

Экспресс-анализ квазипериодических импульсов окислительно-восстановительного потенциала подземных вод берега Байкала при мониторинге в режиме реального времени (07–14 февраля 2024 г.)

С.В. Снопков^{1,2}, С.В. Рассказов^{1,3}, И.А. Асламов⁴, В.И. Архипенко⁴,
А.М. Ильясова³, Е.П. Чебыкин^{3,4}

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
Сибирская школа геонаук, г. Иркутск, Россия

³Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

⁴Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

Аннотация. В режиме реального времени подземных вод берега Байкала в течение недели февраля 2024 г. регистрируются своеобразные эффекты в виде квазипериодических отрицательных ОВП-импульсов с варьирующими временными интервалами и снижением ОВП относительно фона. Обращается внимание на их проявление при возрастании температуры воздуха на Байкале. Проводится экспресс-анализ наблюдаемых эффектов. В начале интервала наблюдений определяется режим вступительных ОВП-импульсов, проявляющихся в условиях слабого возрастания температуры воздуха, в середине – условно-оптимальный режим в условиях существенного потепления и в конце – режим ретроградного развития в условиях похолодания. Выявленные закономерности в изменении пауз между импульсами и амплитуды снижения ОВП относительно фона составляют основу для анализа продолжающихся эффектов.

Ключевые слова: подземные воды, мониторинг, окислительно-восстановительный потенциал, pH, температура, Байкал.

Express-analysis of quasi-periodic oxidation-reduction potential pulses in Baikal Coastal Groundwater during real-time monitoring (February 07–14, 2024)

S.V. Snopkov^{1,2}, S.V. Rasskazov^{1,3}, I.A. Aslamov⁴, V.I. Archipenko⁴,
A.M. Ilyasova³, E.P. Chebykin^{3,4}

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Irkutsk, Russia

³Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

⁴Limnological Institute, SB RAS, Irkutsk, Russia

Abstract. Real-time groundwater monitoring on a shore of Lake Baikal reveals peculiar effects in the form of quasi-periodic negative ORP pulses with varying time intervals and a decrease in ORP relative to the background during the week of February 2024. We perform an express analysis of the observed effects and pay attention to their occurrence during increasing air temperature. At the beginning of the observation interval, we determine the regime of initial ORP pulses, which occur in conditions of a slightly increasing air temperature, then the middle one in a conventionally-optimal regime in conditions of significant warming, and the final regime of retrograde evolution in cooling conditions. The revealed regularities in changes of pauses between pulses and amplitudes of ORP reductions relative to the background form the basis for the analysis of ongoing effects.

Keywords: groundwater, monitoring, oxidation-redox potential, pH, temperature, Baikal.

Введение

Специально разработанные автономные логгеры с зондами ТМА-11 были установлены на двух станциях побережья западной оконечности Байкала, в пос. Култук в начале декабря 2023 г., для измерения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), водородного потенциала (рН) и температуры воды в режиме реального времени при разработке системы мониторинговых наблюдений с целью оценки угрозы сильных землетрясений на территории Байкальской рифтовой системы. Один зонд был размещен на мониторинговой станции 9 (КБЖД, Земляничная), другой – на мониторинговой станции 184 (Школьная). Подробная характеристика условий установки зондов, их технические характеристики, режим измерений и передачи данных приведены в работе (Рас-

сказов и др., 2023а). Мониторинг ОВП был организован в режиме реального времени в связи с обнаружением вариаций этого параметра в подземных водах, выявленных при землетрясениях Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2021–2023 гг. с использованием портативных приборов Hanna и Эксперт (Семянский и др., 2021; Рассказов и др., 2023б; Снопков, Куроленко, 2023).

ОВП представляет собой потенциал электронного обмена, который относится к активному окислителю или восстановителю. Окислители захватывают электроны у других молекул, а восстановители их отдают. Положительные значения ОВП свидетельствуют о преобладании в воде окислителей, а отрицательные значения указывают на восстановительные свойства воды (рис. 1).

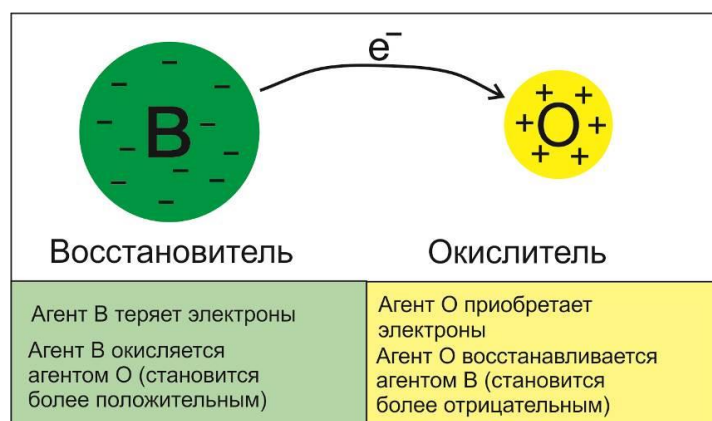


Рис. 1. Схема реакций окисления и восстановления в подземных водах по работе (https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm) с изменениями.

Fig. 1. Scheme of oxidation and reduction reactions in groundwater. Modified after (https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm)

Мониторинг ОВП, рН и температуры подземных вод в реальном времени несет информацию о текущих гидрогеохимических изменениях в их резервуаре и проводится с целью обеспечения оперативного вывода данных, которые могут свидетельствовать о приближении сейсмических событий. Если в процессе мониторинга появляются новые эффекты, их роль нужно выяснять для использования в последующем анализе постоянно поступающей новой мониторинговой информации.

В мониторинговых рядах декабря 2023 г. – февраля 2024 г. в подземных водах обеих станций наблюдается существенный рост ОВП. В феврале 2024 г. в воде ст. 9 проявляются новые эффекты в виде регулярных колебаний ОВП (отрицательных импульсов), тогда как на ст. 184 подобные сигналы в это время не регистрируются. В настоящей работе приводятся результаты экспресс-анализа зарегистрированных ОВП-импульсов в подземных водах ст. 9 с целью определения закономерностей их проявления в ходе дальнейших наблюдений.

Подходы к систематике ОВП-импульсов

Регулярные выразительные минимумы наблюдаются в подземной воде ст. 9 с 07 до 14 февраля 2024 г. (табл. 1). До этого временного интервала регистрируется фон ОВП при отсутствии регулярных минимумов, за исключением подобных слабовыраженных эффектов 22–24 декабря 2023 г. (рис. 2). 14 февраля ОВП минимумы резко уменьшают-

ся по амплитуде (А). Импульс 29 (14 февраля, $t_{п}=13:16$, $t_{м}=14:02$) имеет $A = 8\text{мВ}$, следующий за ним импульс 30 (14 февраля, $t_{п}=22:26$, $t_{м}=23:18$) – $A = 5\text{мВ}$. По смене характера импульсов 14–15 февраля последующие квазипериодические события отделяются от событий 07–14 февраля, что дает возможность выполнить предварительный анализ ОВП-генерирующих процессов до этого рубежа.

Т а б л и ц а 1

Параметры ОВП-импульсов подземных вод ст. 9 07–14 февраля 2024 г.

