (Снопков и др., 2024) (рис. 1а).

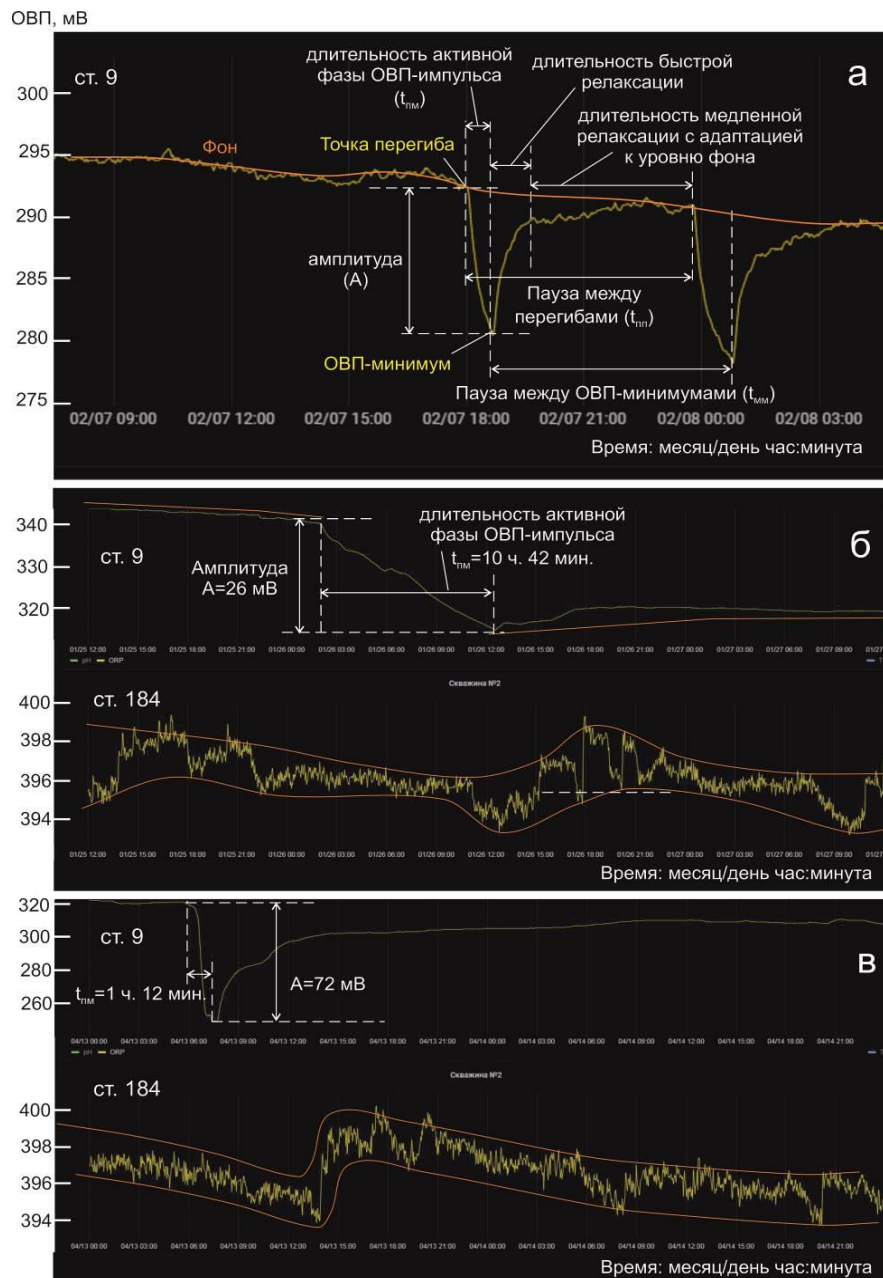


Рис. 1. Сопоставление ОВП-записей ст. 9 с проявлением пьезоэлектрических эффектов во время ледоставов 2024 и 2026 гг. а – характеристические параметры отчетливо выраженных

повторяющихся минимумов ОВП в 2024 г. (рисунок выполнен на основе графика, полученного в режиме реального времени в начале появления ряда импульсов 07–08 февраля 2024 г.) (Снопков и др., 2024); *б* – падение ОВП ст. 9 26 января в начале ледостава 2026 г.; *в* – импульс ОВП ст. 9 13 апреля в конце ледостава 2026 г. Для сравнения на панелях *б* и *в* приводятся записи одно-временных вариаций ОВП ст. 184 без признаков пьезоэлектрических эффектов. Здесь и далее значения ОВП, полученные на хлор-серебряном катоде прибора, приблизительно на 200 мВ выше Eh (значения, нормированного к водороду)

Fig. 1. Comparison of ORP records from station 9 with the manifestation of piezoelectric effects during the ice formations of 2024 and 2026. *a* – characteristic parameters of repeating ORP minima in 2024. The figure is based on a graph obtained in real-time monitoring at the beginning of the appearance of a series of pulses (February 07–08, 2024) (Snopkov et al., 2024). *б* – drop in ORP at station 9 on January 26 at the beginning of freeze-up in 2026; *в* – ORP pulse at station 9 on April 13 at the end of freeze-up in 2026. For comparison, panels *б* and *в* show records of simultaneous ORP variations at station 184 without signs of piezoelectric effects. From here on, the ORP values, obtained on the silver-chloride cathode of the device are approximately 200 mV higher than Eh (the value normalized to hydrogen)

