УДК 550.844+546.791.027+632.126
https://doi.org/10.26516/2541-9641.2025.2.46
EDN: QPAJFL

Оперативный анализ квазипериодических вариаций ОВП подземных вод и землетрясений Байкальской рифтовой системы в середине 2025 г.

С.В. Рассказов[1,2], С.В. Снопков[2,3], И.А. Асламов[4], В.И. Архипенко[4], А.М. Ильясова[1], Е.П. Чебыкин[1,4]

[1]*Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия*
[2]*Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия*
[3]*Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия*
[4]*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Россия*

Аннотация. В середине 2025 г. определяется состояние земной коры Байкальской рифтовой системы, характеризующееся недельной квазипериодичностью согласованных между собой гидрогеохимических и сейсмических процессов. Вариации ОВП подземных вод связываются с проявлением импульсов растяжения и сжатия земной коры. Предполагается, что наблюдаемые недельные квазипериодические процессы свидетельствуют о вхождении земной коры в состояние резонанса в масштабе всей БРС, которое может повлечь за собой реализацию нового сильного землетрясения. С учетом сложившейся зависимости энергетического класса землетрясения (К) от временного интервала между землетрясениями на востоке БРС предполагается, что новое событие с К > 13 произойдет, если временной интервал между землетрясениями выйдет за верхний предел недельных резонансных значений импульсов растяжения и сжатия земной коры.

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

Operational Analysis of Weekly Quasi-Periodical Variations in Groundwater Redox Potential and Earthquakes of the Baikal Rift System in mid-2025

S.V. Rasskazov[1,2], S.V. Snopkov[2,3], I.A. Aslamov[4], V.I. Archipenko[4], A.M. Ilyasova[1], E.P. Chebykin[1,4]

[1]*Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia*
[2]*Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*
[3]*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*
[4]*Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

Статья получена: 29.06.2025; исправлена: 10.07.2025; принята: 30.06.2025.
ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Рассказов С.В., Снопков С.В., Асламов И.А., Архипенко В.И., Ильясова А.М., Чебыкин Е.П. Оперативный анализ квазипериодических вариаций ОВП подземных вод и землетрясений Байкальской рифтовой системы в середине 2025 г. // Геология и окружающая среда. 2025. Т. 5, № 2. С. 46–68. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.46. EDN: QPAJFL
Article received: 29.06.2025; corrected: 10.07.2025; accepted: 30.06.2025.
FOR CITATION: Rasskazov S.V., Snopkov S.V., Aslamov I.A., Archipenko V.I., Ilyasova A.M., Chebykin E.P. Operational Analysis of Weekly Quasi-Periodical Variations in Groundwater Redox Potential and Earthquakes of the Baikal Rift System in mid-2025 // Geology and Environment. 2025. Vol. 5, No. 2. P. 46–68. DOI 10.26516/2541-9641.2025.2.46. EDN: QPAJFL

Abstract. In mid-2025, a state of the BRS earth's crust, characterized by a weekly quasi-periodicity of mutually coordinated hydrogeochemical and seismic processes, is determined. Variations in oxidation-reduction potential of groundwater are associated with displaying impulses of extension and compression of the earth's crust. It is suggested that the observed weekly quasi-periodic processes are indicative of the earth's crust entry into a state of resonance on a scale of the entire BRS that may entail the realization of a new strong earthquake. Taking into account the established dependence of the earthquake energy class (K) on the time interval between earthquakes in the east of the BRS, it is proposed that a new seismic event with K > 13 will occur, when the time interval between earthquakes goes beyond the upper limit of the weekly resonant values in impulses of extension and compression of the earth's crust.

***Keywords**: groundwater, monitoring, oxidation-reduction potential, earthquakes, Baikal.*

Введение

Определение условий проявления сильных землетрясений остается одним из важнейших вопросов современной геологии, требующих решения. Отсутствие информации о подготовке сильного землетрясения повлекло за собой многочисленные разрушения и жертвы при последних катастрофических сейсмических событиях в Турции 6 февраля 2023 г. и в Мьянме 28 марта 2025 г. Густонаселенная урбанизированная территория Байкальской рифтовой системы (БРС) – одна из территорий Мира, на которой может произойти подобная сейсмическая катастрофа. Для минимизации ее ущерба здесь разрабатываются подходы к определению времени и места сильного сейсмического толчка на основе выяснения направленности развития процессов, протекающих в земной коре одновременно с подготовкой сильного землетрясения. На Култукском полигоне БРС 13 лет проводится гидрогеохимический мониторинг с отбором проб подземных вод в среднем через 2 недели на определение широкого спектра химических элементов и изотопов урана (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015). Для оперативного определения изменений, происходящих в земной коре БРС, с декабря 2023 г. измеряется также окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), pH и температура в режиме реального времени (каждые 2 минуты) в подземных водах двух станций полигона: ст. 9 – Земляничная КБЖД и ст. 184 – Школьная. Первая из них находится в краевом Обручевском разломе Южно-Байкальской впадины, вторая – на Култукской тектонической ступени осевой части БРС (рис. 1).

Гидрогеохимические наблюдения в сочетании с измерениями ОВП подземных вод в режиме реального времени образуют Култукскую сейсмопрогностическую систему мониторинга времени и места сильного землетрясения в БРС. Чтобы эта система стала рабочим инструментом сейсмического прогноза, требуется наработка результативного опыта не только с анализом гидрогеохимических рядов данных, ориентированных на среднесрочную перспективу (Rasskazov et al., 2024), но и данных, получаемых в режиме реального времени для краткосрочной оценки состояния земной коры.

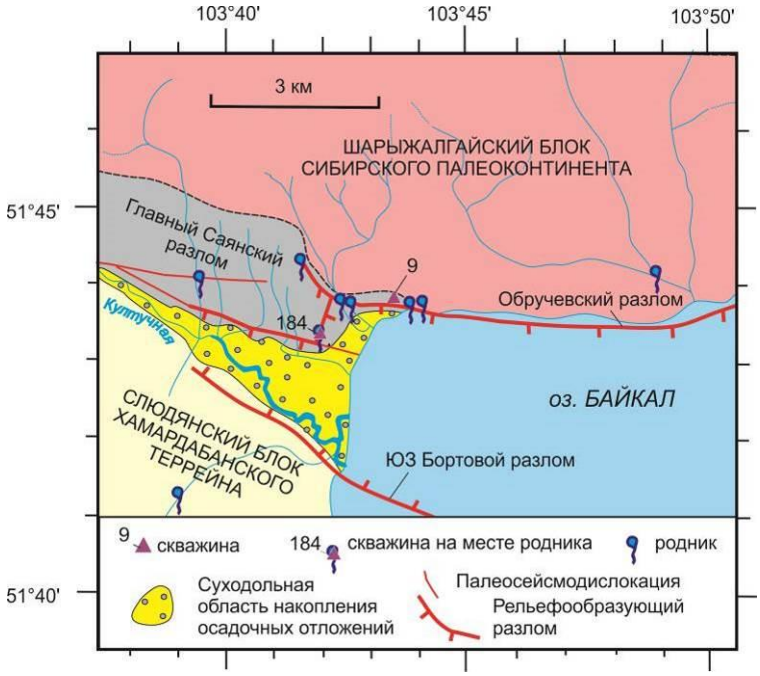

Рис. 1. Схема расположения мониторинговых скважин ст. 9 (Земляничная КБЖД) и ст. 184 (Школьная) с установленными сенсорами для измерений ОВП, pH и температуры в режиме реального времени на западном побережье оз. Байкал (пос. Култук). Условия установки сенсоров охарактеризованы в работе (Рассказов и др., 2023). Палеосейсмодислокации в шовной зоне Главного Саянского разлома показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

Fig. 1. Layout of monitoring wells station 9 (Zemlyanichnaya, Circum-Baikal Railway) and station 184 (Shkolnaya) on the western coast of Lake Baikal (Kultuk settlement) with installed sensors for real-time measuring ORP, pH, and temperature. The installation conditions of the sensors are described by (Rasskazov et al., 2023). Paleoseismic dislocations at the suture zone of the Main Sayan Fault are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

Наблюдения за окислительно-восстановительным режимом подземных вод считаются перспективными для исследований сейсмичности, но пока исследования в этом направлении ограничиваются только теоретическими выкладками (Balk et al., 2009; Freund, 2013; Paudel et al., 2018; Baniya et al., 2024). Практических шагов по использованию ОВП в практике прогноза землетрясений не предпринималось, и какие-либо ряды мониторинговых наблюдений этого параметра подземных вод не известны. Исключение составляют данные, полученные на Култукском полигоне побережья Байкала. Кроме состояния земной коры с реализацией землетрясений, в вариации ОВП вмешиваются другие факторы. В ходе мониторинга подземных вод ст. 9 обозначалась квазипериодичность глубоких отрицательных ОВП-импульсов с 07 февраля до 07 марта 2024 г., связанных с проявлением сизигийных и квадратурных циклов лунно-солнечных приливов (Асламов и др., 2024). Было выявлено влияние на ОВП подземных вод ст. 9 магнитных бурь во время ледостава оз. Байкал (Чебыкин и др., 2024; Рассказов и др., 2025б). Между тем, связь с землетрясениями вариаций ОВП подземных вод отчетливо прослеживалась при подготовке и реализации сильных Северо-Байкальских землетрясений, произошедших 27 декабря 2023 г. и 15 января 2024 г. (Рассказов и др., 2024б).

Цель настоящей работы – представить оперативный отчет о результатах детального анализа вариаций ОВП подземных вод станций 9 и 184 Култукского полигона явно связанных с проявлением землетрясений в середине 2025 г.

Постановка исследования

Измерения ОВП подземных вод проводятся с сильной прокачкой скважины ст. 9 и

более слабой – ст. 184. Разница в прокачке скважин отражается в разных диапазонах вариаций температуры подземных вод (рис. 2).

