

## Первый опыт мониторинга косейсмических и асейсмических вариаций ОВП, рН и температуры подземных вод Култукского резервуара в режиме реального времени (Байкальская рифтовая система)

С.В. Рассказов<sup>1,2</sup>, И.А. Асламов<sup>3</sup>, С.В. Снопков<sup>2,4</sup>, В.И. Архипенко<sup>3</sup>,  
А.М. Ильясова<sup>1</sup>, Е.П. Чебыкин<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>2</sup>Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия

<sup>3</sup>Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия

<sup>4</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Сибирская школа геонаук, Иркутск, Россия

**Аннотация.** В двух скважинах Култукского полигона установлены зонды, с помощью которых определяются вариации ОВП, рН и температуры в подземных водах в режиме реального времени. Полученные данные сопоставляются с сейсмическими импульсами 22–25 ноября и 16 декабря 2023 г. в центральной части Байкальской рифтовой системы.

**Ключевые слова:** подземные воды, мониторинг, окислительно-восстановительный потенциал, рН, температура, землетрясение, Байкал.

## First experience in real-time monitoring of coseismic and aseismic ORP, pH, and temperature variations in groundwater from the Kultuk reservoir (Baikal Rift System)

S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, I.A. Aslamov<sup>3</sup>, S.V. Snopkov<sup>2,4</sup>, V.I. Arkhipenko<sup>3</sup>, A.M. Ilyasova<sup>1</sup>, E.P. Chebykin<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>2</sup>Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

<sup>3</sup>Limnological Institute SB RAS, Irkutsk, Russia

<sup>4</sup>Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Irkutsk, Russia

**Abstract.** Automatic probes were installed in two wells in the area of Kultuk settlement to determine real-time variations of ORP, pH, and temperature in groundwater. The obtained data were interpreted and compared with seismic pulses on November 22–25 and December 16, 2023 in the central part of the Baikal Rift System.

**Keywords:** groundwater, monitoring, redox potential, pH, temperature, earthquake, Baikal.

### Введение

Култукский полигон – наиболее чувствительная территория для оценки состояния резервуара подземных вод верхней части коры и ее использования для суждений о характере развития деформаций в средней части коры, сопровождающихся землетрясениями в Байкальской рифтовой системе (БРС).

Наблюдения на полигоне начались в 2012 г. К 2015 г. были получены первые результаты (Рассказов и др., 2015; Чебыкин и др., 2015). Ко времени Байкало-Хубсугульской активизации, начавшейся в конце 2020 – начале 2021 г. сильными землетрясениями (Быстринским, Кударинским и Хубсугульским), уже имелись длительные гидрогеохимические ряды наблюдений, которые свидетельствовали о менявшихся во времени процес-

сах, происходивших в резервуаре подземных вод: вариациях открытия–закрытия микро-трещин, способствующих циркуляции подземных вод и тормозящих ее, вариациях температур в резервуаре (T(Si) и T(Na/Li), вариациях концентрации Hg, а также вариациях окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), водородного потенциала (pH) и температуры воды на устье скважины.

Измерения температуры воды и электрохимических параметров ОВП, pH проводились с частотой в среднем через 2 недели компактными приборами Hanna и Эксперт при отборе проб для гидрогеохимических исследований. При землетрясениях частота опробования увеличивалась до 3–4 дней, а в наиболее сейсмически-активные эпизоды пробы отбирались ежедневно (Рассказов и др., 2023; Снопков, Куроленко, 2023).

В начале декабря 2023 г. на двух станциях Култукского полигона были установлены специально разработанные автономные логгеры с измерительными зондами ТМА-11 для измерения ОВП, pH и температуры воды в режиме реального времени. В настоящей работе приводятся первые результаты, полученные на новых приборах в асейсмических условиях центральной части Байкальской рифтовой системы и с регистрацией эффектов, соответствующих переходу от сейсмического импульса к асейсмичному состоянию.