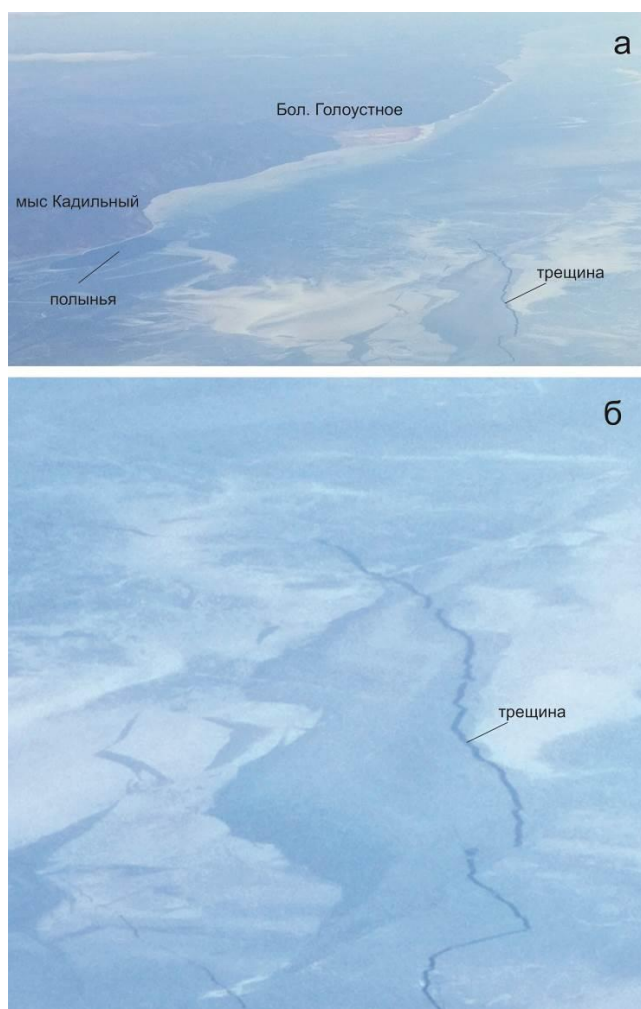


Рис. 2. Снимки протяженной трещины во льду оз. Байкал. *a* – пространственное соотношение северного окончания трещины с пос. Большое Голоустное и мысом Кадильный; *б* – более детальный вид трещины. Снимки сделаны 17 апреля 2026 г. с Трещина могла образоваться 13 апреля. Образование трещины отразилось в снижении ОВП ст. 9 на 72 мВ (см. рис. 1б)

Fig. 2. Images of a long crack in the ice of Lake Baikal. *a* – spatial relationship between the northern end of the crack with the village of Bolshoe Goloustnoye and Cape Kadilny; *б* – more detail view of the crack. Images were taken on April 17, 2026. The crack may have formed on April 13. The formation of the crack was reflected in a decrease in the ORP at station 9 by 72 mV (see Fig. 1б)

В 2026 г. лед оз. Байкал встал в районе Култука 18 января. Каких-либо особых эффектов, подобных эффектам ледостава 2024 г., в записях ст. 9 не наблюдалось вплоть до 26 января 2026 г., когда в 05 ч. 51 мин. линия ОВП-записей резко пошла вниз (рис. 16). Это падение ОВП было единственным проявлением пьезоэлектрического эффекта в начале ледостава 2026 г. (Рассказов и др., 2026а). Снижение ОВП 13 апреля от 322 до 250 мВ в записях ст. 9 отражает единственный (весьма значительный) пьезоэлектрический эффект в конце ледостава. Линия ОВП 13 апреля отличается по конфигурации от линии 26 января на порядок меньшей длительностью падения ОВП и наличием восходящей ветви после достижения минимума. Конфигурация линии ОВП 13 апреля в общем подобна конфигурации регулярных минимумов ОВП в феврале–марте 2024 г. (рис. 1а,в).

17 апреля 2026 г., около 12 часов дня, с пассажирского самолета было сделаны снимки трещины, протянувшейся на 1–2 сотни км при расхождении ее бортов на десятки и сотни метров. Стволовая трещина ледового покрова образовалась южнее пос. Бол. Голоустное. Напротив мысов Бол. и Мал. Кадильные наблюдалась обширная полынья (рис. 2).

Общее различие записей ОВП во время ледоставов Байкала в 2024, 2025 и 2026 гг.