Table 1

Parameters of groundwater ORP pulses at station 9 in February 07–14, 2024

№ импульса	$t_{п}$	$t_{мин}$	t , мин (от 6 ч)	ОВП(п), мВ	ОВП(м), мВ	ОВП(пм), мВ	$t(пм)$, мин
1	07.02.2024 18:02	07.02.2024 18:42	+06	292	281	11	40
2	07.02.2024 23:48	08.02.2024 0:48	-12	291	279	12	60
3	08.02.2024 5:48	08.02.2024 6:20	-10	287	279	8	32
4	08.02.2024 11:02	08.02.2024 12:04	+10	291	286	5	62
5	08.02.2024 17:38	08.02.2024 18:16	-20	300	289	11	38
6	08.02.2024 22:44	08.02.2024 23:20	-30	297	286	11	36
7	09.02.2024 4:06	09.02.2024 4:44	-34	297	287	10	38
8	09.02.2024 9:16	09.02.2024 9:54	-70	297	286	11	38
9	09.02.2024 14:10	09.02.2024 14:45	-73	296	285	11	35
10	09.02.2024 18:54	09.02.2024 19:32	-24	299	292	7	38
11	10.02.2024 4 0:30	10.02.2024 1:08	-44	305	295	10	38
12	10.02.2024 5:40	10.02.2024 6:24	-38	306	295	11	44
13	10.02.2024 11:18	10.02.2024 12:04	-36	304	293	11	46
14	10.02.2024 16:54	10.02.2024 17:28	-28	304	293	11	34
15	10.02.2024 22:26	10.02.2024 23:00	-22	301	292	9	34
16	11.02.2024 3:58	11.02.2024 4:38	-76	300	290	10	40
17	11.02.2024 8:54	11.02.2024 9:24	-66	298	289	9	30
18	11.02.2024 13:44	11.02.2024 14:20	-56	299	286	13	36
19	11.02.2024 18:44	11.02.2024 19:24	-36	295	284	11	40
20	12.02.2024 0:16	12.02.2024 0:48	-42	295	284	11	32
21	12.02.2024 5:30	12.02.2024 6:06	-10	295	285	10	36
22	12.02.2024 10:40	12.02.2024 11:16	-28	294	284	10	36
23	12.02.2024 16:12	12.02.2024 16:48	+86	291	283	8	36

24	13.02.2024 0:30	13.02.2024 1:14	+28	293	283	10	44
25	13.02.2024 7:00	13.02.2024 7:42	+48	294	283	11	42
26	13.02.2024 14:02	13.02.2024 14:36	+132	296	284	12	34
27	13.02.2024 22:18	13.02.2024 22:48	-63	294	275	19	30
28	14.02.2024 3:26	14.02.2024 3:42	+260	293	280	13	16
29	14.02.2024 13:16	14.02.2024 14:02	+298	292	284	8	46

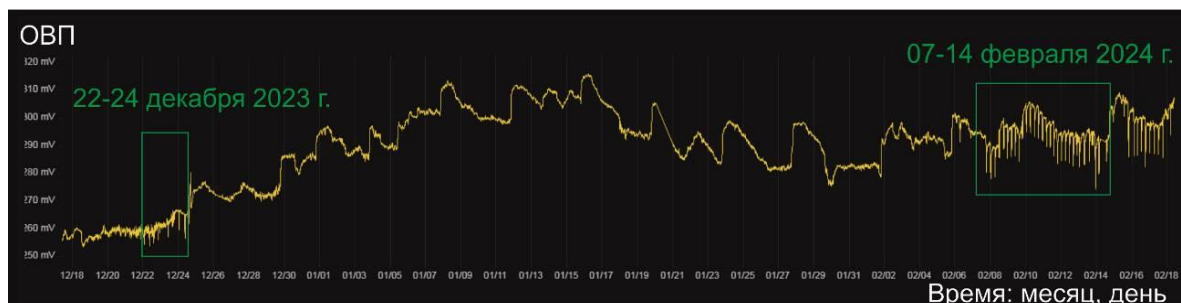


Рис. 2. Выразительное проявление регулярных отрицательных ОВП-импульсов в подземной воде ст. 9 во временном интервале 07–14 февраля 2024 г. и позже. Подобные менее выразительные эффекты проявляются 22–24 декабря 2023 г. (не рассматриваются). В каждом ОВП-импульсе вода получает порцию электронов.

Fig. 2. Expressive occurrence of regular negative ORP pulses in groundwater at station 9 in the time interval of February 7–14, 2024 and later on. Similar less pronounced effects appear on December 22–24, 2023 (not considered). In each ORP pulse, water receives a portion of electrons.

Первый ОВП-минимум регистрируется 07 февраля в 18:42, второй – через 6 ч. 06 мин. (08 февраля в 00:48), третий – еще через 5 ч. 38 мин. (08 февраля в 06:20), четвертый – через 5 ч. 50 мин. (08 февраля в 12:04), пятый – через 6 ч. 10 мин. (08

февраля в 18:16), шестой – через 5 ч. 00 мин. (08 февраля в 23:20) и т. д. (рис. 3а, табл. 1). Регулярные ОВП-импульсы проявляются в воде ст. 9 независимо от изменений рН и температуры (рис. 3б).

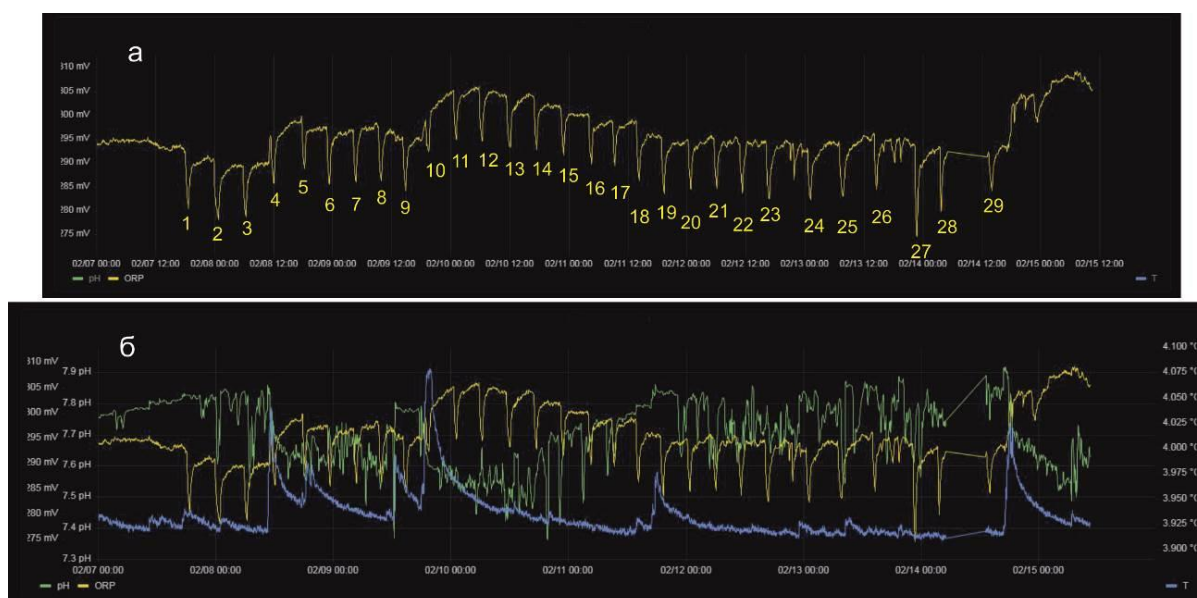


Рис. 3. Динамика физико-химических показателей подземных вод ст. 9 от 1 до 29 февраля 2024 г.: а – ОВП, б – ОВП вместе с температурой и рН. На панели а регулярным отрицательным ОВП-импульсам в интервале 07–14 февраля 2024 г. присвоены номера от 1 до 29.

Fig. 3. Dynamics of physicochemical parameters of groundwater at station 9 from 1 to 29 February, 2024: *a* – ORP, *b* – ORP along with temperature and pH. In panel *a*, regular negative ORP pulses in the interval February 7–14, 2024 are assigned numbers from 1 to 29.