### **Описание измерительной системы**

Для регистрации и передачи данных измерений был разработан автоматический универсальный логгер. Его основное назначение – сбор, хранение и передача данных с разнообразных датчиков и зондов, измеряющих параметры окружающей среды. При разработке был сделан упор на обеспечение универсальной совместимости с широким спектром гидрологических, гидрохимических и других датчиков. При этом, наличие двух конфигурируемых интерфейсов RS485 с независимыми регулируемым напряжением питания, обеспечивают гибкость при подключении к датчикам различных моделей и фирм изготовителей. Наличие встро-

енного GNSS приемника обеспечивает высокую точностью синхронизации внутренних часов логгера, а также отслеживание текущего местоположения устройства, что предоставляет возможность использовать логгер в геопространственных приложениях. Логгер имеет интерфейс для подключения microSD карты, что позволяет пользователю гибко выбирать подходящий объем хранения данных для каждого конкретного применения: в зависимости от количества датчиков, частоты их опроса и наличия или отсутствия каналов связи с сервером. Логику работы логгера задает микроконтроллер ESP32-S3 последнего поколения с 32-ти разрядной архитектурой RISC-V (производства фирмы Espressif Systems), который является связующим звеном всех элементов устройства.

Логгер поддерживает такие беспроводные каналы связи как Wi-Fi, Bluetooth и NB-IoT сотовую связь. Широкий набор резервных каналов обеспечивает высокую надежность передачи измеренных данных. Для обеспечения сотовой связи в логгере был применен модем SIM7080G (производства SIMCom). Модем поддерживает технологии Narrowband IoT и Category M1. Это технологии широкополосных сетей, оптимизированные для приложений IoT (Интернета вещей) и обеспечивающие расширенное покрытие и эффективное энергопотребление. Дополнительно в логгере реализованы функции энергосбережения, включая спящий режим и эффективное управление питанием, что делает его идеальным решением для удаленных и автономных постановок. Возможна организация питания от солнечной панели или от сети 220 В, а также резервирование питания от аккумулятора, что обеспечивает непрерывную работу устройства в сложных автономных условиях. В качестве аккумулятора используется призматическая Li-ion ячейка NMC емкостью 63 Ач с номинальным напряжением 3.7 В производства CATL, обеспечивающая автономную работу системы измерения в течение 1.5 месяцев.

В логгере реализовано два независимых гибко конфигурируемых канала для работы с измерительными датчиками. Каждый канал включает регулируемый повышающий

преобразователь напряжения на базе микросхемы SX1308 и драйвер SN65HVD1781 для обеспечения связи по линии RS485. Использование интерфейса RS485 для подключения датчиков имеет ряд достоинств, особенно в приложениях, где важны высокая надежность и целостность данных. К основным преимуществам RS485 можно отнести: большая дальность связи (более 1 км), многоточечная передача данных (до 240 датчиков на одной линии), высокая помехоустойчивость.

Таким образом, разработанный универсальный логгер для онлайн мониторинга представляет собой комплексное и адаптируемое решение для сбора гидрохимических и других данных, подходящее как для научно-исследовательских институтов, так и различных служб и структур по мониторингу, нуждающихся в точной и своевременной информации о различных параметрах окружающей среды.

Для измерения pH, ОВП и температуры воды в скважинах был выбран зонд типа ТМА-11. Зонд имеет компактные размеры (длина 21 см при ширине 3 см) и массу около 350 г, что позволяет его использовать даже в самых узких скважинах. Зонд разрабо-

тан для использования в широких, в т.ч. тяжелых условиях эксплуатации: от чистых горных рек, с удельной электропроводностью ниже 20 мкСм/см и заканчивая сточными водами, с проводимостью выше 200 мСм/см. Отличительной особенностью зонда является его долговременная стабильность, не требующая частой перекалибровки. Технические характеристики зонда ТМА-11 приведены в табл. 1.

Измерительные зонды были подключены к разработанному автономным логгером. Период измерения был установлен равным две минуты. Каждое измерение представляет из себя среднее 10 отсчетов параметров, сделанных с частотой 1 Гц. Данные передаются на сервер в г. Иркутск два раза в час. Перед постановкой в скважины зонды ТМА-11 были откалиброваны на стандартных растворах 6.86 и 9.18 pH (производства Kishida Chemical Co.,Ltd., Япония) и на растворе для калибровки ОВП 220мВ/pH7 (производства Mettler Toledo, США). Значения ОВП не калиброваны относительно водорода и воспринимаются в контексте настоящего исследования как относительные меняющиеся характеристики подземных вод.