По результатам мониторинга ст. 9 в 2024 г. пьезоэлектрические эффекты, обусловленные пьезоэлектрическими эффектами деформаций ледового покрова озера, вписались в 30-суточную активность импульс-генерирующего процесса, который регулировался с 07 февраля до 07 марта квадратурными и сизигийными лунно-солнечными приливами (Асламов и др., 2024). С учетом геометрических характеристик отдельных импульсов – амплитуды ОВП (A) и паузы между импульсами ($t_{пп}$ и $t_{мм}$) – последовательность ОВП-импульсов разделилась на 4 интервала. При вступлении импульс-генерирующего процесса 07 февраля значения A составляли около 10 мВ, в середине февраля – менялись от 5 до 20 мВ, а в конце февраля – от 2 до 50 мВ. В начале марта амплитуда импульсов сократилась. С изменением амплитуды сменились межимпульсные паузы. При вступлении импульс-генерирующего процесса 07 февраля паузы составляли около 6 ч. В течение суток регистрировалось 4 импульса. Затем размах пауз изменился; одни импульсы сократились, другие стали более продолжительными (рис. 3).



Рис. 3. Полный ряд ОВП-импульсов подземных вод ст. 9 в интервале 07 февраля – 07 марта 2024 г., включительно. Арабскими цифрами 1, 27, 55 и 80 показаны номера начальных импульсов интервалов. Детальный анализ ОВП-записей этого временного интервала приведен в работе (Асламов и др., 2024)

Fig. 3. Complete series of ORP pulses of groundwater at station 9 in February 7 – March 7, 2024. Arabic numerals 1, 27, 55, and 80 indicate the numbers of the initial pulses in the intervals. Detail analysis of ORP records of this time interval is presented in (Aslamov et al., 2024)

С одной стороны, если провести аналогию между глубокими ОВП-минимумами и сильными деформационными событиями деформации ледового покрова, то получаются посуточные интервалы (25 ч. 52 мин. и 24 ч. 36 мин.), превышающие максимальную

оценку перерыва между генерацией становых трещин в отдельно взятом районе Байкала (15 ч.) (Ружич и др., 2009). С другой стороны, во время кульминационного интервала IIIб между глубокими минимумами под номерами 55–63 в течение суток произошло до

семи малых импульсов. Паузы между ними (в основном от 1 ч 34 мин до 3 ч 22 мин) можно сопоставить с паузами между ледовыми ударами 3 и 5 марта 2013 г., зарегистрированными с четырьмя преобладающими периодами, имеющими продолжительностью более 2000 секунд, максимальный из которых составил 8775 сек (или 2 час. 46 мин. 15 сек.). Эти колебания характеризовались как показательные для вариаций тектонических напряжений льда между главными ледовыми ударами (Борняков и др., 2016).

После завершения цикла вариаций ОВП-импульсов 07 февраля–07 марта 2024 г.,

сопровождаящих полный сизигийно-квадатурный цикл лунно-солнечных приливов, наступило время, в течение которого ОВП-импульсы отсутствовали. Единичный импульс с амплитудой (А) 11 мВ проявился 15 марта. Слабые возмущения в виде более слабых сдвоенных минимумов наблюдались 16 и 18 марта. Регулярно-повторявшиеся весьма глубокие минимумы на графике ОВП начались 20 марта и закончились 27 марта (рис. 4). Эти ОВП-эффекты сопровождали магнитную бурю и отчетливо зависели от характера возмущения магнитосферы (Чебыкин и др., 2024).

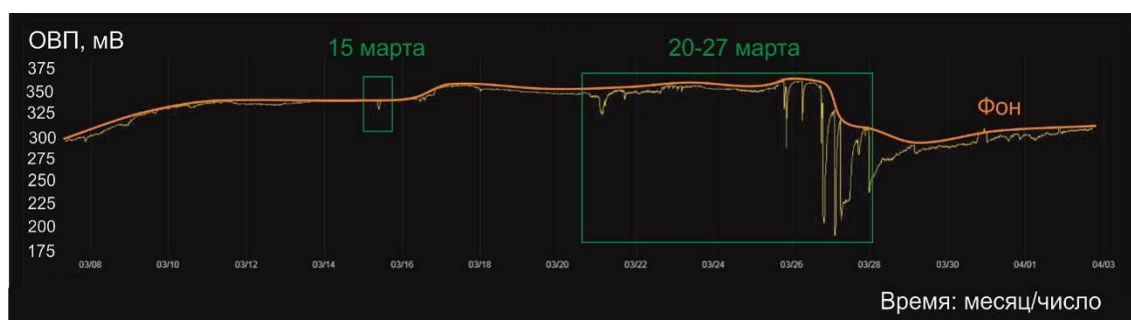


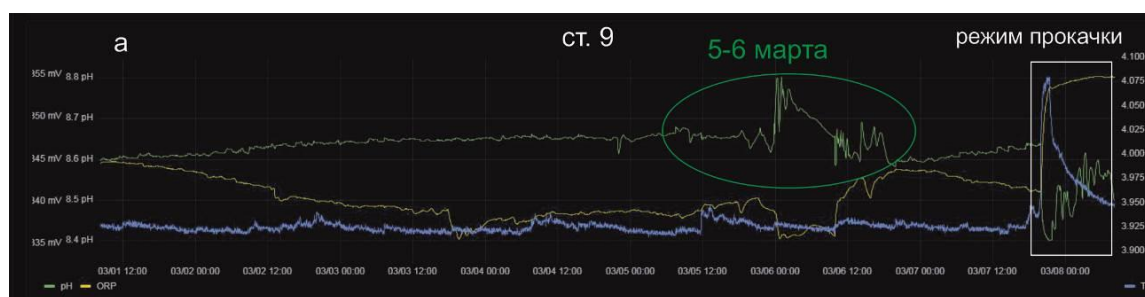
Рис. 4. Изменение ОВП подземных вод ст. 9 в марте 2024 года. Генерируется единичный небольшой ОВП-минимум 15 марта и серия весьма глубоких ОВП-минимумов 20–27 марта 2024 г. Детальный анализ ОВП-записей этого временного интервала приведен в работе (Чебыкин и др., 2024)