В ОВП-импульсах находят выражение факторы времени и снижения ОВП относительно фона. Характеристические параметры повторяющихся эффектов включают: 1) исходное фоновое значение ОВП = 295 мВ 07 февраля; 2) точку перегиба, после которой значение ОВП начинает резко снижаться; 3) заостренную линию минимального значения ОВП; 4) отрезок быстрой релаксации (быстрого выхода из минимума) и 5) отрезок медленной релаксации с адаптацией ОВП к уровню фона, который со временем может меняться. Активная фаза ОВП-

импульса ограничивается нисходящей линией от точки перегиба до точки со значением ОВП-минимума.

Для импульса определяется амплитуда ($A_{\text{мин}}$ – амплитуда минимума) и длительность ($t_{\text{пм}}$ – время от точки перегиба до минимума). Для регистрации паузы между активными фазами ОВП-импульсов определяются отрезки времени между соседними перегибами линии значений ОВП ($t_{\text{пп}}$) и заостренными минимумами ($t_{\text{мм}}$ – время от минимума до минимума) (рис. 4).

ОВП, мВ

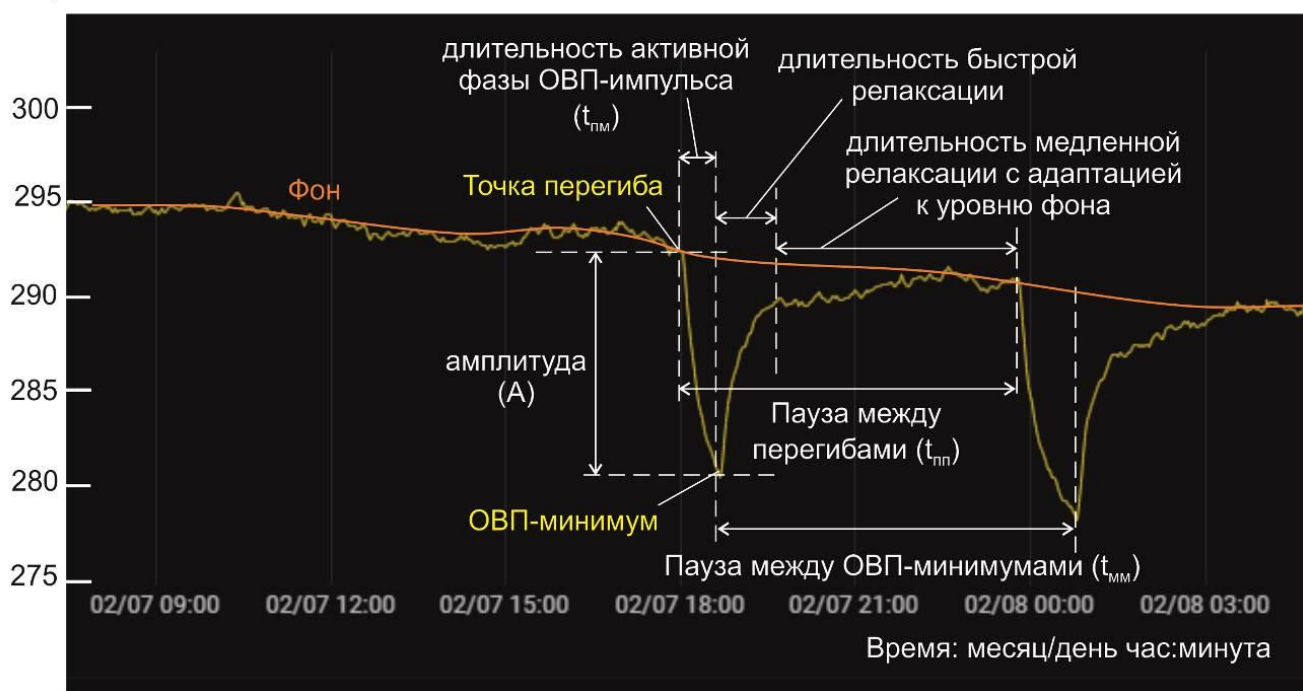


Рис. 4. Характеристические параметры повторяющихся минимумов ОВП. Рисунок выполнен на основе графика, полученного в режиме реального времени в начале появления ряда импульсов (07–08 февраля 2024 г.).

Fig. 4. Characteristic parameters of repeating ORP minima. 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).

На графике рис. 4 отрезки быстрой и медленной релаксации выделяются визуально. На последующих минимумах ряда наблюдений точка перегиба на восходящей кривой часто нивелируется. Релаксация имеет характерное экспоненциальное затухание. Такие затухания образуются во многих физических полях, в том числе электромагнитных, электрических и др. Амплитуда

уменьшается пропорционально e^{-at} , где a – некоторый коэффициент пропорциональности, а t – время от момента начала релаксации. В нашем случае, сигнал подчиняется зависимости $(A_{\text{фон}} - A_{\text{мин}} * e^{-at})$. В настоящей работе анализируется только активная фаза импульсов.

Фактор времени

С вечера 07 февраля до полудня 08 февраля проявляются начальные ОВП-импульсы приблизительно через каждые 6 часов ($t_{MM} = 6-0 \pm 12$ мин.). В течение суток регистрируются 4 события. После полудня 08 февраля временные интервалы между минимумами сокращаются на 20–80 минут. По отношению к эталонному интервалу 6 часов обозначается интервал отрицательных значений $t_{MM} = 6 \text{ ч.} - 20 \text{ мин.} - 6 \text{ ч.} - 80 \text{ мин.}$ Количество ОВП-импульсов в течение суток возрастает до пяти. Импульс 23 (12 февраля, 16:48, 283 мВ) характеризуется, наоборот, положительными значениями t_{MM} (до 6 ч.+86 мин.). Последующие события 24–29, проявляющиеся 12–14 февраля, также имеют длинные паузы (t_{MM} от 6 ч.+28 мин. до 6 ч.+260 мин.), за исключением события 27, во время которого пауза между импульсами ($t_{MM} = 6 \text{ ч.} - 63 \text{ мин.}$) имеет отрицательное значение относительно эталонного интервала 6 ч. (рис. 5).

Начальные ОВП-импульсы 7–8 февраля отличаются, с одной стороны, от импульсов

промежуточного интервала 8–12 февраля, с другой стороны, – от импульсов переходного интервала 12–14 февраля. Начальные импульсы дают квазипериодичность около 6 час. при широком интервале длительности активных фаз. Промежуточные импульсы имеют ограниченный временной диапазон с сокращением не только пауз между ними, но и длительности активных фаз. Переходные импульсы 12–14 февраля показывают обратную зависимость между длительностью активной фазы ОВП-импульсов и паузами между импульсами. Чем продолжительнее паузы между активными фазами ОВП-импульсов, тем короче становятся активные фазы (рис. 6).

Выявляется направленная смена временных параметров ОВП-импульсов, характеризующая переход от интервала вступления 07–08 февраля через промежуточный интервал их воспроизведения 8–12 февраля к интервалу ослабления импульсов 12–14 февраля.