Т а б л и ц а 1

Технические характеристики зонда ТМА-11

Измерительная часть:	Параметры
<i>Сенсор pH</i>	
Диапазон, pH	От 0 до 13
Разрешение, pH	0.01
Точность, pH	+/- 0.1
<i>Сенсор ОВП</i>	
Диапазон, мВ	От -1000 до +1000
Разрешение, мВ	0.1
Точность, мВ	+/- 2
<i>Сенсор температуры</i>	
Диапазон, °С	От 0 до +50
Разрешение, °С	0.01
Точность, °С	+/- 0.5

### Установка зондов в скважинах

Зонды установлены на мониторинговых станциях 9 (КБЖД, координаты: 51°43.797' с.ш., 103°42.288' в.д.) и 184 (Школьная, координаты: 51°43.430' с.ш., 103°42.012' в.д.) на расстоянии 1624 м друг от друга. Ст. 9 находится в зоне активного Обручевского

разлома, по которому ложе Южно-Байкальской впадины опущено в позднем кайнозое приблизительно на 4 км, ст. 184 – на торцовой Култуковской тектонической ступени Южно-Байкальской впадины, наклоненной к востоку, в сторону Байкала (рис. 1).



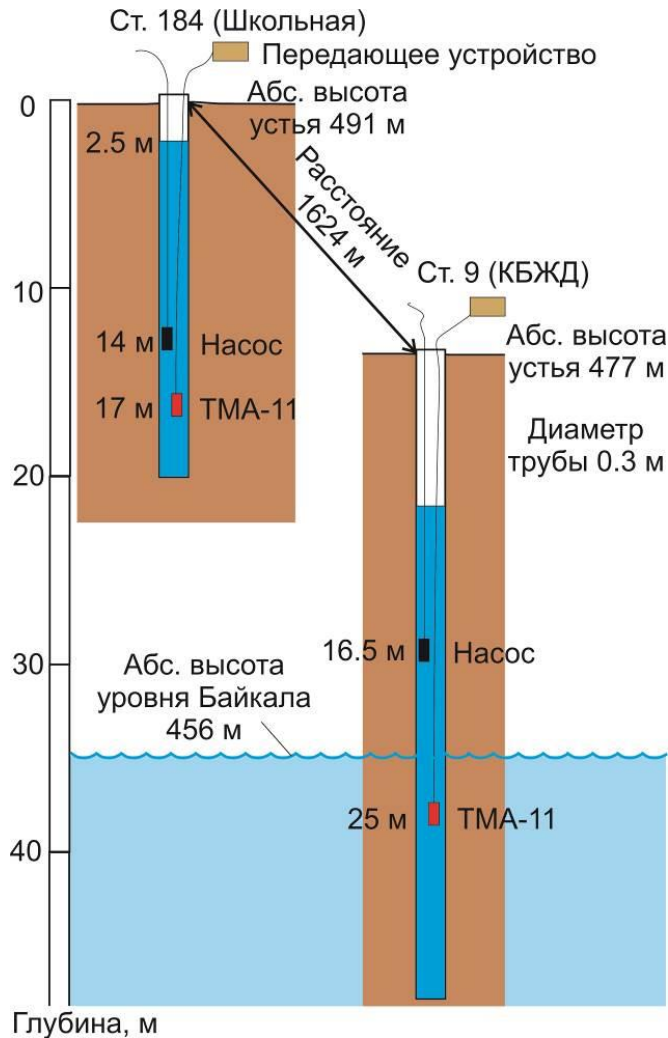
**Рис. 1.** Схема расположения станций мониторинга относительно активных разломов на западном побережье оз. Байкал (Култукский полигон). Палеосейсмодислокации шовной зоны Главного Саянского разлома (ГСР) показаны по работе (Чипизубов, Смекалин, 1999).

**Fig. 1.** Scheme of the locations of monitoring stations relative to active faults on the western coast of Lake Baikal (Kultuk area). Paleoseismic dislocations of the suture zone in the Main Sayan Fault (ГСР) are shown after (Chipizubov, Smekalin, 1999).

Устье скважины ст. 9 находится на абсолютной отметке 477 м, уровень воды – на глубине 9 м, насос – на глубине 16.5 м, зонд ТМА-11 – на глубине 25 м. Глубина скважины – 35 м. Расстояние от скважины до оз. Байкал составляет 242 м. Уровень воды в скважине находится выше уровня Байкала, абс. высота которого составляет около 456 м. Забой скважины уходит ниже уровня Байкала.