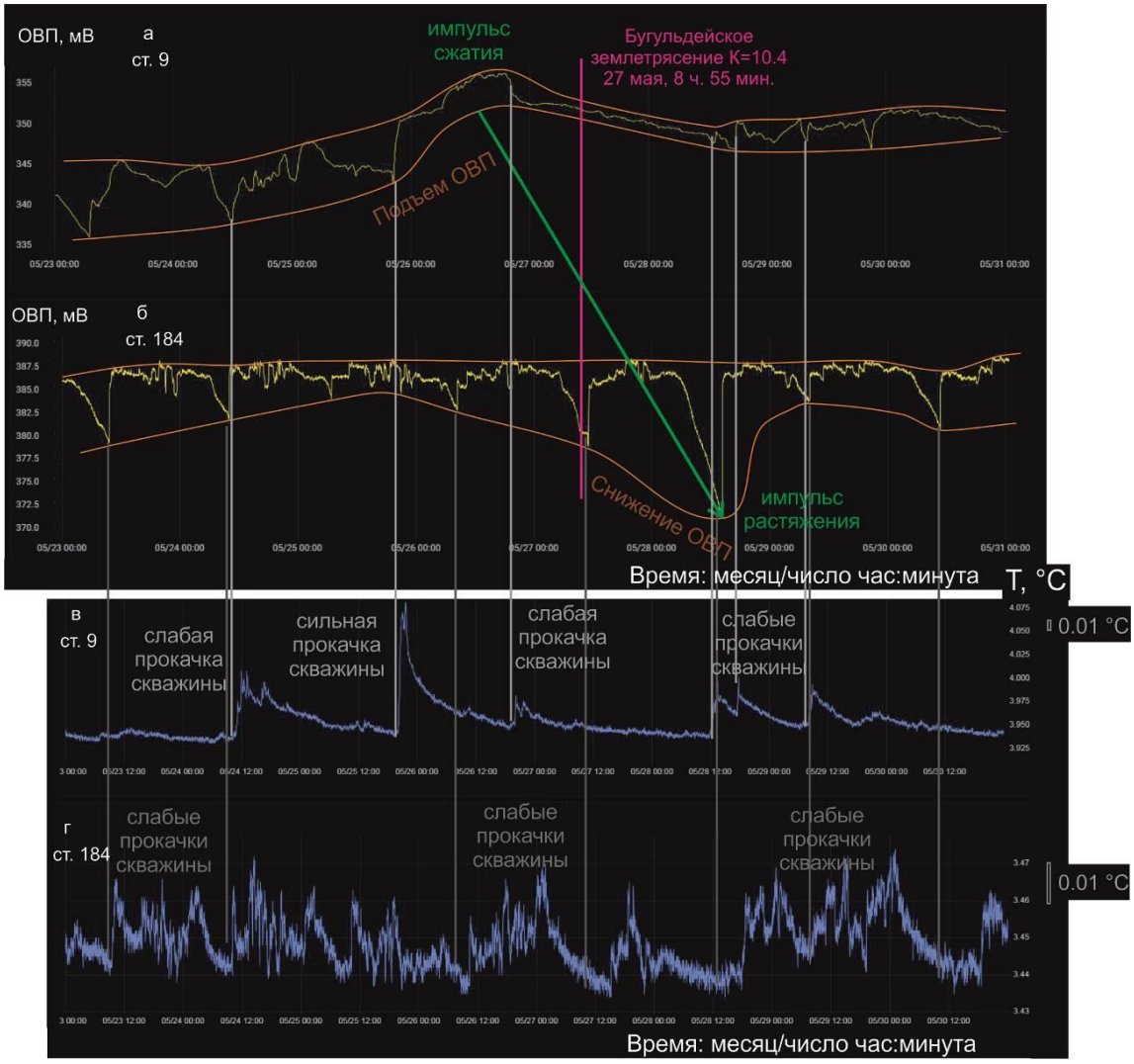

Рис. 2. Диаграмма откликов ОВП в режиме реального времени на слабое (K = 10.4) Бугульдейское землетрясение на Южном Байкале 27 мая 2025 г. на ст. 9 (*а*) и ст. 184 (*б*) в сопоставлении с вариациями температуры в этих же скважинах (*в, г*). Приводятся результаты измерений через каждые 2 минуты для временного интервала с 23 до 31 мая (время местное). Наблюдается максимум ОВП ст. 9 (импульс сжатия земной коры в рельефообразующем краевом Обручевском разломе Южно-Байкальской впадины) перед землетрясением и минимум ОВП ст. 184 (импульс растяжения земной коры в Култукской тектонической ступени осевой части БРС) после него. Переход от импульса сжатия к импульсу растяжения обозначается зеленой линией со стрелкой. Температурная шкала подземных вод ст. 9 сжата приблизительно в 4 раза относительно температурной шкалы подземных вод ст. 184 (для сравнения шкал справа показаны серые столбики по 0.01 °C). На ст. 184 слабые прокачки осуществляются сравнительно равномерно в течение суток, на ст. 9 – более сильные прокачки проводятся приблизительно раз в неделю.

Fig. 2. Diagram of the ORP response in real time regime to the weak Buguldeyka earthquake (K = 10.4) in South Baikal on May 27, 2025 in groundwater at station 9 (*a*) and station 184 (*б*) in comparison with temperature variations in the same wells (*в, г*). Measurements are taken every 2 minutes for the time interval from May 23 to 31 (local time). Displayed are an ORP maximum of station 9 before the earthquake (impulse of compression of the earth's crust in the master Obruchev fault of the South Baikal Basin) and an ORP minimum of station 184 after it (impulse of crustal extension in the Kultuk tectonic step at the axial part of the BRS). The transition from a compression pulse to an extension one is indicated by a green line with an arrow. The temperature scale of groundwater at station 9 is compressed approximately 4 times relative the one at station 184 (for comparison of scales, gray bars of 0.01 °C are shown on the

right). At station 184, weak pumping occurs relatively evenly throughout the day, while at station 9, stronger pumping is performed approximately once a week.

Анализ гидрогеохимических данных по подземным водам ст. 27 за 2020–2025 гг. показал, что Хэнтэйское землетрясение (ХН2), произошедшее 8 мая 2025 г. в районе Улан-Батора, и Удоканские землетрясения (УД1и УД2), произошедшие 18 мая 2025 г. на хр. Удокан, могут восприниматься как предварительный сигнал о намечающейся структурной перестройке, которая в будущем приведет к перераспределению сейсмической активности с запада БРС в ее центр и на восток (Рассказов и др., 2025б). Сейсмические толчки умеренной силы реализовались в конце апреля и в мае в сейсмических кластерах запада и востока БРС и не проявлялись в ее центре. Однако, 27 мая в центре произошло слабое Бугульдейское землетрясение. Отклики ОВП подземных вод обозначают максимум на ст. 9 (импульс сжатия в Обручевском разломе) перед этим землетрясением и минимумом на ст. 184 (импульс растяжения на Култукской тектонической ступени) после него.

Начальная реакция подземных вод на сжатие земной коры перед землетрясением в Обручевском разломе под ст. 9 сменяется реакцией подземных вод на растяжение земной коры после землетрясения под ст. 184 Култукской тектонической ступени. Отклики ОВП этих станций не синхронизируются между собой. Землетрясение реализуется между откликами ОВП.

Опосредованное отслеживание проявлений эффектов сжатия и растяжения земной коры по вариациям ОВП подземных вод Култукского полигона в режиме реального времени обеспечивает оперативную оценку ее состояния в связи с происходящими землетрясениями.

Соотношения землетрясений и записей ОВП

Записи ОВП приводятся для временного интервала с 30 мая до 5 июля 2025 г. по 5-дневным интервалам с перекрытием в 1 день. В интервалах обозначаются землетрясения БРС с сайта (Карта…, 2025).

30 мая – 03 июня. Землетрясения проявляются 01 и 02 июня по местному времени (Селенгинское и Удоканское). До этих землетрясений в подземных водах ст. 184 прослеживаются глубокие минимумы ОВП (на Култукской ступени фиксируются импульсы растяжения). 01 июня импульсы растяжения сменяются слабыми колебаниями ОВП (в деформациях земной коры устанавливается нейтральное состояние). В этот же день в подземных водах ст. 9 наблюдается резкий подъем ОВП (в прокачке скважины подземных вод реализуется сжатие земной коры) с последующим снижением его значений (релаксацией вызванного возмущения). Непосредственно за подъемом ОВП следуют два слабых минимума, которым соответствует Удоканское землетрясение (рис. 3).

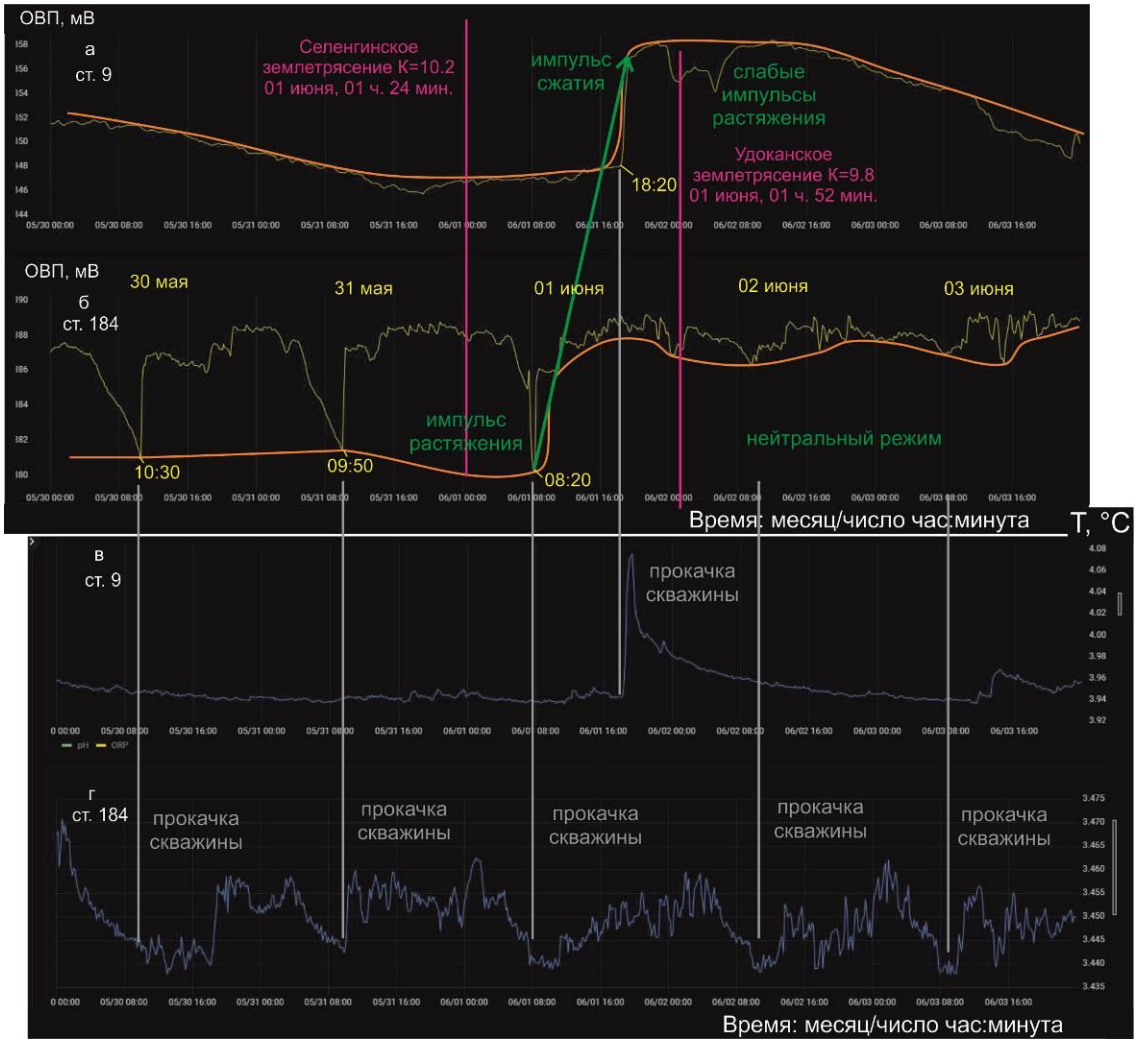

Рис. 3. Графики временных вариаций ОВП 30 мая – 03 июня 2025 г. в подземных водах ст. 9 (*а*) и ст. 184 (*б*) в сопоставлении с вариациями температуры в этих же скважинах (*в, г*). В перестройке ОВП сначала наблюдается смена регулярных глубоких минимумов ОВП (импульсов растяжения земной коры) кривой без импульсов на ст. 184, затем – максимум ОВП (импульс сжатия земной коры) на ст. 9. Переход от регулярных импульсов растяжения к проявлению импульса сжатия обозначается зеленой линией со стрелкой. Температурная шкала подземных вод ст. 9 в 4.5 раза сжата относительно температурной шкалы подземных вод ст. 184 (для сравнения шкал справа показаны серые столбики по 0.02 °С). При одиночной сильной вечерней прокачке 01 июня скважины ст. 9 температура подземных вод начинает возрастать одновременно с возрастанием ОВП в 18 ч. 20 мин. (серая вертикальная линия). При ежедневной утренней прокачке скважины ст. 184 температура подземных вод снижается (серые вертикальные линии). 30 мая – 01 июня прокачкам соответствуют минимумы ОВП, 02 и 03 июня минимумы ОВП не образуются.