Fig. 4. Variation of the ORP in March 2024 at station 9. A series of pulses on 20–27 March 2024 and a single pulse on 15 March are marked. Detail analysis of the ORP records for this time interval is given in (Chebykin et al., 2024)

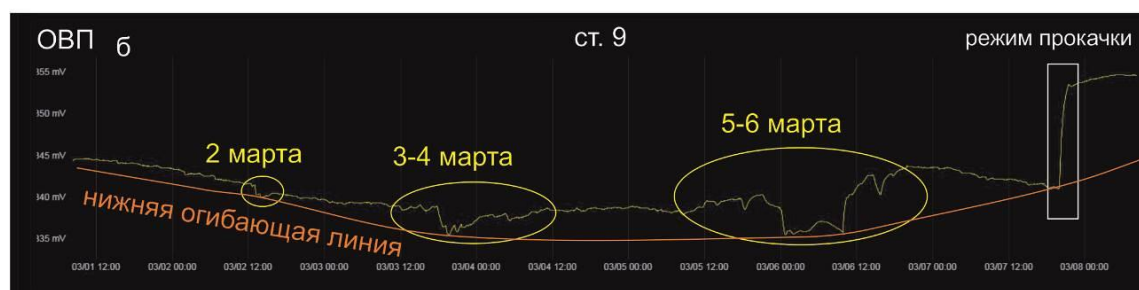
В начале марта 2025 г. проявилось последовательное усиление возмущений ОВП подземных вод ст. 9. С 1 по 8 марта наблюдались три возмущения: 2-го, 3–4-го и 5–6-го марта (рис. 5б). Первое из них было слабым. Оно началось в 12 ч 46 мин (ОВП=342 мВ) с выходом на минимум ОВП в 14 ч 08 мин (ОВП=340 мВ) с последующей релаксацией. Второе возмущение было сильнее: началось 3 марта в 17 ч 42 мин (ОВП=339 мВ) и вышло на минимум ОВП в 19 ч 32 мин (ОВП=336 мВ). 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 мВ) и после продолжительных колебаний вышло на минимум 06 марта в 00 ч 52 мин (ОВП=336 мВ). Низкие значения ОВП сохранялись до 09 ч 34 мин. После поднятия до значения ОВП=343 мВ, последовал еще

один минимум в 15 ч 44 мин (ОВП=340 мВ) с последующим выходом на плато без заметных колебаний (Рассказов и др., 2025).

Возмущения ОВП 2-го и 3–4-го марта 2025 г. не сопровождалось изменениями рН и температуры, тогда как более сильное возмущение ОВП 5–6-го марта ассоциировались с колебаниями рН с выходом этого параметра на максимум (заметных изменений температуры не наблюдалось). Следовательно, два предшествующих эпизода возмущений ОВП можно считать как предваряющие событие, произошедшее 5–6-го марта. Прокачка скважины 7 марта с 20 ч 00 мин до 21 ч 20 мин сопровождалась понижением рН и возрастанием температуры (рис. 5а). Сигналы прокачки как артефакты явно отличались от природных сигналов ОВП, проявившихся со 2-го до 6-го марта.



Время: месяц / день



Время: месяц / день

Рис. 5. Графики наблюдений 1–8 марта 2025 г. подземных вод ст. 9: а – ОВП, pH и температуры; б – ОВП

Fig. 5. Graphs of observations groundwater at station 9 for March 1–8, 2025: а – ORP, pH, and temperatures; б – ORP

На рис. 6а приведены ОВП-записи с 01 января до 06 апреля 2024 г. Записи апреля ограничены датой проведения калибровки сенсора, нарушившей наблюдения. Акцентируя на временных интервалах 07 февраля – 07

марта и 20–27 марта в ледостав 2024 г., нужно подчеркнуть главенство проявления пьезоэлектрических эффектов ледового покрова в первом интервале и магнитной бури – во втором.