Устье скважины ст. 184 занимает более высокую абсолютную отметку (491 м), уро-

вень воды имеет глубину 2.5 м, насос помещается на глубине 14 м, зонд ТМА-11 – на глубине 17 м. Глубина скважины – 20 м. Высокий уровень воды в скважине получен в результате ее заложения на месте бывшего родника. Уровень воды в скважине существенно поднят над уровнем Байкала. Расстояние от этой скважины до оз. Байкал составляет 960 м. Забой скважины не достигает уровня Байкала.



**Рис. 2.** Схема установки зондов ТМА-11 в скважинах ст. 9 и 184 Култукского полигона.

**Fig. 2.** Scheme of installation of TMA-11 probes in wells of stations 9 and 184 in the Kultuk area.

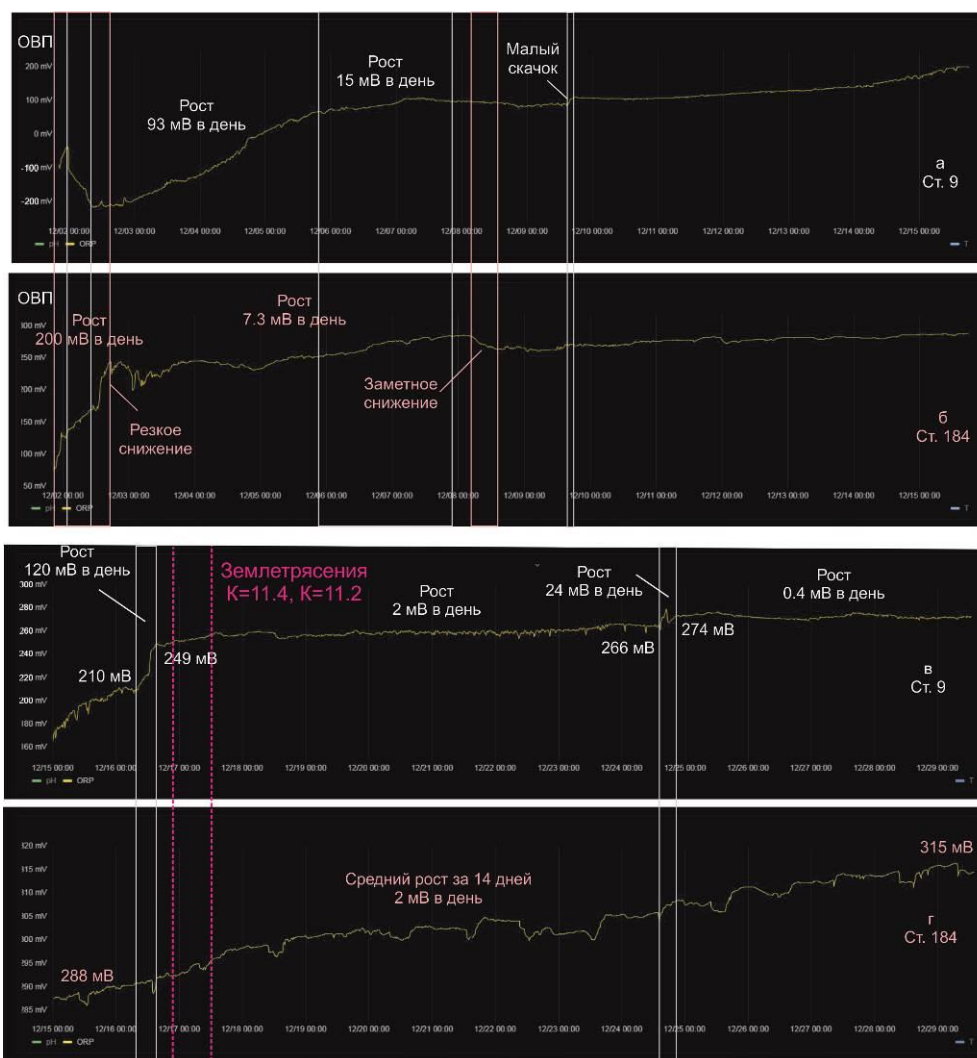
### Результаты

Измерения трех параметров в скважинах проводятся каждые 2 минут. Результаты регистрируются по местному времени. Для сопоставлений привлекаются данные (Карта..., 2023) о землетрясениях на Байкале (16.12.2023 в 23:06,  $K=11.4$ ) и в Прихубсугулье (17.12.2023 в 13:48,  $K=11.2$ ). Время

землетрясений приводится по местному времени.