Отклонение пауз между активными фазами ОВП-импульсов от 6 часов (в минутах)

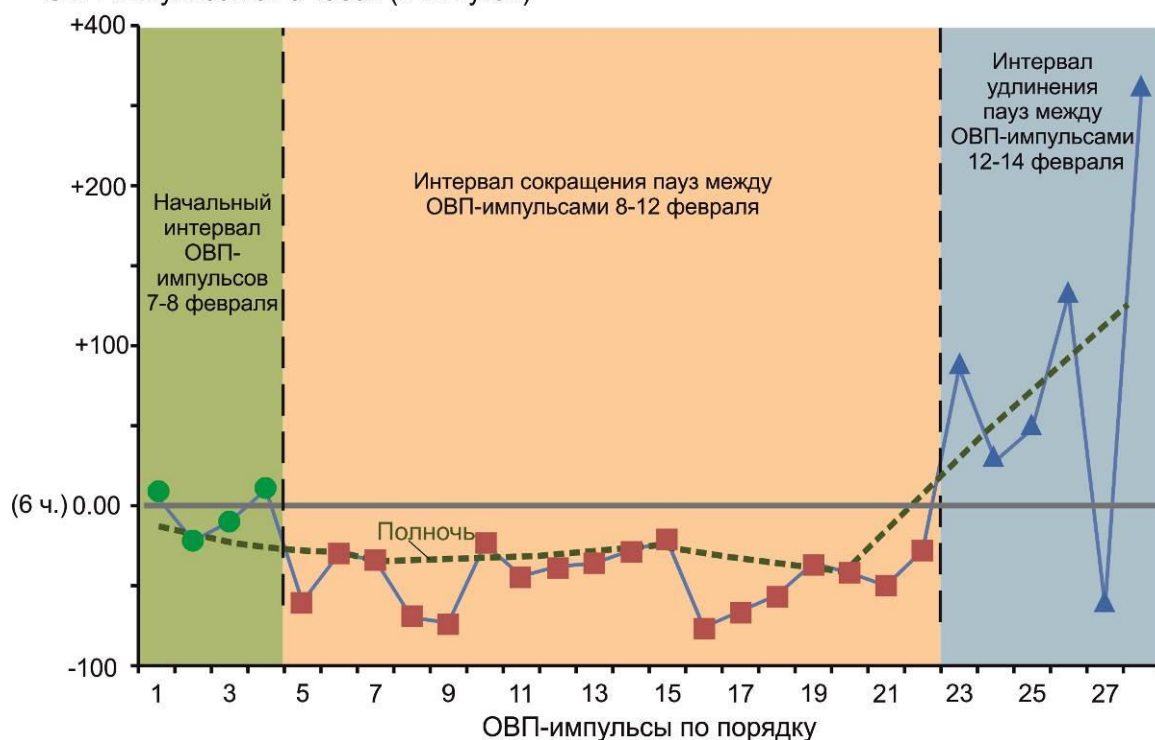


Рис. 5. Диаграмма отклонения повторяемых ОВП-импульсов ст. 9 от пауз между минимумами начального интервала (около 6 часов). Темно-зеленая штриховая линия соединяет полуночные значения.

Fig. 5. Diagram of deviation of repeatable ORP pulses at station 9 from pauses between minima of the initial interval (about 6 hours). A dark green dashed line connects the midnight values.

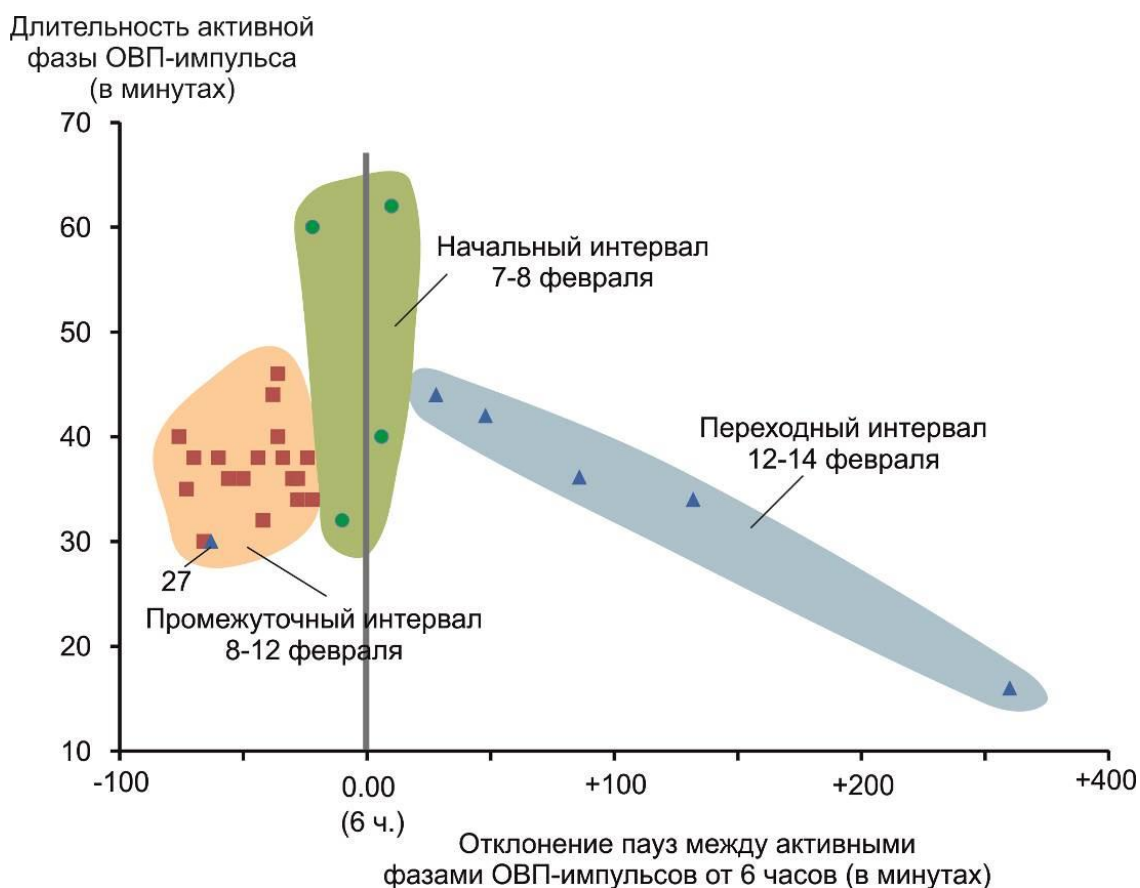


Рис. 6. Диаграмма изменения длительности активной фазы ОВП-импульсов относительно пауз между импульсами начального, промежуточного и переходного интервалов ряда наблюдений 07–14 февраля.

Fig. 6. Diagram of changes in the duration of the active phase of ORP pulses relative to pauses between pulses of the initial, intermediate, and transitional intervals of a series of observations on February 07–14, 2024.

Фактор снижения ОВП относительно фона

В начальном интервале амплитуда импульсов 1–4 сокращается от 11–12 мВ до 5 мВ, в промежуточном интервале событий 5–22 в основном составляет 10–11 мВ, в заключительном интервале событий 24–29 возрастает к событию 27 до 19 мВ и снижа-

ется к событию 29 до 8 мВ (рис. 7а). Минимумы 11–12 середины ряда наблюдений дают высокие измеренные значения ОВП (до 305 мВ), тогда как минимумы 1–3 в начале ряда наблюдений и минимумы 27–28 в его конце – сравнительно низкие значения (275–281 мВ) (рис. 7б).