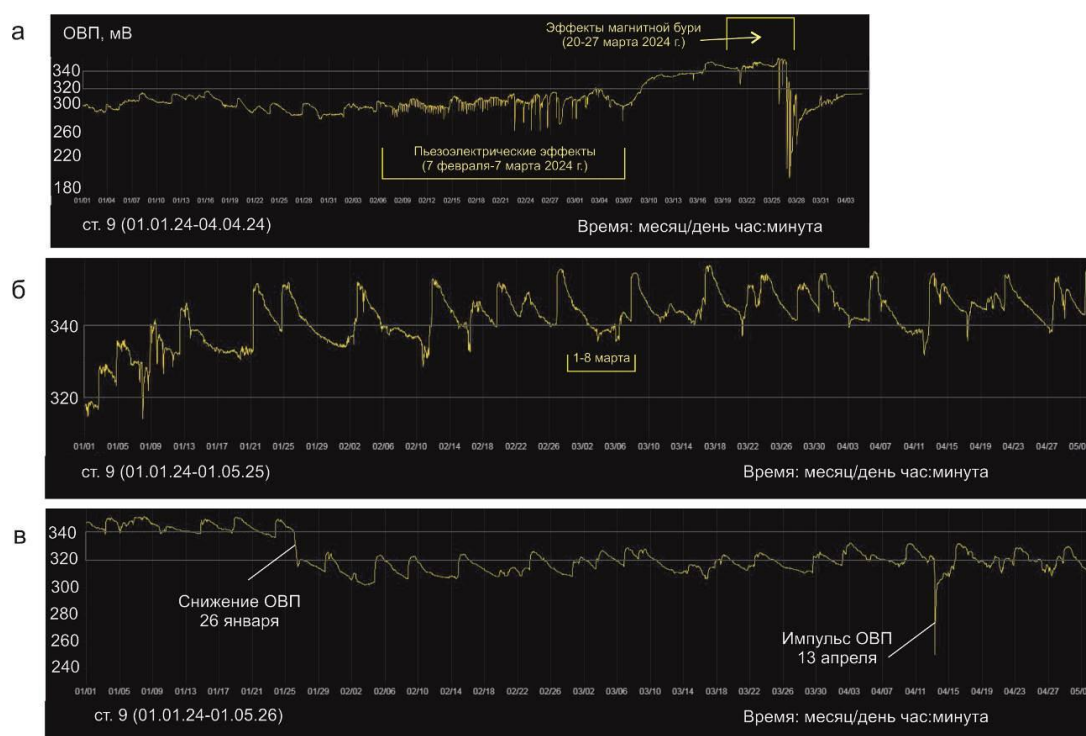


Рис. 6. Сопоставление ОВП-записей с проявлением пьезоэлектрических эффектов льда во время ледоставов 2024 (а), 2025 (б) и 2026 (в) гг. Панели а, б и в совмещены по времени года. Из-за больших амплитуд вариаций ОВП, шкала ординаты панели 2024 г. сжата. Для сопоставления шкал ординат графиков на каждом из них проведены линии значений ОВП 320 и 340 мВ. В начале ледостава 2024 г. значения ОВП не превышают 300 мВ. В этих условиях 7 февраля–7 марта проявляются повторяющиеся минимумы ОВП, отражающие пьезоэлектрические эффекты ледового покрова, и 20–27 марта – повторяющиеся минимумы ОВП как отклики магнитной бури. Ледостав 2025 г. ограничивается малыми амплитудами ОВП при повышенных значениях (интервал 330–350 мВ). Пониженные значения ОВП начала показанного ряда связаны с профилактикой станции, во время которой проводилась калибровка сенсора по стандартным растворам. В начале ледостава 2026 г. ОВП превышает 240 мВ, но 26 января значения ОВП снижаются до 320 мВ. В течение последующего ледостава значения ОВП остаются приблизительно на этом же уровне с проявлением единственного глубокого минимума 13 апреля

Fig. 6. Comparison of ORP records with the displaying piezoelectric effects of ice during freeze-ups in 2024 (a), 2025 (b), and 2026 (c). Panels a, b, and c are combined by season. Due to the large amplitudes of ORP variations, the ordinate scale of the 2024 panel is compressed. To compare the ordinate scales of the graphs, lines of ORP values of 320 and 340 mV are drawn on each of them. At the beginning of the freeze-up in 2024, ORP values do not exceed 300 mV. Under these conditions, on February 7–March 7, repeating ORP minima appear, reflecting the piezoelectric effects of the ice cover, and on March 20–27, repeating ORP minima appear as responses of a magnetic storm. The freeze-up in 2025 is limited by small ORP amplitudes at elevated values (interval 330–350 mV). The reduced ORP values at the beginning of the shown series are associated with station maintenance, during which the sensor was calibrated using standard solutions. At the beginning of the freeze-up of 2026, ORP exceeds 240 mV, but on January 26, ORP values decrease to 320 mV. During the subsequent freeze-up, ORP values remain approximately at the same level with the appearance of a single deep minimum on April 13

В феврале-марте 2025 г. ОВП-эффектов с электрической конфигурацией линии, подобных эффектам в записях 2024 г. ст. 9, не наблюдалось. 30-дневный контроль ОВП-импульсов лунно-солнечными приливами, выявленный в 2024 г., в 2025 г. также не проявился. В январе и феврале 2025 г. имели место возмущения ОВП, запаздывающие относительно магнитных бурь. Три последовательно усиливавшихся импульса этого типа проявились в начале марта 2025 г. (рис. 6б).

Обращает на себя внимание относительное возрастание ОВП ст. 9, произошедшее за 3 года. Множество пьезоэлектрических импульсов 2024 г. проявилось на этой станции в интервале сравнительно низких начальных значений ОВП (280–295 мВ) (рис. 6а), тогда как при возрастании ОВП до интервала 320–350 мВ в 2026 г. импульсы отсутствовали. Единичный импульс 13 апреля начался с точки перегиба 322 мВ (образовался минимум 250 мВ при восстановлении линии после минимума), но при начальном снижении ОВП от 350 мВ линия записи не восстановилась (рис. 6в).