Fig. 3. Graphs of time variations of redox potential on May 30 – June 11, 2025 in groundwater at station 9 (*а*) and station 184 (*б*) in comparison with temperature variations in the same wells (*в, г*). In ORP reorganization, deep minima redox potential (crustal extension impulses) at station 184 are followed with a line without those and then a maximum redox potential (crustal compression impulse) is observed at station 9. The transition from extension impulses to displaying a compression one is indicated by a green line with an arrow. The temperature scale of groundwater at station 9 is compressed 4.5 times relative to the one of groundwater at station 184 (gray bars of 0.02 °C are shown on the right for comparison of the scales). During a single strong evening pumping of well station 9 on June 1, the temperature of groundwater starts increasing simultaneously with the increase in ORP (gray vertical line at 18:20). During daily morning pumping of well station 184, the temperature of groundwater decreases. Minimum ORP values correspond to pumpings on May 30 – June 1; no minimum ORP values form on June 2 and 3 (gray vertical lines).

03 – 07 июня. В этом временном интервале 4 июня происходит Бусийнгольское землетрясение умеренной силы (K = 12.7) и 7 июня – менее сильное Ушканье (K = 11.9). Временной интервал от начального Бугульдейского землетрясения серии (Буг, Сел, Уд) до начального Бусийнгольского землетрясения серии составляет 8 дней 9 ч. Повышенная сила Бусийнгольского землетрясения, по сравнению с Ушканьим, свидетельствует о том, что преобладающие сейсмогенные деформации по-прежнему сосредоточены на западе БРС (Рассказов и др., 2025б).

На ст. 184 возмущения ОВП в виде минимумов предшествуют Бугульдейскому землетрясению, произошедшему 4 июня в 18 ч. 23 мин. Минимум 4 июня (снижение ОВП от 388 до 380 мВ) инициируется в 05 ч. 38 мин. (за 12 ч. 58 мин. до Бусийнгольского землетрясения). Минимум 6 июня (снижение ОВП от 391 до 381 мВ) инициируется в 05 ч. 52 мин. (за 28 ч. 44 мин. до Ушканьего землетрясения, произошедшего 7 июня в 10 ч. 36 мин.).

На ст. 9 особых возмущений ОВП перед Бусийнгольским землетрясением 04 июня 2025 г. не наблюдается. Возмущения ОВП происходят после него. Это землетрясение начинается в 18 ч. 23 мин., а возмущение ОВП начинается через 11 мин. (в 13 ч. 34 мин.). Расстояние от ст. 9 до эпицентра Бусийнгольского землетрясения составляет 365 км. Если интерпретировать запаздывание начала возмущения ОВП, как показатель прихода сейсмической волны, ее средняя скорость распространения от эпицентра землетрясения до станции мониторинга (0.55 км/сек) была явно меньше скорости поверхностной сейсмической волны. Мы предполагаем, что в данном случае проявилась преломленная сейсмическая волна. Интерпретация прихода этой волны требует отдельного анализа данных. Возмущение, включающее 3 минимума ОВП, продолжается 25 ч. 36 мин (завершается 05 июня в 20 ч. 10 мин.). Первый минимум обозначает падение ОВП от 351 до 347 мВ, второй – от 352 до 247 мВ, третий – от 351 до 244 мВ.

Судя по вариациям ОВП 04 и 07 июня 2025 г., Култукская тектоническая ступень осевой части БРС (ст. 184) входит в резонанс с главными сейсмическими процессами, отражающимися в землетрясениях умеренной силы (K = 11.9–12.7), тогда как краевой Обручевский разлом Южно-Байкальской впадины (ст. 9) также явно реагирует на произошедшее землетрясение минимумами и максимумами ОВП 04 и 05 июня, но лишь постфактум (рис. 4). После землетрясения 07 июня наблюдается заметное поднятие ОВП ст. 9 в результате прокачки скважины на фоне сжатия земной коры Обручевского разлома.

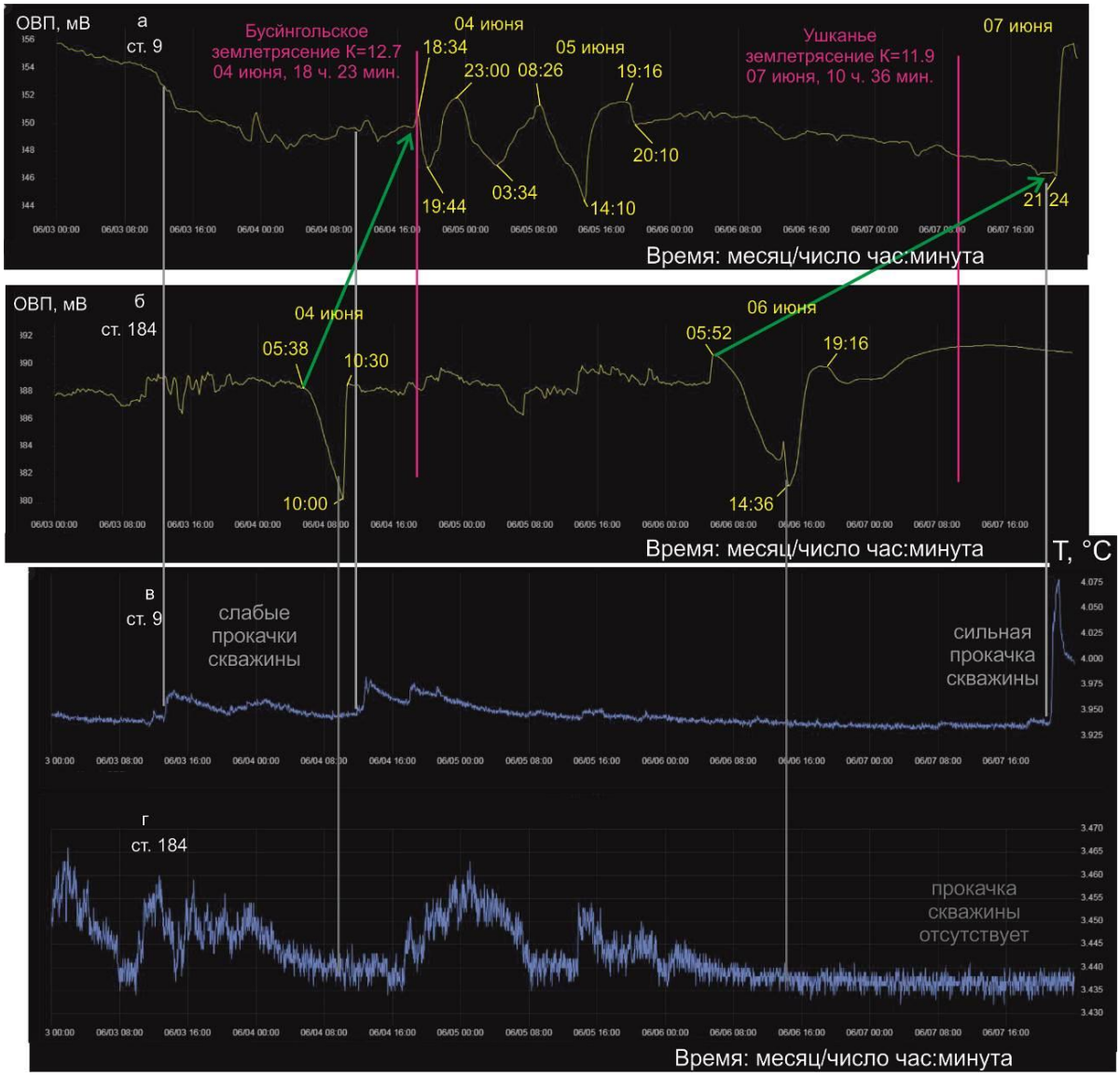

Рис. 4. Графики временных вариаций ОВП 03–07 июня 2025 г. в подземных водах ст. 9 (*а*) и ст. 184 (*б*) в сопоставлении с вариациями температуры в этих же скважинах (*в, г*). Зелеными стрелками обозначено вступление двух импульсов ОВП, которые связаны с проявлением Бусийнгольского и Ушканьего землетрясений.

Fig. 4. Graphs of ORP temporal variations on June 3–7, 2025 in groundwater at stations 9 (*a*) and 184 (*b*) in comparison with temperature variations in the same wells (*в, г*). Green arrows indicate the arrival of two redox potential pulses associated with the displaying Busingol and Ushkaniy earthquakes.

07–11 июня. Во временной интервал попадают три землетрясения: Ушканье (K=11.9), Дельтовое (K=9.5) и Бусийнгольское-2 (K=11.2) (рис. 5).

Различие в показаниях ОВП станций 9 и 184 сохраняется. На ст. 184 07 июня и большую часть суток 08 июня возмущения ОВП отсутствуют. Первый минимум наблюдается 08 июня в интервале от 18 ч. 40 мин. до 19 ч. 30 мин., второе – 09 июня от 04 ч. 14 мин. до 08 ч. 20 мин., третье – 10 июня от 01 ч. 44 мин. до 08 ч. 20 мин., четвертое – 11 июня от 04 ч. 20 мин. до 11 ч. 10 мин. Первые два возмущения (08 и 09 июня) – слабые, два последние (10 и 11 июня) – более сильные.

Следуя логике соотношений между землетрясениями и минимумами ОВП 03–07 июня (см. рис. 4), можно предположить, что два первых слабых минимума ст. 184 на рис. 5 предшествуют слабому Дельтовому землетрясению (K=9.5), а два последних более сильных – предшествуют, соответственно, более сильному землетрясению Бусийнгольскому-2 (K=11.2).

На ст. 9 07 июня производится прокачка скважины, инициирующая резкий подъем

ОВП в 21 ч. 24 мин., обозначающий сжатие в Обручевском разломе. Такой же эффект резкого возрастания ОВП этой станции (сжатие в Обручевском разломе) инициируется вследствие прокачки 11 июня в 18 ч. 54 мин. Других заметных возмущений на графике ОВП ст. 9 не наблюдается.

В данном случае импульс сжатия в Обручевском разломе реализуется в ОВП эффекте подземных вод только в режиме прокачки ст. 9. Без прокачки подземные воды этой скважины оказываются нечувствительными к сейсмогенным деформациям земной коры БРС, тогда в подземных водах скважины ст. 184 отклики ОВП ярко выражены вне режима прокачки, хотя, безусловно, прокачка также способствует образованию минимумов ОВП.