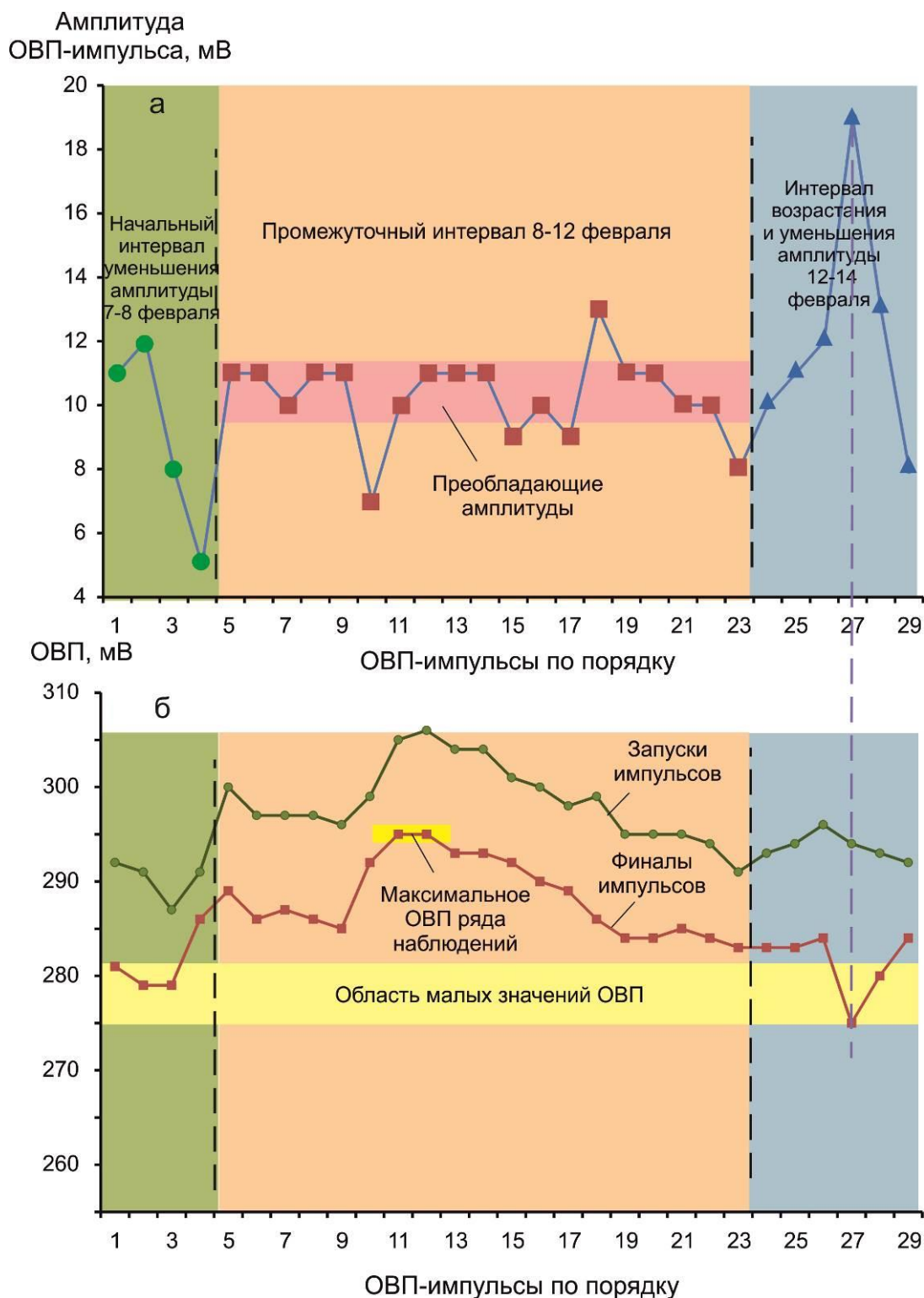


Рис. 7. Диаграммы вариаций амплитуды (а) и значений активных фаз ОВП-импульсов от 1 до 29 (б).

Fig. 7. Diagrams of variations in amplitude (a) and values of active phases of ORP pulses from 1 to 29 (b).

Начальный, промежуточный и финальный интервалы ряда наблюдений отчетливо различаются между собой на диаграмме соотношений ОВП-импульсов и точек переги-

ба. Начальный интервал отличается от финального по пониженным значениям точек перегиба. Для промежуточного интервала выделяется тренд согласованного возраста-

ния значений ОВП-минимумов и точек перегиба. В финале наблюдается относительное

снижение значений обоих параметров (рис. 8).

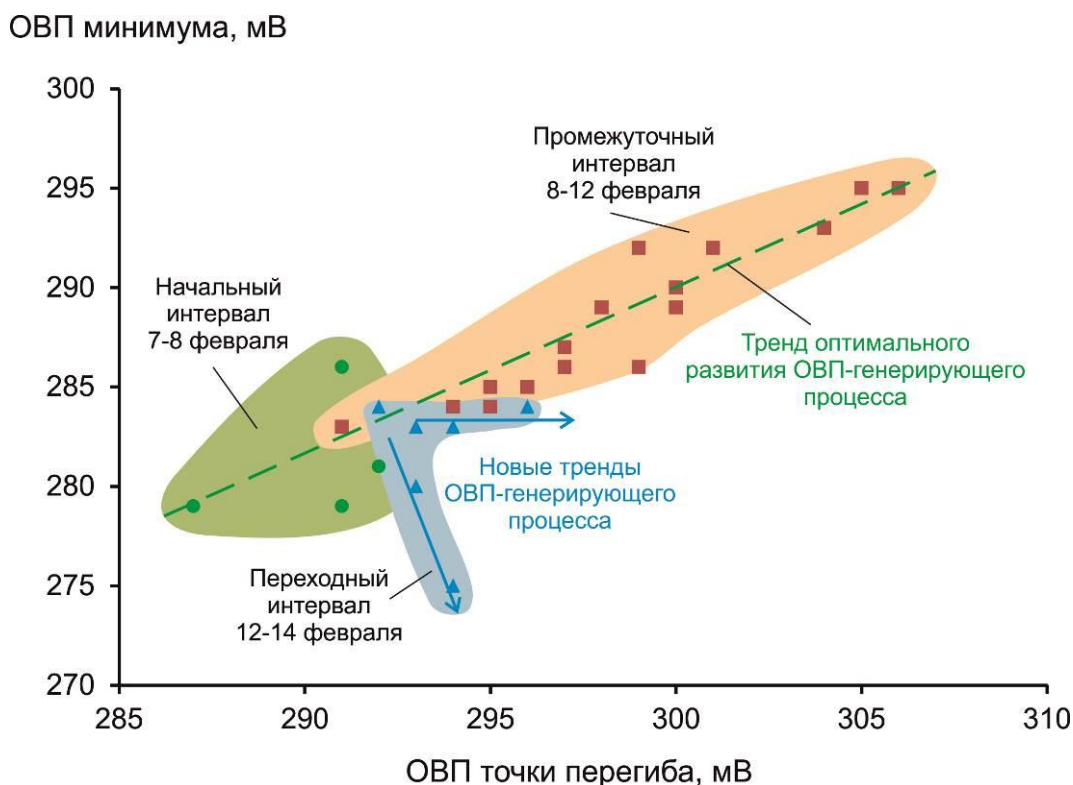


Рис. 8. Диаграмма сопоставления ОВП-минимумов и точек перегиба начального, промежуточного и финального интервалов ряда наблюдений 07–14 февраля 2024 г.

Fig. 8. Diagram of comparison of ORP minima and inflection points of the initial, intermediate, and final intervals of the observation series on February 7–14, 2024.

Значения ОВП на минимуме возрастают одновременно со значениями точки перегиба от интервала вступления 07–08 февраля к промежуточному интервалу 8–12 февраля при развитии ОВП-генерирующего процесса в условно-оптимальном режиме и резко падают либо находятся на одном уровне при повышении ОВП точки перегиба при переходе к новым трендам импульсов в интервале 12–14 февраля.