Обсуждение результатов

Процессы деформации льда изучались временными станциями непрерывного мониторинга, на которых в течение коротких временных интервалов (недели, первые месяцы) регистрировались деформации ледового покрова непосредственно установленными на нем датчиками (Ружич и др., 2009; Борняков и др., 2016; Bornyakov et al., 2025). Ст. 9 находилась на берегу, обеспечивая непрерывную информацию о вариациях ОВП в течение трех лет, включая ледоставы. Раз в год сенсоры вынимались из скважины и проводилась калибровка их измерений по стандартным растворам.

В качестве факторов, отразившихся в изменении ОВП-записей подземных вод ст. 9, во время ледоставов 2024–2026 гг. рассматриваются: 1) изменение приема сигнала сенсором, 2) состояние магнитосферы 3) смена сейсмической активности и 4) состояние атмосферы (температура воздуха).

Изменение приема сигнала сенсором

Отчетливое проявление пьезоэлектрических сигналов в ОВП-записях ледостава 2024

г. и их исчезновение в последующие два года может быть следствием нарушения чувствительности приема сигналов сенсором. Диаметр обсадной трубы скважины 30 см. Сенсор подвешен на кабеле в центре трубы. Чувствительность сенсора могла измениться из-за смены его положения в обсадной трубе скважины после профилактики и калибровки.

При установке сенсора ст. 9 в 18:00 01 декабря 2023 г. на ст. 9 сначала наблюдалось относительное возрастание ОВП с выходом на максимум (-37.3 мВ) в тот же день в 23:20. Затем, 02 декабря, к 8:20 ОВП снизилось до -210 мВ и оставалось на отрицательных значениях -207 – -212 мВ до 19:30. С этого времени значения ОВП в целом возрастали в течение декабря 2023 г. и первой половины января 2024 г., до Северо-Байкальского землетрясения, произошедшего 15 января (Рассказов и др., 2023, 2024). На ст. 184 ОВП возрастало сразу после включения сенсора. При профилактических работах и калибровках 2024 и 2025 гг. на обеих станциях ОВП начинали расти сразу после включения сенсоров.

В 2024 г. сенсор мог находиться в оптимальных условиях обеспечивших высокую чувствительность измерений ОВП. В 2024 г. окошко считывания сигнала сенсора могло находиться вблизи обсадной трубы, что способствовало умножению сигнала. О таком положении сенсора свидетельствовало образование ржавчины на его поверхности со стороны окошка считывания сигнала, обнаруженное во время его профилактики и калибровки 5 ноября 2024 г. После профилактики положение сенсора в скважине изменилось, что могло повлечь за собой снижение его чувствительности. В 2025–2026 гг. сенсор был помещен в середину обсадной трубы, поэтому сигналы оказались слабее.

Чувствительность сенсора в какой-то мере могла снизиться также из-за чрезмерного микробиального покрытия поверхности окошка считывания сигнала. Существует также вероятность того, что с заменой картриджа сенсора в ледостав 2027 г. его чувствительность будет достаточной для регистрации пьезоэлектрических ОВП-эффектов, подобных эффектам января-марта 2024 г.

Состояние магнитосферы

В записях ОВП конца 2025 г. и первой половины 2026 г. заметную роль играли магнитные бури (Рассказов и др., 2026а,б). Из анализа соотношения вариаций ОВП подземных вод Култукского полигона и землетрясений БРС при переходе от контроля слабых землетрясений магнитными бурями в ноябре-декабре 2025 г. к сейсмическим импульсам в январе-марте 2026 г. был сделан вывод о нивелировании существовавших аномалий тектонических напряжений в БРС магнитными бурями, вызывавшими слабые землетрясения. Короткие сейсмические импульсы января-апреля 2026 г. обозначили запуск новых сейсмогенных деформаций.

Смена сейсмической активности

Ледовый покров января-марта 2024 г. мог испытывать существенное влияние Северо-Байкальско-Хангайской сейсмической активизации, в начале которой реализовались два сильных Северо-Байкальских землетрясения: первое – 27 декабря 2023 г., до образования ледового покрова на Байкале, второе – 15 января 2024 г., в начале его образования. Сильному сейсмическому событию 15 января 2024 г. соответствовал подъем ОВП ст. 9 до максимума, после которого линия ОВП снижалась до конца января в сопровождении серии слабых сейсмических событий (Рассказов и др., 2024).

Ледоставу января-апреля 2025 г. соответствовала слабая хаотическая сейсмичность БРС, которая сопровождалась магнитными бурями. В конце 2025 г. имели место сильнейшие магнитные бури (K_p до 8.7). Существовавшие аномалии тектонических напряжений БРС в ноябре-декабре 2025 г. могли нивелироваться с последующим запуском нового ряда сейсмогенерирующих импульсов в январе 2025 г. (Рассказов и др., 2026а). Если фактор магнитных бурь действительно оказал влияние на сейсмогенное состояние земной коры 2025 и 2026 гг., снижение регистрации пьезоэлектрических эффектов в записях ОВП не было артефактом, а отразило изменение природного явления – пьезоэлектрических эффектов ледового покрова.