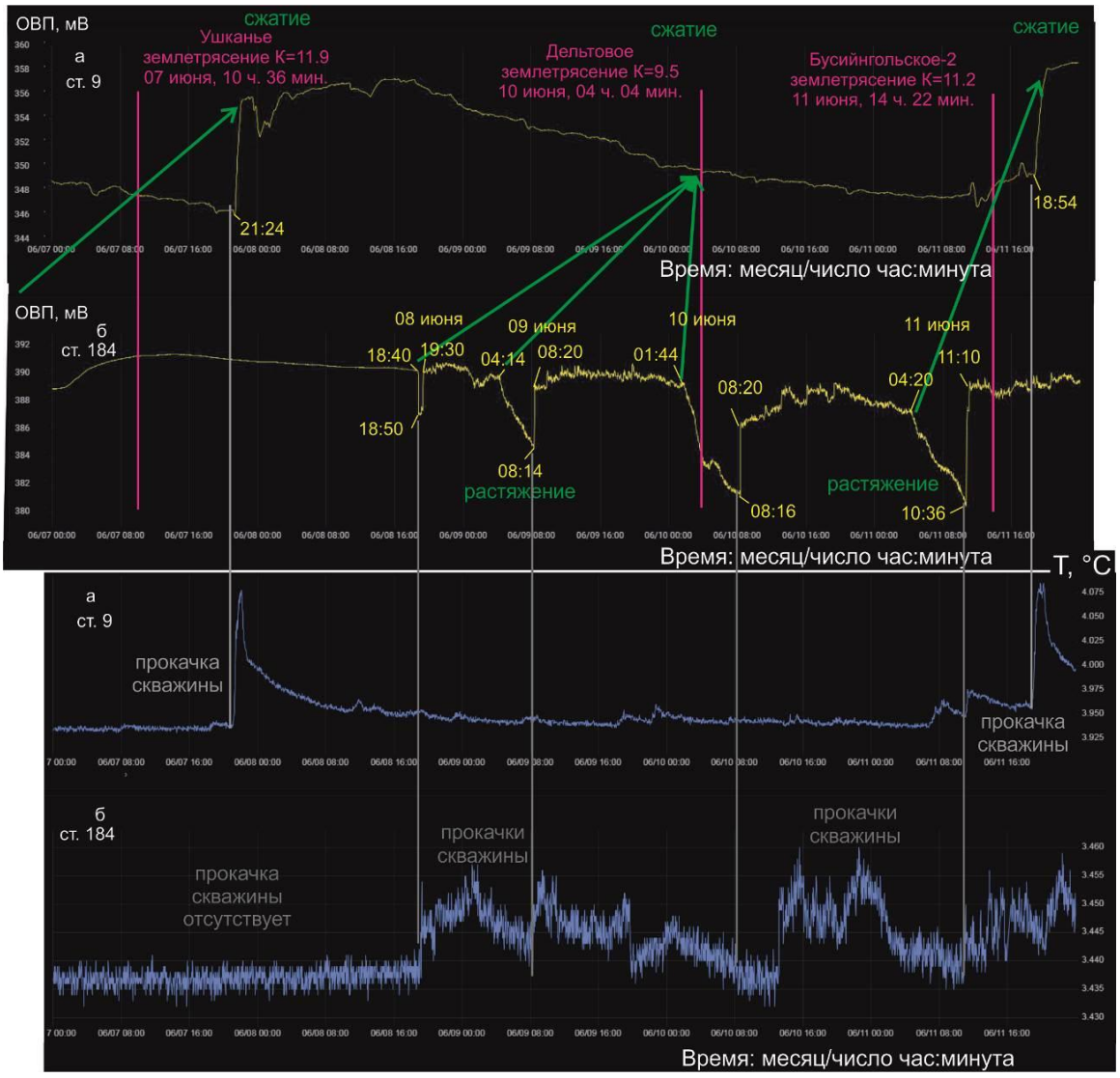

Рис. 5. Графики временных вариаций ОВП 07–11 июня 2025 г. в подземных водах ст. 9 (*а*) и ст. 184 (*б*) в сопоставлении с вариациями температуры в этих же скважинах (*в, г*). Показано время трех землетрясений, которым соответствует проявление импульсов растяжения перед ними на Култукской тектонической ступени. Соответствующее импульсам растяжения сжатие в Обручевском разломе наблюдается при прокачке скважины (землетрясения Ушканье и Бусийнгольское-2), а без ее прокачки не выявляется (землетрясение Дельтовое).

Fig. 5. Graphs of temporal variations of ORP on June 7–11, 2025 in groundwater at stations 9 (*a*) and 184 (*b*) in comparison with temperature variations in the same wells (*в, г*). The time of three earthquakes corresponding to the manifestation of extension pulses before them on the Kultuk tectonic step is shown. The compression corresponding to the extension pulses in the Obruchev fault is observed during well pumping (the Ushkanye and Busingol-2 earthquakes), and is not detected without pumping (the Delta earthquake).

11–15 июня 2025 г. В первой половине этого интервала происходят два землетрясения – Бусийнгольское-2 (K=11.2) и Кыренское (K=9.8), соответственно, 11 и 12 июня. Эти землетрясения завершают серию сейсмических событий БРС, начавшихся с Бусийнгольского события 04 июля. Серия землетрясений продолжалась 7 дней 4 ч.

Первое из них (Бусийнгольское-2), реализующееся 11 июня, имеет неопределенность в ОВП подземных вод на ст. 9 и проявляется только благодаря прокачке скважины, второе (Кыренское) происходит 12 июня на фоне снижения ОВП подземных вод этой станции с образованием минимума 13 июня в 10 ч. 24 мин. В Обручевском разломе после сжатия проявляется импульс растяжения.ОВП минимумы продолжают проявляться в подземных водах ст. 184 (в Култукской тектонической ступени действуют импульсы растяжения) до минимума 14 июня в 09 ч. 20 мин. Режим растяжения на этой станции нивелируется 14 июня в 09 ч. 30 мин., а на ст. 9 в 19 ч. 00 мин. Таким образом, вариации ОВП подземных вод согласуются с выводом о том, что Кыренское землетрясение 13 июня завершает серию землетрясений, происходящих с 04 до 12 июня. Перестройка реализуется в общем растяжении земной коры не только на Култукской тектонической ступени, но и в Обручевском разломе. Если учесть проявление в вариациях ОВП подземных вод ст. 9 импульсов растяжения и сжатия в начале серии землетрясений, 04 и 05 июня (см. рис. 4), можно сделать вывод о едином отклике на всю серию землетрясений продолжительного сжатия в Обручевском разломе с 05 до 11 июня, предваряющегося импульсами растяжения до интервала сжатия (04 и 05 июня) и после него (12 июня). Растяжение Култукской ступени продолжается после 13 июня и переходит в нейтральный режим после минимума 14 июня 09 ч. 20 мин. – 09 ч. 30 мин.

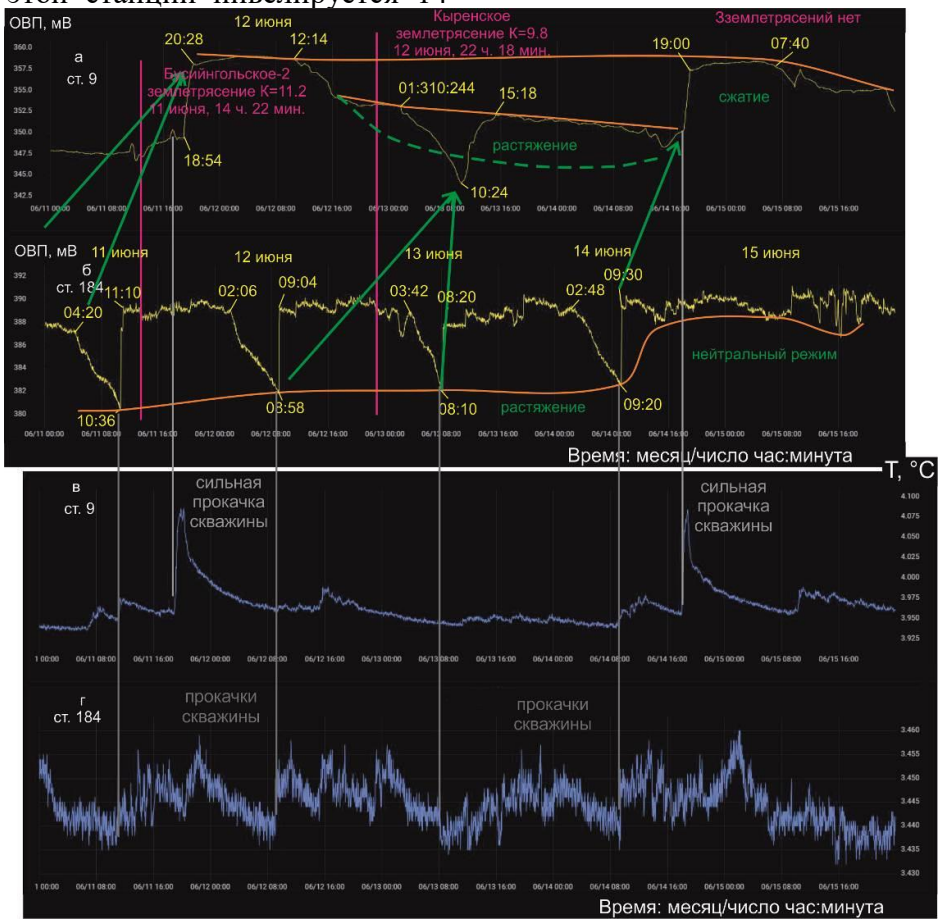

Рис. 6. Графики временных вариаций ОВП 11–15 июня 2025 г. в подземных водах ст. 9 (*а*) и ст. 184 (*б*) в сопоставлении с вариациями температуры в этих же скважинах (*в, г*). Показано время двух землетрясений.

Fig. 6. Graphs of time variations of redox potential on June 11–15, 2025 in groundwater at station 9 (*a*) and station 184 (*б*) in comparison with temperature variations in the same wells (*в, г*). The time of two earthquakes is shown.

15–19 июня 2025 г. 7-дневная серия землетрясений 04–12 июня заканчивается, и в интервале 15–19 июня происходит одиночное (Удоканское) землетрясение 17 июня (K=10.5). Это относительно слабое сейсмическое событие отделяется от предшествующей серии землетрясений небольшим асейсмичным интервалом, длившимся 04 дня 10 ч.

В плавно опускающейся линии ОВП подземных вод ст. 9 землетрясение не выражено, но вписывается во второй минимум ОВП 17 июня 08 ч. 24 мин. подземных вод ст. 184, который обозначает растяжение земной коры Култукской тектонической ступени. В конце интервала, 18 и 19 июня, в подземных водах ст. 9 происходят возмущения ОВП, вызванные прокачкой скважины и отражающие сжатие земной коры в Обручевском разломе, тогда как в минимумах ОВП подземных вод ст. 184 по-прежнему отражается господствующее растяжение Култукской тектонической ступени (рис. 7).

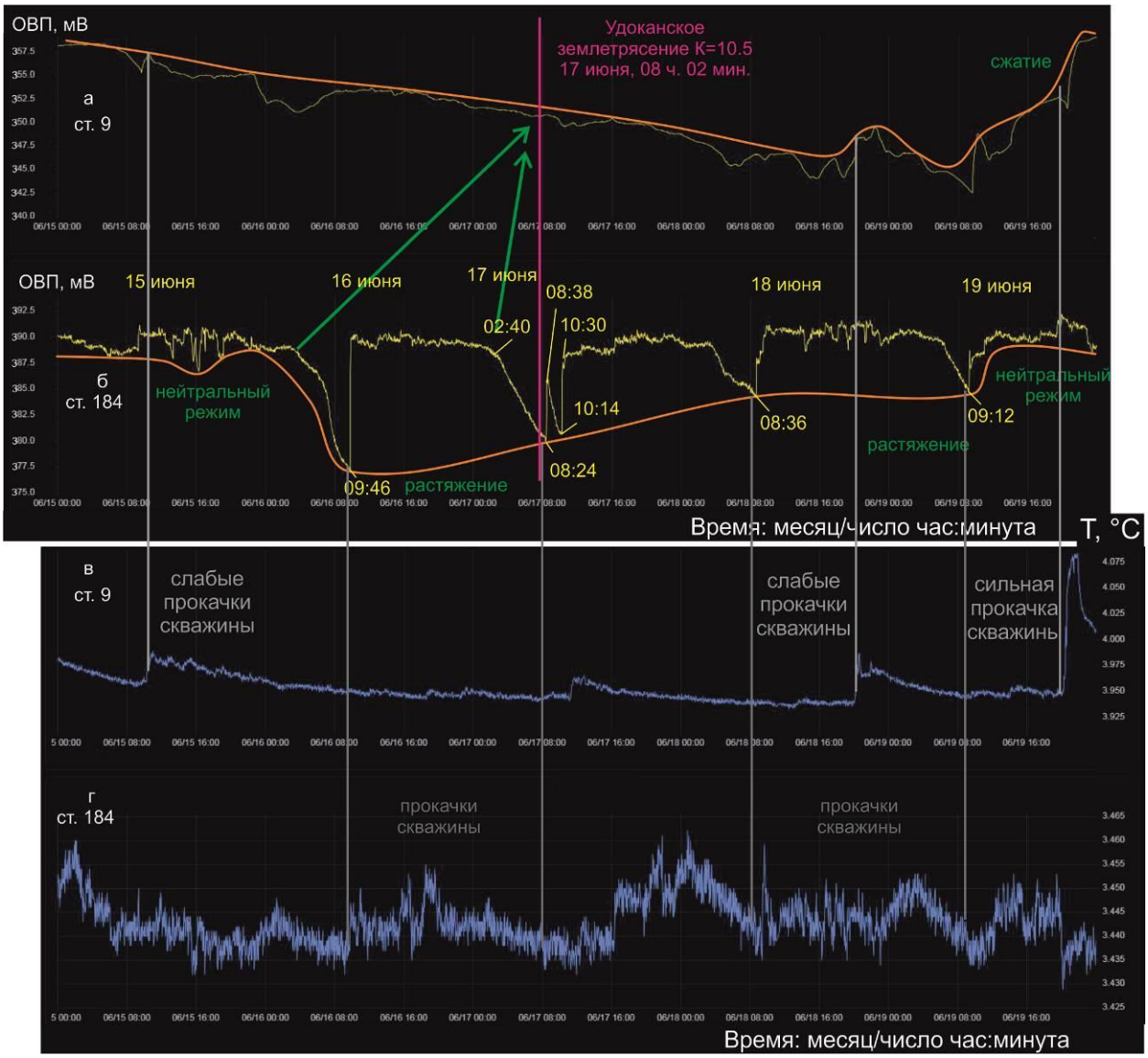

Рис. 7. Графики временных вариаций ОВП 15–19 июня 2025 г. в подземных водах ст. 9 (*а*) и ст. 184 (*б*) в сопоставлении с вариациями температуры в этих же скважинах (*в, г*). Показано время одиночного Удоканского землетрясения.