Соотношение факторов времени и снижения ОВП относительно фона

Изменения длительности активной фазы ОВП-импульсов и пауз между ними принимаются в качестве ведущего фактора изменения ряда начальных, промежуточных и переходных ОВП-генерирующих событий

07–14 февраля (см. рис. 5, 6). Значения ОВП в мониторинговом ряду также меняются (см. рис. 7, 8). На диаграмме рис. 9а выделяется изометричное фигуративное поле ОВП-импульсов промежуточного интервала 8–12 февраля, относительно которого фигуративные точки начальных импульсов смещаются с возрастанием длительности активной фазы ОВП-импульсов, а фигуративные точки переходных импульсов – смещаются с уменьшением длительности активной фазы ОВП-импульсов при возрастании амплитуды. В то же время, на рис. 9б амплитуда ОВП-импульсов в совокупности фигуративных точек не обнаруживает заметных изменений в зависимости от пауз между импульсами, за исключением высокоамплитудного отскока импульса 27.

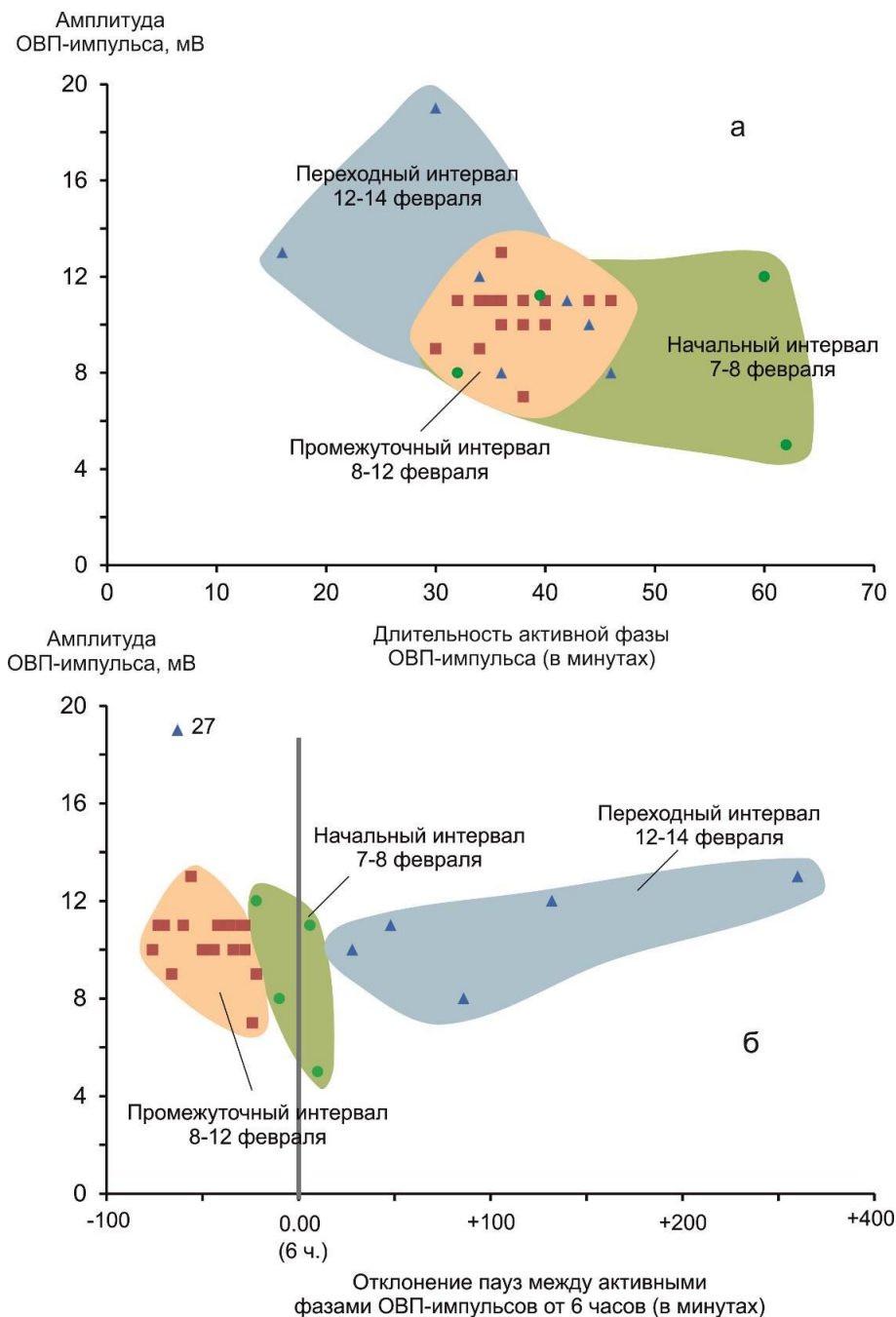


Рис. 9. Диаграммы вариаций амплитуды и длительности активной фазы ОВП-импульсов (а) и вариаций амплитуды относительно пауз между импульсами (б) начального, промежуточного и переходного интервалов ряда наблюдений 07–14 февраля.

Fig. 9. Diagrams of variations in amplitude and duration of active phases of ORP pulses (a) and variations in amplitude relative to pauses between pulses (b) of the initial, intermediate, and final intervals of observation series on February 07–14.

Сопоставление графиков ОВП с графиками температуры воздуха и атмосферного давления на Байкале

В начале февраля в районе пос. Култук регистрируется низкая температура: 01–02 февраля – от -16°C днем до -20°C ночью; 03–04 февраля – от -14°C днем до -21°C

ночью; 05–06 февраля – от -10°C днем до -22°C ночью. Относительное потепление наступает 07–08 февраля, когда температура меняется от -4°C днем до -18°C ночью, хотя 09 февраля вновь снижается до интервала -12 – -19°C . Более существенное потепление происходит 10–11 февраля, когда в районе пос. Култук устанавливается плюсовая температура днем, а ночью температура не

опускается ниже $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$. Регулярные ОВП-импульсы впервые проявляются в подземной воде ст. 9 в условиях начавшегося потепления 07–08 февраля, тогда как оптимальный режим развития ОВП-генерирующих процессов устанавливается в пике плюсовых температур 10–11 февраля.

В ночь с 11 на 12 февраля температура воздуха на Байкале начинает снижаться и к вечеру 12 февраля составляет $-15\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$. В воде ст. 9 после минимума 23 наблюдаются 3 малых ОВП-минимума, стартующих от уровня 294 мВ: а – в 21:06 (291 мВ), б – в 21:46 (287 мВ) и в – в 23:24 (291 мВ). Подоб-

ные малые минимумы ОВП, стартующие от уровня 294–295 мВ, наблюдаются также 13 февраля после минимума 26: а – в 16:04 (293 мВ), б – в 18:16 (290 мВ) и в – в 19:30 (290 мВ). Две совокупности малых дополнительных минимумов соответствуют понижению температуры на фоне возрастающего атмосферного давления. 14 февраля тенденция снижения температуры сменяется тенденцией ее возрастания. Начинает снижаться атмосферное давление. Глубокие минимумы ОВП в воде ст. 9 отсутствуют и наблюдаются хаотичные малоамплитудные колебания этого параметра (рис. 10).