Состояние атмосферы

2025-й год отличался от 2024-го года более теплой зимой. Лед сковал Южный Байкал в районе Култукского полигона в 2024 г. около 15 января, а в 2025 г. — около 28 января. Из-за более теплой зимы 2025 г. на Байкале образовалось более тонкое ледовое покрытие, чем в 2024 г.

Теплая зима 2026 г. также не способствовала образованию толстого льда. Фактор толщины льда, однако, вряд ли имел решающее значение для исчезновения пьезоэлектрических эффектов в ОВП-записях. Оценка влияния этого фактора требует вовлечения в анализ конкретных данных по толщине ледового покрова разных лет.

Заключение

Мы провели сравнительный анализ результатов трехлетнего опыта мониторинга ОВП подземных вод во время ледоставов оз. Байкал. ОВП-записи подземных вод ст. 9, существенно различающиеся в ледоставы 2024, 2025 и 2026 гг., получены впервые. В существенных вариациях ОВП января-марта 2024 г. были отчетливо выражены пьезоэлектрические эффекты, сопровождавшие деформации ледового покрова оз. Байкал. Во время ледостава января-апреля 2025 г. в записях ст. 9 намечались лишь отдельные минимумы ОВП, которые можно приписать пьезоэлектрическим эффектам. Во время ледостава января-апреля 2026 г. пьезоэлектрические эффекты деформаций льда в записях ОВП фактически отсутствовали, за исключением двух эпизодов.

Снижение регистрации пьезоэлектрических эффектов в записях ОВП 2025–2026 гг. относительно записей 2024 г. может объясняться снижением чувствительности приема сигналов сенсором. Между тем, в сравнительном анализе полученных данных мы обратили внимание на то, что ледовый покров января-марта 2024 г. мог испытывать существенное влияние Северо-Байкальско-Хангайской сейсмической активизации. Ледовый покров января-апреля 2025 г. был лишен такого влияния, поскольку в БРС имела место слабая хаотическая сейсмичность. Этот ледовый покров января-апреля 2026 г. образовался на фоне слабой сейсмичности, которая

регулировалась сильнейшими магнитными бурями. Следовательно, снижение регистрации пьезоэлектрических эффектов в записях ОВП 2024–2026 гг. могло отражать изменение природных процессов. Эффекты деформаций льда могли нивелироваться также из-за более теплых зим 2025 и 2026 гг., по сравнению с зимой 2024 г., повлекших за собой образование более тонкого ледового покрова. Оценка этого фактора требует дополнительных рядов наблюдений с включением в анализ конкретных данных по толщине ледового покрова.

Первый трехлетний опыт ОВП-мониторинга подземных вод Култукского полигона вскрыл, с одной стороны, зависимость сейсмогенного состояния коры от разных факторов, с другой стороны, открыл возможности использования ОВП-регистрации состояния ледового покрова Байкала для оценки фонового сейсмогенного состояния коры. Эффективность разработки подходов к прогнозу времени сильного землетрясения БРС в значительной мере будет зависеть как от качества гидрогеохимического и электрохимического прослеживания эффектов, сопровождающих подготовку землетрясений, так и от полноты вовлеченности в оперативный анализ факторов, влияющих на сейсмогенное состояние коры.

Благодарности

Работа проводится по проекту ИЗК СО РАН FWEF-2026-0010. В работе использованы данные о землетрясениях, полученные на уникальной научной установке «Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира» (<https://ckprf.ru/usu/507436/>, <http://www.gsras.ru/unu/>). (Карта..., 2025). Авторы благодарят В.И. Архипенко за обеспечение технической поддержки рабочего состояния сенсоров на станциях Култукского полигона.

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>

Борняков С.А., Мирошниченко А.И., Салко Д.В. Диагностика предсейсмогенного состояния структурно-неоднородных сред по данным деформационного мониторинга // Докл. Академии наук. 2016. Т. 468, № 1. С. 84–87.

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. 2023. 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>

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.

Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Чувашова И.С. От контроля слабых землетрясений в Байкальской рифтовой системе магнитными бурями к сейсмическим импульсам Японско-Байкальского геодинамического коридора: мониторинг ОВП подземных вод в реальном времени начала 2026 г. // Геология и окружающая среда. 2026а. Т. 6, № 1. С. 56–90. DOI 10.26516/2541-9641.2026.1.56.

Рассказов С.В., Асламов И.А., Снопков С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М. Сейсмические импульсы Байкальской рифтовой системы в марте-июне 2026 г.: мониторинг окислительно-восстановительного потенциала подземных вод // Геология и окружающая среда. 2026. Т. 6, № 2.

Ружич В.В., Псахье С.Г., Черных Е.Н., Борняков С.А., Гранин Н.Г. Деформации и сейсмические явления в ледяном покрове озера Байкал //

Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 3. С. 289–299.

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>

Balk M., Bose M., Ertem G., Rogoff D.A., Rothschild L.J., Freund F.T. Oxidation of water to hydrogen peroxide at the rock-water interface due to stressactivated electric currents in rocks // Earth and Planetary Science Letters. 2009. Vol. 283, No. 1–4. P. 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.044>

Bleier T., Dunson C., Alvarez C., Freund F., Dahlgren R. Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments // Natural Hazards and Earth System Science. 2010. Vol. 10, No. 9. P. 1965–1975. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1965-2010>.