Fig. 7. Graphs of ORP temporal variations on June 15–19, 2025 in groundwater at stations 9 (*a*) and 184 (*б*) in comparison with temperature variations in the same wells (*в, г*). The time of the single Udokan earthquake is shown.

19–23 июня 2025 г. После 17 июня в БРС наступает асейсмичный режим, продолжающийся до 25 июня. Интервал 19–23 июня приходится на середину асейсмичного интервала.

На ст. 9 наблюдаются три подъема и опускания ОВП подземных вод, характеризующих преобладание фактора сжатия в Обручевском разломе. Эта линия осложняется многочисленными малоамплитудными минимумами, отражающими наложение слабых импульсов растяжения.

На ст. 184 прослеживается последовательная смена глубоких минимумов ОВП подземных вод интервала 16–19 июня частыми малоамплитудными минимумами с меняющейся квазипериодичностью. За глубоким минимумом 19 июня в 09 ч. 12 мин. следует малый минимум (в 23 ч. 28 мин.) и еще два минимума 20 июня (в 07 ч. 44 мин. и в 12 ч. 54 мин.). Начиная с середины дня 20 июня, нижняя огибающая линия протягивается параллельно оси абсцисс. Амплитуды колебаний ОВП меняются по отрезкам. Особо выделяется отрезок 23 июня с 00 ч. 48 мин. до 12 ч. 08 мин., в котором амплитуда колебаний ОВП резко сокращается относительно амплитуд ОВП в предшествующих и последующих записях.

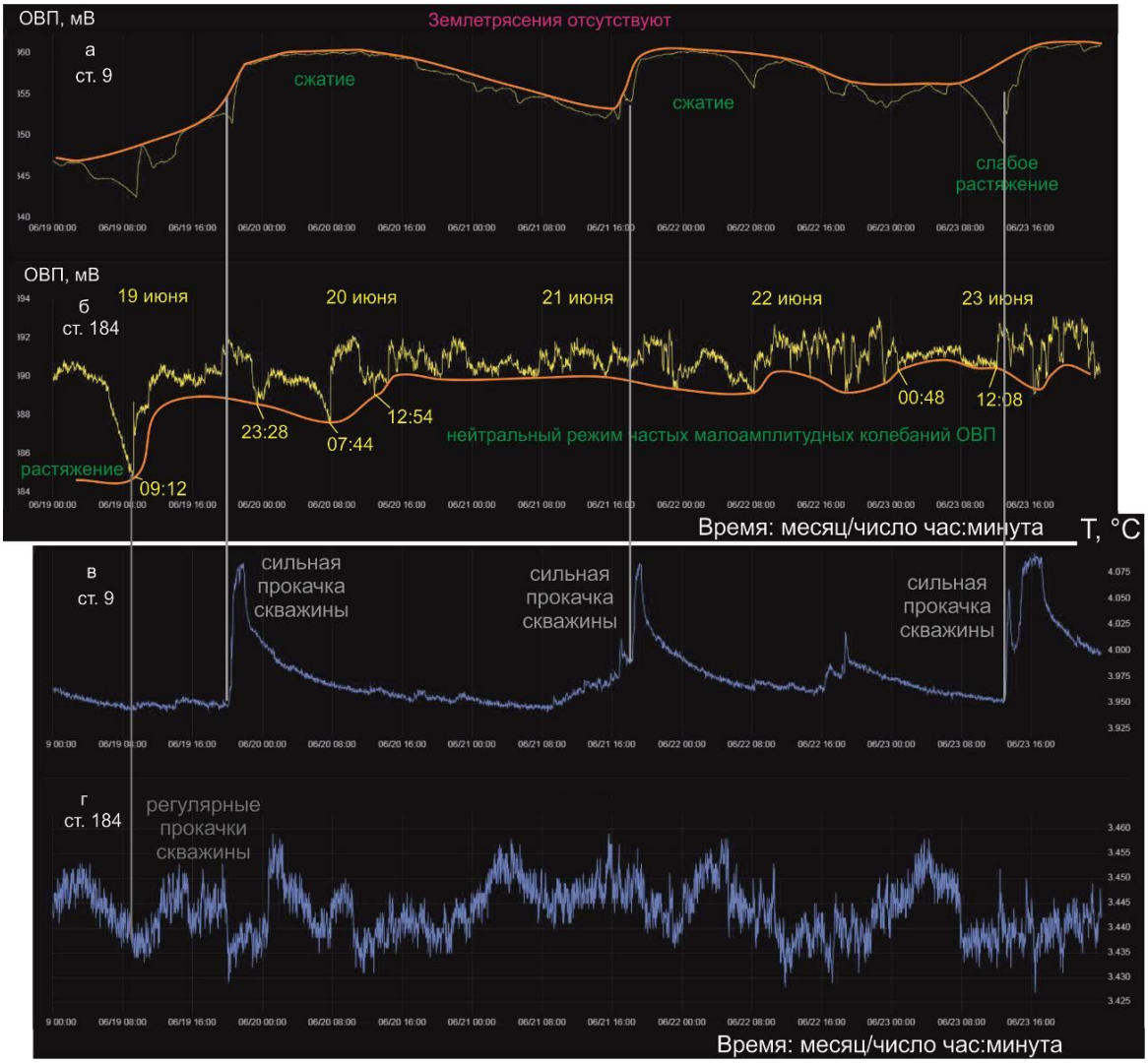

Рис. 8. Графики временных вариаций ОВП 19–23 июня 2025 г. в подземных водах ст. 9 (*а*) и ст. 184 (*б*) в сопоставлении с вариациями температуры в этих же скважинах (*в, г*). Землетрясения отсутствуют.

Fig. 8. Graphs of temporal ORP variations on June 19–23, 2025 in groundwater at stations 9 (*a*) and 184 (*б*) in comparison with temperature variations in the same wells (*в, г*). There are no earthquakes.

23–27 июня 2025 г. Одиночное Верхне-Ангарское землетрясение (K=10.3), произошедшее 25 июня в 05 ч. 39 мин. (время местное), отделяется от предшествующего Удоканского землетрясения 17 июня асейсмичным интервалом, длившимся 8 дней 21 ч. Оба землетрясения относятся к северо-востоку БРС. Сильная прокачка скважины ст. 9 перед этим землетрясением нарушает минимум 23 июня (условия растяжения в Обручевском разломе). В подземных водах ст. 184 Верхне-Ангарскому землетрясению соответствует глубокий минимум ОВП, который был инициирован 25 июня в 00 ч. 52 мин. и достиг экстремального значения в 09 ч. 58 мин. (рис. 9).

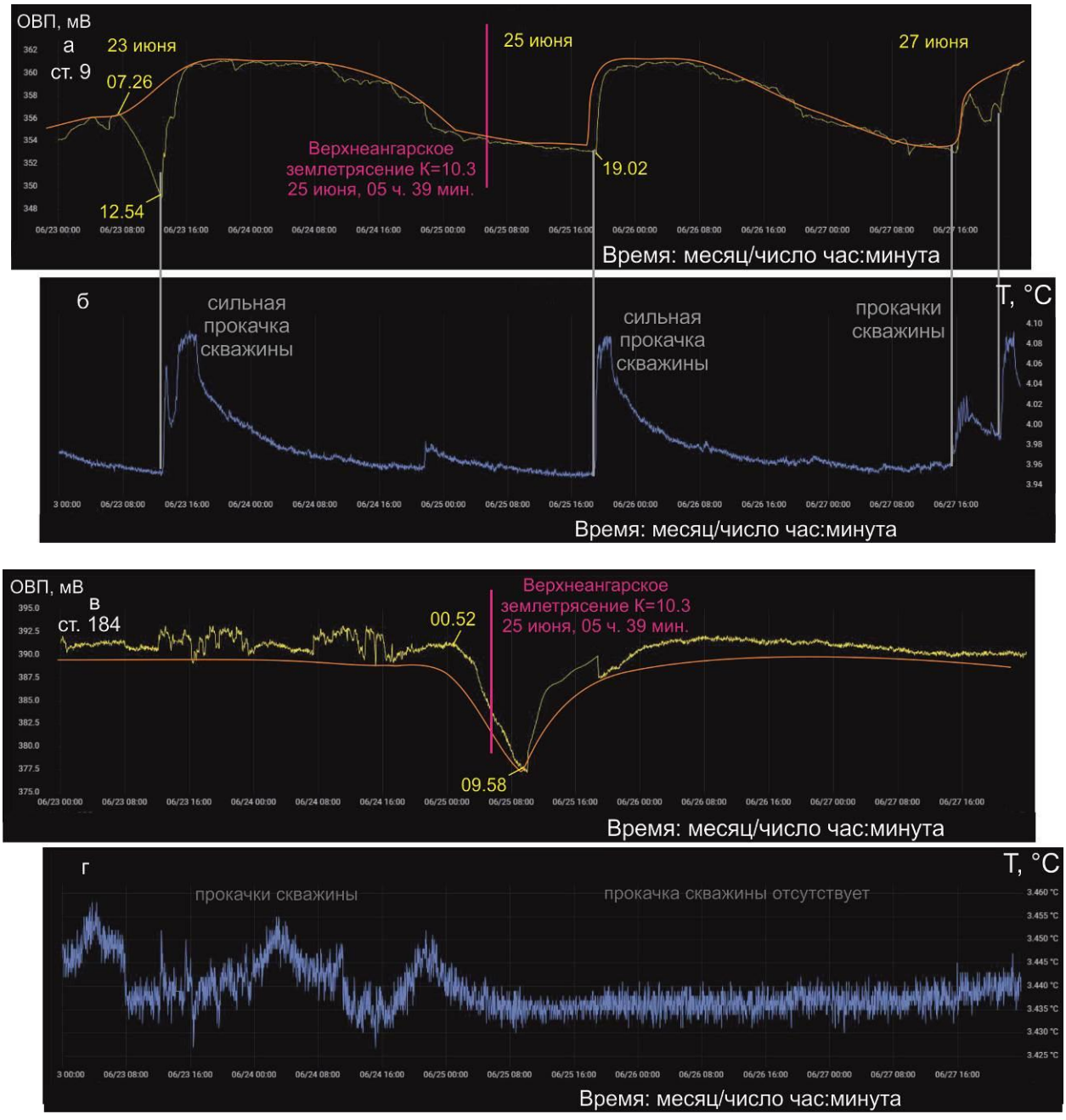

Рис. 9. Графики временных вариаций ОВП (*а, в*) и температуры (*б, г*) в подземных водах, соответственно, станций 9 и 184 23–27 июня 2025 г.