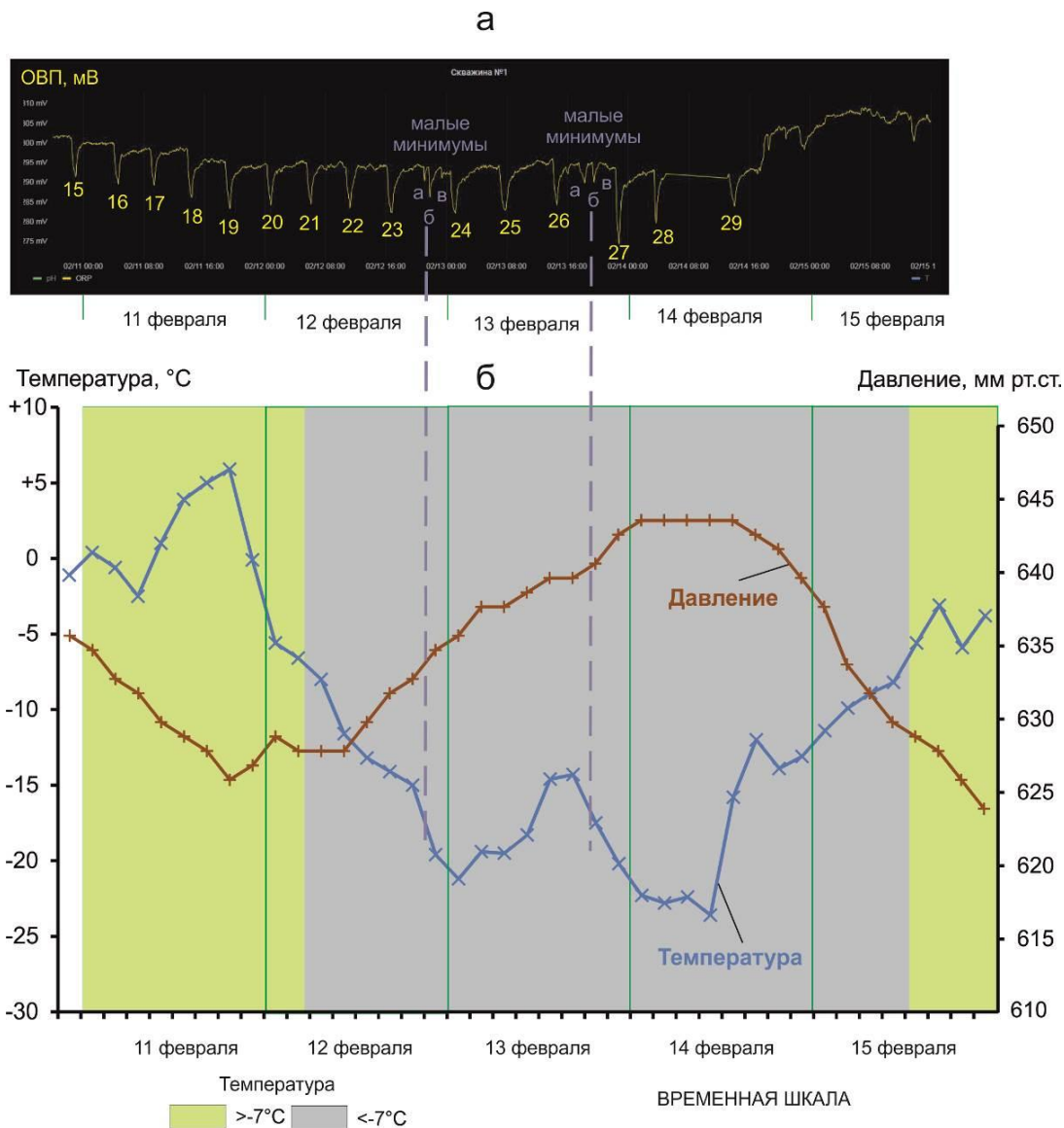


Рис. 10. Проявление малых минимумов на графике ОВП (а) при похолодании и повышении атмосферного давления на Байкале 12–13 февраля 2024 г. (б) На панели а цифрами от 15 до 29 обозначены номера ОВП-импульсов, начавшихся в условиях повышенной температуры воздуха, установившейся на Байкале с 07 февраля 2024 г. Температура и атмосферное давление показаны по данным метеостанции Хамар-Дабан, расположенной на хр. Камар, в 16 км южнее Слюдянки (сайт <https://meteo7.ru/station/30815>). В Култукте температура обычно на $2\text{--}5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, а атмосферное давление – выше, приблизительно на 90 мм рт. ст.

Fig. 10. Occurrence of small minima on the ORP graph (a) during cooling and an increase in atmospheric pressure on Lake Baikal on February 12–13, 2024 (b) In panel a, numbers from 15 to 29 indicate the numbers of ORP pulses that began under conditions of elevated air temperature, occurred on Baikal from February 7, 2024. Temperature and atmospheric pressure are shown from records of the Khamar-Daban weather station, located on the Khamar ridge, 16 km south of Slyudyanka (<https://meteo7.ru/station/30815>). In Kultuk, the temperature is usually 2–5 °C lower, and the atmospheric pressure is higher, approximately 90 mmHg.

В условиях похолодания длительность вечернего временного интервала между измеримыми между собой глубокими минимумами 23 (283 мВ в 16:48 12 февраля) и 24 (283 мВ в 01:14 13 февраля) увеличивается до 7 ч. 26 мин., а ночной интервал, завершающийся утром (в 07:42) минимумом 25 (283 мВ), продолжается 6 ч. 28 мин. В ночном временном интервале дополнительных малых минимумов не наблюдается. Длительность вечернего интервала 12 февраля (7 ч. 26 мин.) и ночного интервала 13 февраля (6 ч. 28 мин.) явно превышает длительность интервалов между минимумами 07–12 февраля, составляющих от 4 ч. 46 мин. до 6 ч. 06 мин. (см. табл. 1).

Обсуждение

При мониторинге в режиме реального времени подземных вод ст. 9 обнаружены своеобразные эффекты в виде квазипериодических отрицательных ОВП-импульсов с переменным значением факторов времени и снижения значений относительно фона. В настоящей работе представлены результаты экспресс-анализа данных, полученных в ряду 29 импульсов, проявившихся в интервале от 07 до 14 февраля. Выяснилось, что ОВП-генерирующий процесс был инициирован в условиях слабого снижения температуры воздуха, перешел в условно-оптимальный режим при существенном потеплении и сменился ретроградным режимом при похолодании. 14 февраля ОВП-импульсы ослабли на короткое время, но уже 15 февраля возобновились. В последующих наблюдениях ход вариаций ОВП, установленный 07–14 февраля нарушился. Интервал начинающегося импульсного процесса важен как отправная точка запуска явления, которое должно отслеживаться с определением его усиления или, наоборот, ослабления в режиме реального времени.

Для сопоставления с вариациями ОВП в воде ст. 9 приводятся данные об относи-

тельных вариациях температуры воздуха и атмосферного давления, проявленные на Байкале. Другие факторы (например, скорость ветра, наличие или отсутствие снежного покрова на льду, подледные течения Байкала, магнитные бури и т. д.) не рассматриваются. Последующие наблюдения не дают строгой зависимости вариаций ОВП подземных вод ст. 9 от вариаций температуры воздуха, что свидетельствует о включении разных факторов, влияющих на проявление регистрируемых эффектов. Возможно, что температура воздуха оказывала доминирующее влияние на импульс-генерирующий процесс только в его запускающем интервале 07–14 февраля.