Borniyakov S.A., Dobrynnina A.A., Guo Y., Yao L., Shagun A.N., Zhuo Y., Sankov V.A., Salko D.V., Miroshnichenko A.I., Karimova A.A. From icequake to earthquake // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 172–192. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.172.

Freund F. Earthquake forewarning – A multidisciplinary challenge from the ground up to space // Acta Geophysica. 2013. Vol. 61, No. 4. P. 775–807. DOI: 10.2478/s11600-013-0130-4

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>

Balk M., Bose M., Ertem G., Rogoff D.A., Rothschild L.J., Freund F.T. Oxidation of water to hydrogen peroxide at the rock-water interface due to stressactivated electric currents in rocks // Earth and

Planetary Science Letters. 2009. Vol. 283, No. 1–4. P. 87–92. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.044>

Bleier T., Dunson C., Alvarez C., Freund F., Dahlgren R. Correlation of pre-earthquake electromagnetic signals with laboratory and field rock experiments // Natural Hazards and Earth System Science. 2010. Vol. 10, No. 9. P. 1965–1975. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1965-2010>.

Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Guo Y., Yao L., Shagun A.N., Zhuo Y., Sankov V.A., Salko D.V., Miroshnichenko A.I., Karimova A.A. From icequake to earthquake // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 4. P. 172–192. DOI 10.26516/2541-9641.2025.4.172.

Bornyakov S.A., Miroshnichenko A.I., Salko D.V. Diagnostics of the pre-seismogenic state of structurally inhomogeneous media based on deformation monitoring data // Dokl. Academy of Sciences. 2016. Vol. 468, No. 1. P. 84–87.

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>

Freund F. Earthquake forewarning – A multidisciplinary challenge from the ground up to space // Acta Geophysica. 2013. Vol. 61, No. 4. P. 775–807. DOI: 10.2478/s11600-013-0130-4

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Arkhipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. First experience in real-time monitoring of coseismic and aseismic ORP, pH, and temperature variations in groundwater from the Kultuk reservoir (Baikal Rift System) // Geology and Environment. 2023. 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. Real-time monitoring of oxidation-reduction potential in groundwater from the Kultuk area in late 2023

– early 2024: comparison of electric effects with earthquakes in the central Baikal Rift System // Geology and Environment. 2024. Vol. 4, No. 1. P. 42–60. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42>

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 geomagnetic storms in early 2025 // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 1. P. 114–128 DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.114.

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S. From magnetic storm control of weak earthquakes in the Baikal Rift System to dominant seismic pulses of the Japan-Baikal geodynamic corridor: real-time monitoring of groundwater oxidation-reduction potential in early 2026 // Geology and Environment. 2026a. Vol. 1, No. 1. P. 56–90. DOI 10.26516/2541-9641.2026.1.56.

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M. Seismic pulses of the Baikal Rift System in March–June of 2026: monitoring the oxidation-reduction potential in groundwater // Geology and Environment. 2026. Vol. 6, No. 2.

Ruzhich V.V., Psakhye S.G., Chernykh E.N., Bornyakov S.A., Granin N.G. Deformations and seismic phenomena in the ice cover of Lake Baikal // Russian Geology and Geophysics. 2009. Vol. 50, No. 3. P. 289–299.

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>

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,

Институт земной коры СО РАН,

заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,

664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,

Иркутский государственный университет, геологический факультет,

заведующий кафедрой динамической геологии,

тел.: (3952) 51–16–59,

email: rassk@crust.irk.ru

Rasskazov Sergei Vasilevich,

doctor of geological and mineralogical sciences, professor,

664025, Irkutsk, Lenin st., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Head of Dynamic Geology Char,
664033, Irkutsk, Lermontov str., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
Head of the Laboratory for Isotopic and Geochronological Studies,
tel.: (3952) 51–16–59,
email: rassk@crust.irk.ru

Асламов Илья Александрович,

кандидат физико-математических наук,
664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,
Лимнологический институт СО РАН,
заведующий лабораторией гидрологии и гидрофизики,
email: ilya_aslamov@bk.ru

Aslamov Ilya Aleksandrovich,

Candidate of physical and mathematical sciences,
664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya st., 3,
Limnological Institute SB RAS,
Head of laboratory of hydrology and hydrophysics,
email: ilya_aslamov@bk.ru

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук,
664025, Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет,
доцент,
664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3,
Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет,
ведущий научный сотрудник,
email: snopkov_serg@mail.ru.

Snopkov Sergei Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
664025, Irkutsk, Lenin sr., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Associate Professor,
664074, Irkutsk, Kurchatov st., 3,
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,
Leading Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru.

Чебыкин Евгений Павлович,

кандидат химических наук,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
ведущий специалист,
email: epcheb@yandex.ru

Chebykin Eugene Pavlovich

Candidate of Chemical Sciences,
664033, Irkutsk, Lermontov st., 128,
Institute of the Earth's Crust SB RAS,
leading specialist,
email: epcheb@yandex.ru

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