Fig. 9. Graphs of temporal variations of ORP (*а, в*) and temperature (*б, г*) in groundwater at stations 9 and 184, respectively on June 23–27, 2025.

27 июня–01 июля 2025 г. Землетрясений не происходит. В подземных водах ст. 9 в максимуме ОВП 28 июня проявляется сжатие в Обручевском разломе, сменяющиеся 29 июня спонтанными минимумами ОВП (импульсами растяжения) в 04 ч. 18 мин. и 13 ч. 06 мин. В подземных водах ст. 184 ОВП снижается со слабыми проявлениями минимумов. Минимумы образуются в разное время суток (рис. 10).

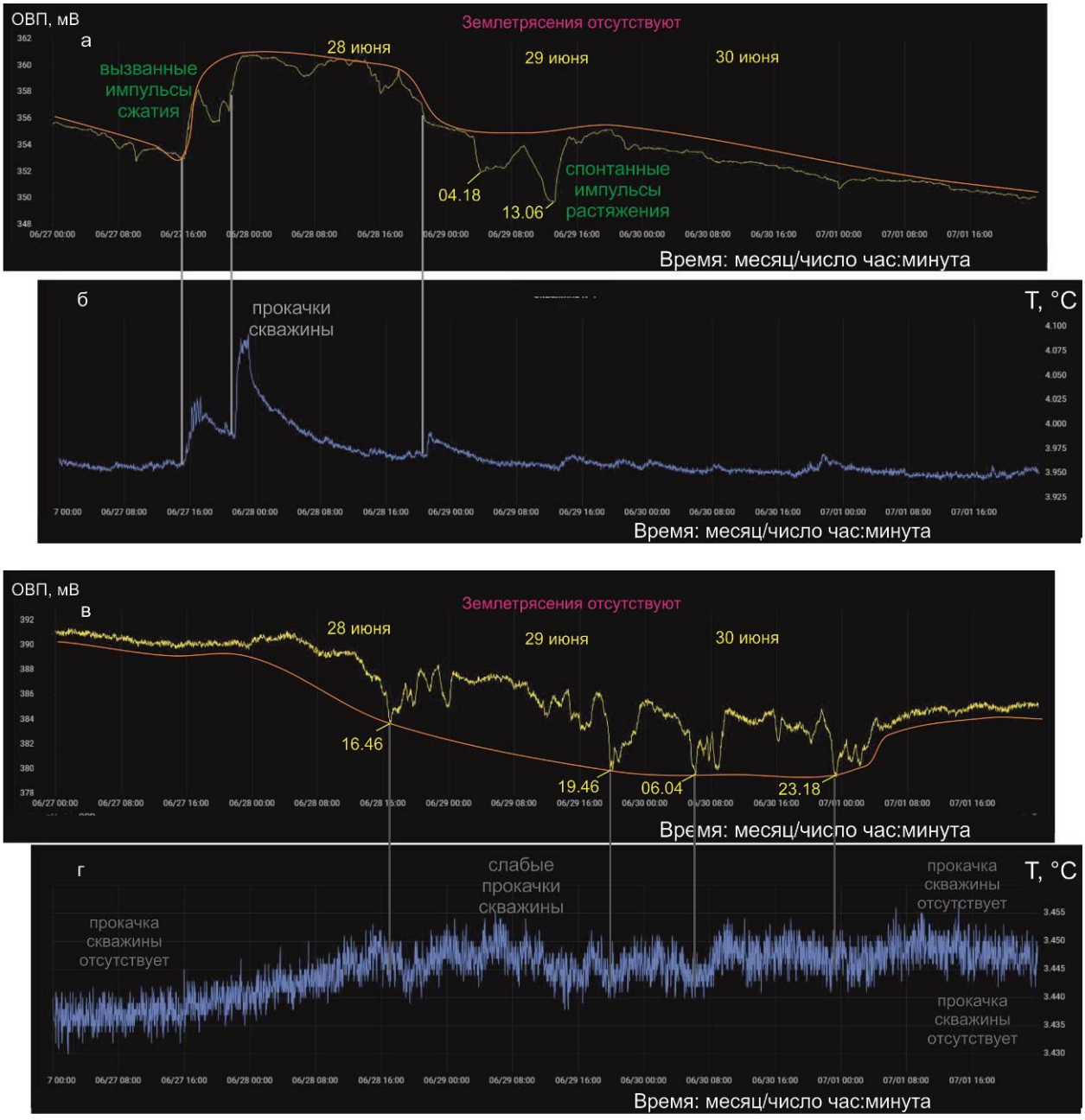

Рис. 10. Графики временных вариаций ОВП (*а, в*) и температуры (*б, г*) в подземных водах, соответственно, станций 9 и 184 27 июня – 1 июля 2025 г.

Fig. 10. Graphs of temporal variations of ORP (*a*) and temperature (*б*) in groundwater at station 184, respectively on June 27 – July 1, 2025.

01–05июля 2025 г. В этом интервале происходит одиночное землетрясение в районе г. Забайкальска (K=11.5) 02 июля в 20 ч. 14 мин. Забайкальское землетрясение отделяется от предшествующего Верхне-Ангарского землетрясения 25 июня асейсмичным интервалом, длившимся 7 дней 15 ч. Землетрясение вновь относится к северо-востоку БРС.

В подземных водах ст. 9 Забайкальское землетрясение вызывает минимумы 03 июля

в 09 ч. 04 мин. и 18 ч. 26 мин. (спонтанные импульсы растяжения в Обручевском разломе). Прокачка скважины 04 июля влечет за собой подъем ОВП (сжатие в Обручевском разломе), которое, однако, неустойчиво, о чем свидетельствуют минимумы 05 июля.

В подземных водах ст. 184 Забайкальское землетрясение вызывает слабое снижение ОВП (растяжение в Култукской ступени) через 18 мин. Этот эффект рождается на фоне длительного (более суток) отсутствия прокачки скважины и длится с 20 ч. 32 мин. до 23 ч. 16 мин. Прокачка включается 04 июля в 12 ч. 46 мин. и вызывает резкий подъем ОВП, что свидетельствует о реализации в Култукской тектонической ступени импульса сжатия (рис. 11). Этот пример демонстрирует необходимость постоянного обновления воды скважины в режиме прокачки. В то же время становится понятной реакция относительного возрастания температуры воды скважины на прокачку как показателя поступления порции подземных вод из более нагретой глубинной части коры.

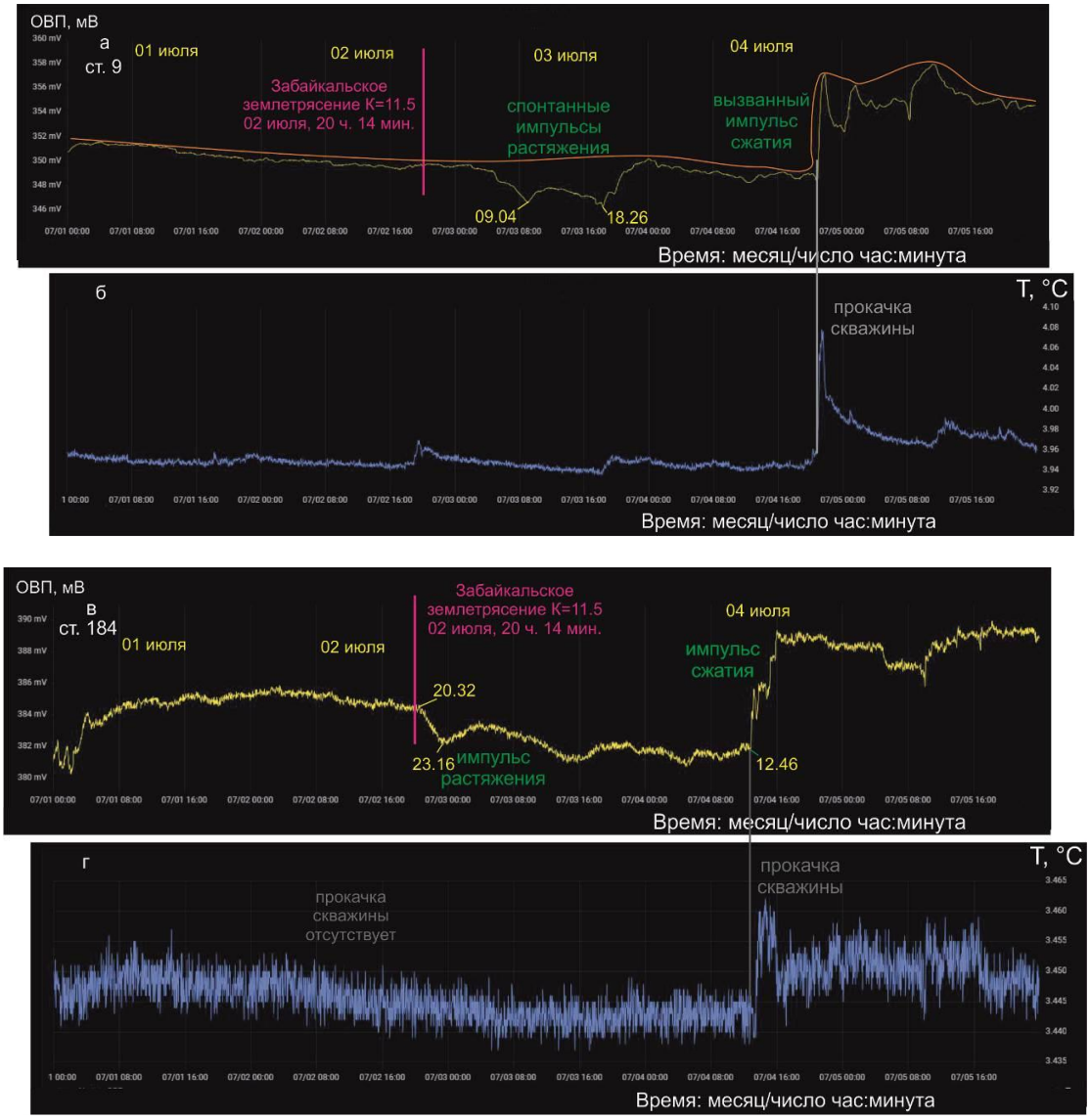

Рис. 11. Графики временных вариаций ОВП (*а, в*) и температуры (*б, г*) в подземных водах, соответственно, станций 9 и 184 01 – 05 июля 2025 г. Происходит Забайкальское землетрясение 02 июля.

Fig. 11. Graphs of temporal variations of ORP (*a*) and temperature (*б*) in groundwater at station 184, respectively on July 01 – 05, 2025. earthquakes. The Transbaikal earthquake occurs on July 2.

05–10 июля 2025 г. В этом интервале происходят слабые землетрясения на западе БРС. 06 июля линия ОВП подземных вод ст. 9 имеет изрезанный вид. Линия ОВП подземных вод ст. 184 дает глубокие минимумы после этих землетрясений (рис. 12).