Скважина ст. 9 находится на расстоянии 242 м от береговой линии оз. Байкал. Зонд располагается в скважине на абсолютной высоте около 452 м, т. е. на 4 м ниже уровня зеркала воды озера. Забой скважины уходит еще на 10 м ниже зонда. Устье второй скважины (ст. 184) занимает более высокое положение в рельефе, на 35 м выше уровня зеркала воды оз. Байкал, а зонд поднят над уровнем Байкала на 18 м. Эта скважина находится на расстоянии 960 м от береговой линии Байкала, а забой этой скважины поднят на 16 м выше уровня зеркала воды озера. Исходя из пространственного положения зонда ст. 9, предполагается, что ОВП-импульсы могут генерироваться в связи с деформациями ледового покрова оз. Байкал. Боковое воздействие на береговые породы создается на уровне замерзшего зеркала Байкала и ограничено его береговой зоной. Поскольку на ст. 184 регулярные ОВП-импульсы отсутствуют, процессы, возникающие в ледовом покрове оз. Байкал, не воздействуют на подземные воды этой станции.

Лед обладает свойствами диэлектрика. При визуальных наблюдениях за торошением льда неоднократно отмечалось свечение (Богородский, Смирнов, 1980), которое получило название трибололюминисценции.

Триболюминисценция регистрировалась при кристаллизации воды в ограниченных объемах (Трохан и др., 1983). Механизм возникновения этого явления связывался с пьезоэлектрическими процессами при образовании разломов льда. В экспериментах по выявлению электромагнитных импульсов при деформации морских льдов (Степанюк, Бацких, 1982; Степанюк, Смирнов, 2001) предполагалось, что пьезоэлектрические заряды разделяются по бортам новообразующихся микротрещин в деформирующемся льду. В полостях этих трещин существуют условия для возникновения электрического пробоя и релаксации зарядов в искровом канале. При этом каждый из разрядов сопровождается электромагнитным излучением. При деформациях ледового покрова в микротрещинах создаются сейсмические (акустические) и пьезоэлектромагнитные эффекты. По возникающим электромагнитным импульсам регистрируются зоны разрушения ледовых массивов.

Не исключается также микробиотическая причина наблюдаемых ОВП импульсов, так как микроорганизмы способны изменять окислительно-восстановительные условия среды в ходе своей жизнедеятельности. Скважины могут служить местом обитания микроорганизмов, включая железоредуцирующие и сульфатредуцирующие бактерии. При развитии последних, в среде идет накопление восстановителей, которые понижают ОВП (Завершинский, Вигдорович, 2000). Изменение ОВП, в свою очередь, влияет на направление биохимических реакций, активизируя ту или иную ферментативную систему бактерий. Импульс может создаваться образованием колонии микроорганизмов в виде пленки на поверхности чувствительных элементов датчика, затрудняя диффузию кислорода, являющегося основным окислителем в природных водах. Бактерии в такой биопленке могут проходить периодические фазы развития, чередуя фазы роста (с соответствующим резким понижением ОВП) и фазы его замедления и частичного отмирания (из-за дефицита питания или накопления ингибирующих продуктов), сопровождающиеся постепенным диффунди-

рованием кислорода и, соответствующим, повышением ОВП.

Заключение

При мониторинге подземных вод ст. 9 в режиме реального времени с 07 до 14 февраля 2024 г. выявлены квазипериодические импульсные изменения ОВП относительно фона. Намеченные закономерности вариаций этого параметра в самом начале зародившегося процесса составляют основу для его последующего анализа.

Предложены гипотезы генерации импульсов ОВП при возникновении пьезоэлектрических эффектов в ледовом покрове оз. Байкал и образовании бактериальных пленок на поверхности чувствительных элементов датчика. Для подтверждения или опровержения гипотез необходимо проведение дополнительных исследований.

Литература

Богородский В.В., Смирнов В.Н. Релаксационные процессы в ледяных полях Арктики // Докл. АН СССР. 1980. Т.250, № 3. С. 589–592.

Завершинский А.Н., Вигдорович В.И. Окислительно-восстановительный потенциал среды, содержащей культуру СРБ, как показатель ее активности // Вестник российских университетов. Математика. 2000. №1. С. 29–33.

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., Снопков С.В., Борняков С.А. Соотношение времени землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации с вариациями окислительно-восстановительного потенциала в подземных водах Култукского полигона // Геология и окружающая среда. 2023б. Т. 3, № 1. С. 181–201. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181

Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И.,

Тубанов Ц.А., Улзибат М., 2020. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020г., Mw=5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 727–743.

Снопков С.В., Куроленко А.А. Особенности Хубсугульского землетрясения и его влияние на физико-химические свойства подземных вод Южного Прибайкалья // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 172–180. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.172>

Степанюк И. А., Бацких Ю.М. Возможность использования электромагнитных полей для целей дистанционной индикации зон деформаций припайного льда // Природа и хозяйство Севера. 1982. Вып. 10. С. 47–50.

Степанюк И.А., Смирнов В.Н. Методы измерений характеристик динамики ледового покрова. Санкт-Петербург: Гидрометеиздат, 2001. 135 с.

Трохан А.М., Лапшин А.И., Гудзенко О.И. Криоллюминисценция жидкостей // Докл. АН СССР. 1983. Т. 271, № 1. С.83–86.

https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm (электронный ресурс)

<https://meteo7.ru/station/30815> (электронный ресурс)

References

Bogorodsky V.V., Smirnov V.N. Relaxation processes in the ice fields of the Arctic // Doklady Academy of Sciences of the USSR. 1980. Vol. 250, No. 3. P. 589–592.

Rasskazov S.V., Aslamov I.A., Snopkov S.V., Archipenko 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., Snopkov S.V., Bornyakov S.A. Correlation of the time of earthquakes of the Baikal-Khubsugul reactivation with variations in the redox potential in the groundwater of the Kultuk area // Geology and Environment. 2023b. Vol. 3, No. 1. P. 181–201. doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181

Seminsky K.Zh., Bornyakov S.A., Dobrynina A.A., Radziminovich N.A., Rasskazov S.V., Sankov

V.A., Mialle P., Bobrov A.A., Ilyasova A.M., Salko D.V., Sankov A.V., Seminsky A.K., Chebykin E.P., Shagun A.N., German V.I., Tubanov Ts.A., Ulzibat M. Earthquake Bystraya in the South Baikal region (09.21.2020, Mw = 5.4): main parameters, signs of preparation, and accompanying effects // Russian Geology and Geophysics. 2021. Vol. 62, No. 5. P. 727–743.

Snopkov S.V., Kurolenko A.A. Features of the Khubsugul earthquake and its influence on the physical and chemical properties of groundwater in the Southern Baikal region // Geology and Environment. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 172–180. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.172>

Stepanyuk I.A., Batskikh Yu.M. Possibility of using electromagnetic fields for the purposes of remote indication of fast ice deformation zones // Nature and Economy of the North. 1982. Issue. 10. P. 47–50.

Stepanyuk I.A., Smirnov V.N. Methods for measuring characteristics of ice cover dynamics. St. Petersburg: Gidrometeoizdat, 2001. 135 p.

Trochan A.M., Lapshin A.I., Gudzenko O.I. Cryoluminescence of liquids // Doklady AS USSR. 1983. Vol. 271, No. 1. P. 83–86.

Zavershinsky A.N., Vigdorovich V.I. Oxidation-redox potential of the environment containing the SRB culture as an indicator of its activity // Bulletin of Russian Universities. Mathematics. 2000. No. 1. P. 29–33.

https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm
<https://meteo7.ru/station/30815>

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,

664025 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,

664025 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.

Рассказов Сергей Васильевич,

доктор геолого-минералогических наук, профессор,

664025 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,

664025 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,

email: rassk@crust.irk.ru.

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,

email: ilya_aslamov@bk.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, ведущий инженер,
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,
Институт земной коры СО РАН,
email: ila@crust.irk.ru.*

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

Chebykin Evgeny Pavlovich,

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