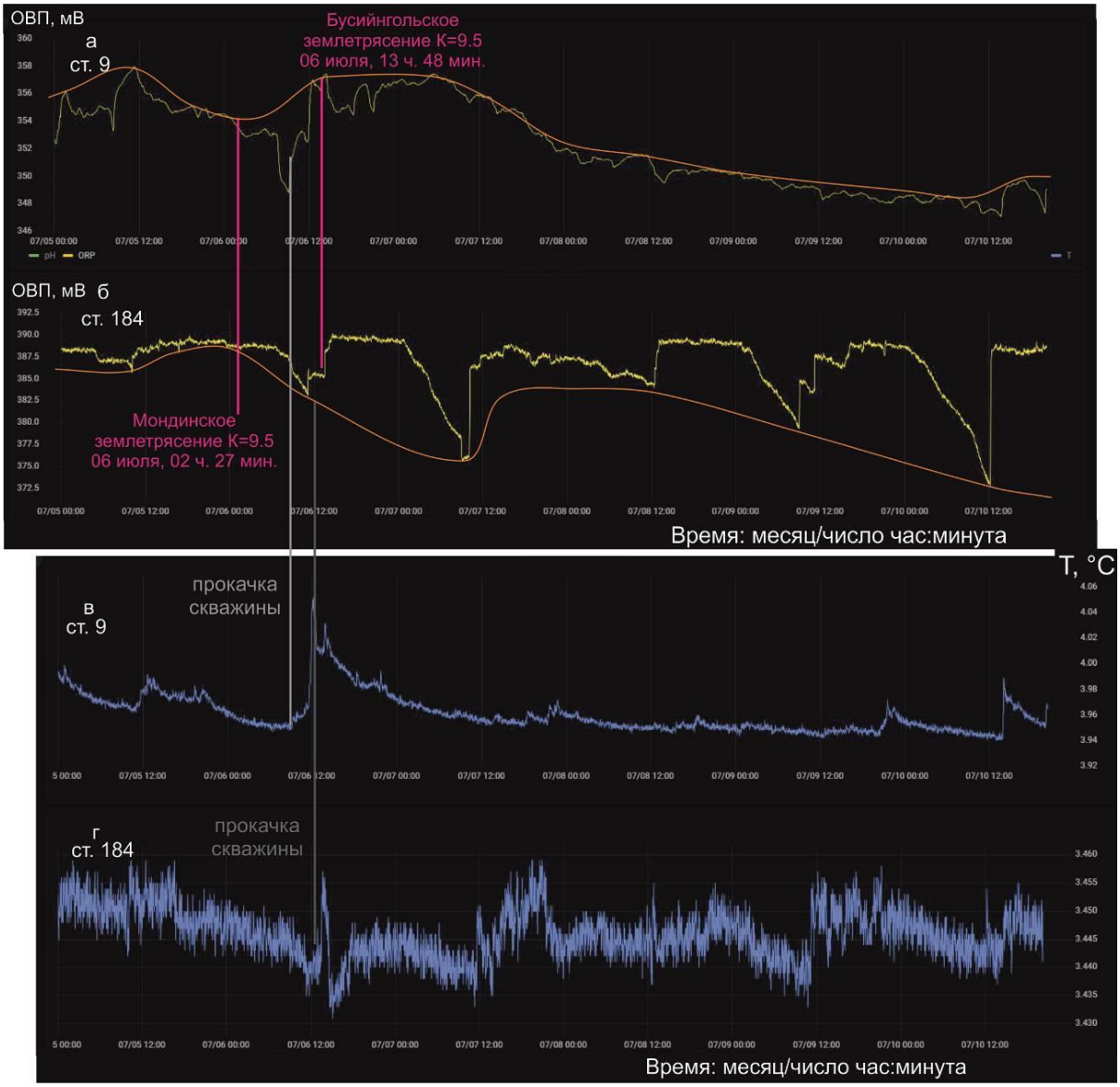

Рис. 12. Графики временных вариаций ОВП (*а, в*) и температуры (*б, г*) в подземных водах, соответственно, станций 9 и 184 5 – 10 июля 2025 г. Два слабых землетрясения происходят 06 июля на западе БРС.

Fig. 12. Graphs of temporal variations of ORP (*a*) and temperature (*б*) in groundwater at station 184, respectively on July 5 – 10, 2025. Two weak earthquakes occur on July 6 in the west of the BRS.

Обсуждение результатов

В проявлении землетрясений БРС с 23 мая до 5 июля 2025 г. наблюдается недельная квазипериодичность. В вариациях ОВП ст. 9 обозначается интервал с 4 до 12 июня, в котором преобладает сжатие земной коры, но в начале и конце этого интервала проявляются импульсы растяжения (см. рис. 4–6). На ст. 184 отчетливо прослеживаются вариации ОВП, укладывающиеся в интервалы от 5 до 11 дней (рис. 10). Следовательно, недельная квазипериодичность наблюдается не только в проявлении землетрясений БРС, но и в вариациях ОВП. Импульсы растяжения демонстрируются минимумами ОВП ст. 184 Култукской тектонической ступени (рис. 13).

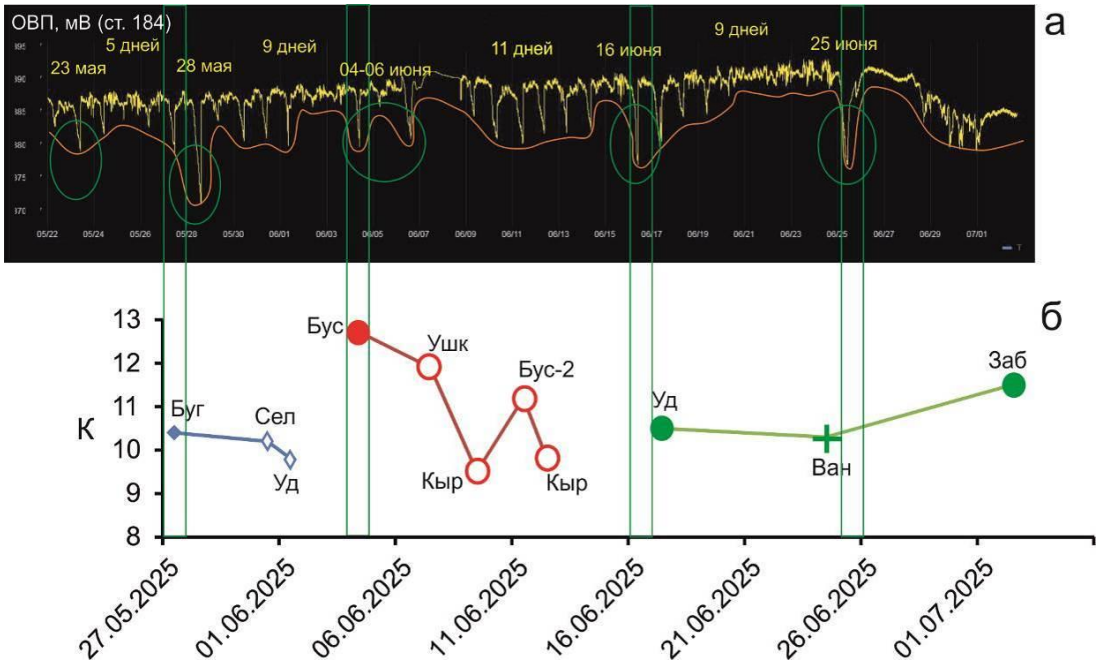

Рис. 13. Диаграмма временных вариаций ОВП подземных вод на ст. 184 с 23 мая до 05 июля 2025 г. (44 дня). Землетрясения (в порядке реализации): Буг – Бугульдейское, Сел – Селенгинское, Уд – Удоканское, Бус – Бусийнгольское, Ушк – Ушканье, Кыр – Кыренское, Бус-2 – Бусийнгольское-2, Кыр – Кыренское, Уд – Удоканское, Ван – Верхнеангарское, Заб – Забайкальское. Вертикальными зелеными линиями выделение перестройки состояния земной коры.

Fig. 13. Diagram of temporal variations in ORP groundwater at station 184 from May 23 to July 05, 2025 (44 days). Earthquakes (in order of occurrence): Буг – Buguldeika, Сел – Selenga, Уд – Udokan, Бус – Busingol, Ушк – Ushkanye, Кыр – Kyren, Бус-2 – Busiyngol-2, Кыр – Kyren, Уд – Udokan, Ван – Verkhnyaya Angara, Заб – Trasbaikal. The vertical green lines highlight structural reorganizations of the earth's crust.

Недельная квазипериодичность была свойственна импульсному возрастанию концентрации изотопа ^{234}U подземных вод ст. 27 Култукской тектонической ступени перед двумя Северо-Байкальскими землетрясениями, произошедшими 27 декабря 2023 г. и 15 января 2024 г. Изменения концентрации этого изотопа в подземных водах связывалось с импульсами растяжения земной коры. В настоящей работе недельная квазипериодичность обозначается минимумами ОВП подземных вод ст. 184, также обозначающими импульсы растяжения земной коры. В сущности, импульсы возрастания концентрации изотопа ^{234}U и снижения ОВП в подземных водах имеют одну и ту же природу. Исходя из проявления недельной квазипериодичности концентрации изотопа ^{234}U подземных вод ст. 27 перед сильными Северо-Байкальскими землетрясениями конца 2023 – начала 2024 гг., недельная квазипериодичность вариаций ОВП подземных вод ст. 184 может интерпретироваться как показатель приближающегося нового сильного землетрясений в БРС.

Запускающее Муринское землетрясение умеренной силы (K=12.3) Байкало-Хубсугульской активизации 06 июля 2020 г. было отделено от первого сильного Быстринского землетрясени асейсмичным интервалом, длившимся 66 дней, т.е. больше 2 месяцев. Перед Северо-Байкальскими землетрясениями режим недельной квазипериодичности длился около 75 дней, т.е. порядка 2.5 месяцев (Рассказов и др., 2025б). Если принять за точку отсчета текущей нестабильности земной коры время Бугульдейского землетрясения 27 мая 2025 г., сильное землетрясение следует ожидать в начале–середине августа. Если же считать запуск механизма перераспределения сейсмичности с запада на восток БРС со времени Хэнтэйского землетрясения

(XH2), произошедшего 8 мая 2025 г. в районе Улан-Батора, сильное землетрясение может произойти уже в середине–конце июля.

Основной мотив развития сейсмичности в середине 2025 г. заключается в подготовке перестройки БРС, которая приведет к перераспределению сейсмической энергии с западной в восточную часть БРС (Рассказов и др., 2025б). Начальные сейсмические события рассматриваемого временного интервала (Буг, Сел и Уд) распределяются вдоль всей БРС. Бусийнгольское землетрясение (Бус, 04 июня, K = 12.7) характеризует сейсмичность запада БРС с последующими событиями временного интервала, завершившегося 12–13 июня. Одиночные землетрясения недельных квазипериодов – Удоканское (Уд, 17 июня, K = 10.5), Верхнеангарское (Ван, 25 июня, K = 10.3) и Забайкальское (Заб, 02 июля, K = 11.5) – переносят акцент на периферию востока БРС, в область угловой транстенсии Японско-Байкальского геодинамического коридора (рис. 14).

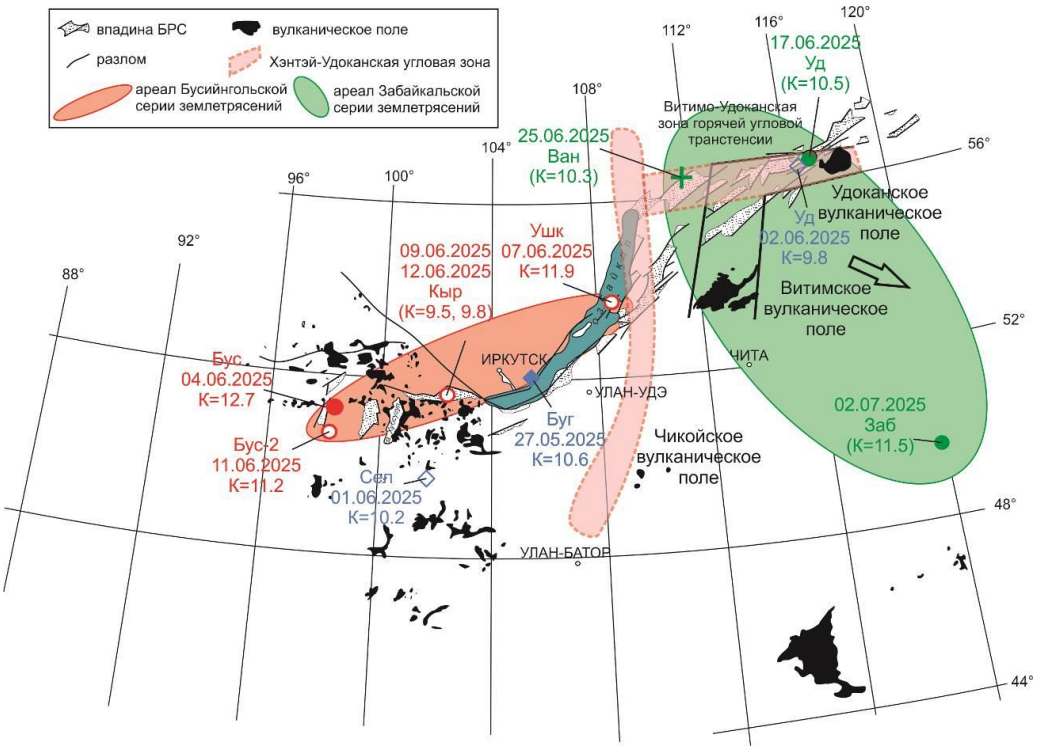

Рис. 14. Пространственное распределение землетрясений относительно кайнозойских вулканических полей БРС. Используется основа схемы из работы (Рассказов и др., 2025б). Условные обозначения землетрясений см. рис. 10. Витимо-Удоканская горячая угловая зона транстенсии образовалась в результате затягивания материала литосферы и подлитосферной мантии к оси Японско-Байкальского геодинамического коридора (направление показано открытой стрелкой) (Рассказов, Чувашова, 2018). Активность этой зоны частично перешла в Хэнтэй-Удоканскую горячую угловую зону. Последняя проявляется в сильных и умеренных землетрясениях после главной структурной перестройки БРС, выраженной ослаблением сейсмичности в июне-сентябре 2023 г. Обе угловые зоны характеризуются проявлением вулканизма на окончаниях угловых структур и его отсутствием в соединительных углах.

Fig. 14. Spatial distribution of earthquakes relative to the Cenozoic volcanic fields of the BRS. The basis of the scheme is used after (Rasskazov et al., 2025b). For earthquakes, symbols are as in Fig. 10. The Vitim-Udokan hot corner zone of transtension was formed due to pull-to-axis forces (direction shown by open arrow) affected lithospheric and sub-lithospheric mantle material in the Japan-Baikal geodynamic corridor (Rasskazov, Chuvashova, 2018). Activities of this zone was partly transformed into the Khentei-Udokan one. The latter is displayed in strong and moderate earthquakes after the main structural reorganization of the BRS, expressed by weakening of seismicity in June-September 2023. Both corner zones are characterized by manifestation of volcanism at the ends of the corner structures and its lack in connecting corners.

К настоящему времени в БРС складывается зависимость энергетического класса землетрясения от временного интервала между сейсмическими событиями. Экстраполяция полученных соотношений K и предсейсмического интервала в область более высоких значений диаграммы рис. 15 предполагает возможность проявления сильного сейсмического события на востоке БРС (K > 13) в случае, если временной интервал между землетрясениями превысит 12 дней.

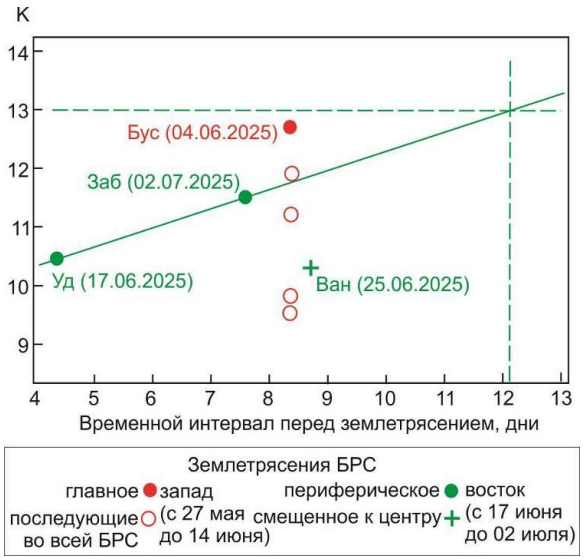

Рис. 15. Диаграмма зависимости энергетического класса землетрясений от временного интервала между ними. С 17 июня 2025 г. линия периферических землетрясений востока БРС экстраполируется в область более высоких значений K по Забайкальскому событию (Заб). Главное начальное Бусийнгольское землетрясение серии (Бус) рассматривается относительно Бугульдейского землетрясения, начинающего серию (Бус, Сел, Уд).

Fig. 15. Diagram energy class (K) versus time interval between earthquakes. Since June 17, 2025, the line of peripheral earthquakes in the east of the BRS is extrapolated to the region of higher K values after the Transbaikal event (Заб). The main initial Busingol earthquake of the series (Бус) is considered in relation to the Buguldeyka earthquake that begins the series (Буг, Сел, Уд).

Заключение

В середине 2025 г. определяется состояние земной коры БРС, характеризующееся недельной квазипериодичностью согласованных между собой гидрогеохимических и сейсмических процессов. В недельную квазипериодичность укладываются землетрясения с энергетическим классом K = 9.5–12.7 и смена откликов ОВП на деформации земной коры Култукской тектонической ступени в осевой части БРС.

По вариациям ОВП в режиме реального времени с 30 мая до 5 июля 2025 г. в подземных водах ст. Школьная (ст. 184) Култукской тектонической ступени осевой части БРС выявляется преобладание растяжения земной коры с его эпизодическим ослаблением до нейтрального режима, а в подземных водах ст. Земляничная КБЖД (ст. 9) краевого Обручевского разлома – преобладание импульсов сжатия земной коры с эпизодическим проявлением импульсов растяжения.

Недельная квазипериодичность импульсов растяжения земной коры устанавливалась по вариациям изотопа ^{234}U в подземных водах ст. 27 осевой части БРС перед сильным Северо-Байкальским землетрясением, поэтому мы допускаем, что наблюдаемые недельные квазипериодические вариации ОВП подземных вод в осевой части БРС, согласованные с недельным квазипериодическим проявлением землетрясений, могут интерпретироваться как признак вхождения земной коры БРС в резонанс с возможным проявлением нового сильного землетрясения. С учетом сложившейся к настоящему времени зависимости энергетического класса землетрясения K от временного интервала между землетрясениями на востоке БРС, мы предполагаем, что новое событие с K > 13 произойдет в ее восточной периферической части, если временной интервал между землетрясениями превысит 12 дней. Такое землетрясение может произойти во второй половине июля – первой половине августа 2025 г.

Возможное сильное землетрясение в БРС следует из оперативного анализа распределения землетрясений и временных вариаций ОВП подземных вод. Более уверенно время и место сильного землетрясения может быть определено с дополнительным использованием гидрогеохимических данных по подземным водам Култукского полигона.

Благодарности

Работа проводится 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»). 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://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 Федерального исследовательского центра Единая геофизическая служба РАН, 2025. http://www.seis-bykl.ru

Рассказов С.В., Чувашова И.С. Вулканизм и транстенсия на северо-востоке Байкальской рифтовой системы. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. 383 с. ISBN 978-5-6041446-3-3

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. 2024а. 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. 2025а. Т. 5, № 1. С. 114-128. DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.114.

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Воднева Е.Н., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В., Чечельницкий В.В., Гилева Н.А. Разработка Култукского сейсмопрогностического полигона: вариации ($^{234}U/^{238}U$) и $^{87}Sr/^{86}Sr$ в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–554. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192

Рассказов С.В., Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Снопков С.В., Чувашова И.С. Расширяющаяся сейсмичность и парагенетические вариации состава подземных вод в Байкальской рифтовой системе в 2020–2025 гг.: оценка текущего состояния земной коры // Геология и окружающая среда. 2025б. Т. 5, № 2.

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

Чебыкин Е.П., Рассказов С.В., Воднева Е.Н., Ильясова А.М., Чувашова И.С., Борняков С.А., Семинский А.К., Снопков С.В. Первые результаты мониторинга $^{234}U/^{238}U$ в

водах из активных разломов западного побережья Южного Байкала // Доклады академии наук. 2015. Т. 460, № 4. С. 464–467.

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

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.

Baniya S., Paudel S.R., Angove M.J., Acharya G., Wagle A., Khatri M., Ngo H.H., Guo W., Mainali B. Theoretical and earthquake-induced groundwater chemistry changes: A perspective // Journal of Hydrology. 2024. Vol. 643, 131917. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131917

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

Paudel S.R., Banjara S.P., Wagle A., Freund F.T. Earthquake chemical precursors in groundwater: a review // Journal of Seismology. 2018. Vol. 22, Issue 5. P. 1293–1314. doi: 10.1007/s10950-018-9739-8.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Chebykin E.P. Chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir versus paragenetically related large earthquakes in the central Baikal Rift System, Siberia // Journal of Earth System Science. 2024b. Vol. 133, 190. https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2

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.

Baniya S., Paudel S.R., Angove M.J., Acharya G., Wagle A., Khatri M., Ngo H.H., Guo W., Mainali B. Theoretical and earthquake-induced groundwater chemistry changes: A perspective // Journal of Hydrology. 2024. Vol. 643, 131917. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131917

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

Chebykin E.P., Rasskazov S.V., Vodneva E.N., Ilyasova A.M., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V. First results of $^{234}U/^{238}U$ monitoring in waters from active faults on the western coast of Southern Baikal // Reports of the Academy of Sciences. 2015. Vol. 460, No. 4. P. 464–467.

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

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

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2025. http://www.seis-bykl.ru

Paudel S.R., Banjara S.P., Wagle A., Freund F.T. Earthquake chemical precursors in groundwater: a review // Journal of Seismology. 2018. Vol. 22, Issue 5. P. 1293–1314. doi: 10.1007/s10950-018-9739-8.

Rasskazov S.V., Chuvashova I.S. Volcanism and transtension in the northeastern Baikal Rift System. Novosibirsk, Academic Publishing

House «GEO», 2018. 384 p. doi: 10.21782/B978-5-6041446-3-3

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 redox potential in groundwater from the Baikal coast: The main controlling factor of ORP disturbances by geomagnetic storms in early 2025 // Geology and Environment. 2025a. Vol. 5, No. 1. P. 114-128 DOI 10.26516/2541-9641.2025.1.114.

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. 2024a. Vol. 4, No. 1. P. 42–60. https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S. Expanding seismicity and paragenetic variations of groundwater compositions in the Baikal Rift System in 2020–2025: Current state assessment of the earth's crust // Geology and Environment. 2025b. Vol. 5, No. 2.

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A. Creating the Kultuk polygon for earthquake prediction: variations of ($^{234}U/^{238}U$) and $^{87}Sr/^{86}Sr$ in groundwater from active faults at the western shore of Lake Baikal // Geodynamics & Tectonophysics. 2015. V. 6, No. 4. P. 519–553. doi:10.5800/GT-2015-6-4-0192.

Rasskazov S.V., Ilyasova A.M., Snopkov S.V., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Chebykin E.P. Chemical hydrogeodynamics of the Kultuk groundwater reservoir versus paragenetically related large earthquakes in the central Baikal Rift System, Siberia // Journal of Earth System Science. 2024b. Vol. 133, 190. https://doi.org/10.1007/s12040-024-02392-2

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 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 st., 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

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 st., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Associate Professor,
664074, Irkutsk, Kurchatov str., 3,
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National Research Technical University,
Leading Researcher,
email: snopkov_serg@mail.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, Ulan-Batorskaya st., 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,
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

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