### ОВП

В начале декабря обе станции характеризуются низкими значениями ОВП. С течением времени значения ОВП возрастают. Кривые возрастания ОВП на станциях 9 и 184 имеют разную конфигурацию (рис. 3).



**Рис. 3.** Временные вариации ОВП в подземных водах ст. 9 (а) и 184 (б) с 1 по 15 декабря. Приводятся данные с шагом через 10 минут. Светло-серыми вертикальными линиями обозначаются временные интервалы, в которых оцениваются скорости изменения ОВП на ст. 9, розовыми линиями – на ст. 184 (объяснения в тексте). После аномального подъема ОВП происходят землетрясения на Байкале (16.12.2023 в 23:06,  $K=11.4$ ) и в Прихубсугулье (17.12.2023 в 13:48,  $K=11.2$ ).

**Fig. 3.** Temporal variations of ORP in groundwater of stations 9 (a) and 184 (b) from December 1 to December 15. The data are given in 10-minute increments. Light-gray vertical lines indicate time intervals, in which ORP change rates at station 9 are estimated, pink lines – at station 184 (explanations in the text). After the anomalous ORP rise, the earthquakes occur in the Baikal (16.12.2023 at 23:06,  $K=11.4$ ) and Khubsugul (17.12.2023 at 13:48,  $K=11.2$ ).

01 декабря 2023 г. на ст. 9 наблюдается относительное возрастание ОВП с выходом на максимум ( $-37.3$  мВ) в 23:20. 02 декабря к 8:20 ОВП снижается до  $-210$  мВ и остается на отрицательных значениях  $-207$ – $212$  мВ до 19:30. С этого времени значения ОВП плавно возрастают. В течение трех дней приращение составляет в среднем около 93 мВ в день. 05 декабря в 19:30 ОВП достигает положительного значения 69 мВ. Через двое суток (07 декабря) в 19:30 устанавливается

значение ОВП 100 мВ. В течение двух суток значения возрастают с приращением по 15 мВ в день. На таком же и более низком уровне (с относительным снижением до 84 мВ) значения ОВП поддерживаются до 09 декабря. В этот день в 14:30–17:30 происходит скачок значений от 88 мВ до 111 мВ. В дальнейшем ОВП возрастает медленно до 16 декабря, когда с 12:00 до 13:40 значения ОВП поднимаются от 210 до 249 мВ (рост 120 мВ в день). После скачка рост суще-

ственно замедляется и в течение 8 дней составляет около 2 мВ в день. 16 декабря ОВП от значения 266 мВ выходит на пик, снижается и опять поднимается до 274 мВ. Дальнейший рост ОВП до 29 декабря ничтожно мал (0.4 мВ в день).

На ст. 184 также наблюдается общий рост ОВП с течением времени, но, в отличие от ст. 9, линия роста осложняется локальными минимумами. В начале наблюдения 01 декабря 2023 г. в 20:40 определяется наиболее низкое значение ОВП (79 мВ). 02 декабря в 17:20 наблюдается максимум ОВП = 245 мВ. Рост ОВП 01–02 декабря составляет 200 мВ в день. В дальнейшем рост замедляется и во временном интервале 02–09 декабря составляет в среднем 7.3 мВ в день. 08 декабря наблюдается заметное снижение ОВП от 284 до 269 мВ. Дальнейший рост ОВП с 09 до 16 декабря происходит медленнее (2.7 мВ в день). С 16 до 29 декабря средний рост составляет около 2 мВ в день.

Из сравнения данных ОВП, полученных за декабрь для подземных вод ст. 9 и 184, следует:

1) станции находятся в разных диапазонах: ст. 9 – от – 200 до 274 мВ (интервал 474 мВ), ст. 184 – от 78 до 315 мВ (интервал 237 мВ);

2) в начале наблюдений (01–02 декабря) определяются резко разнонаправленные вариации ОВП этих станций, в дальнейшем на ст. 9 происходит неуклонный рост ОВП с проявлением скачков, на ст. 184 ОВП также растет, но с эпизодическими понижениями значений;

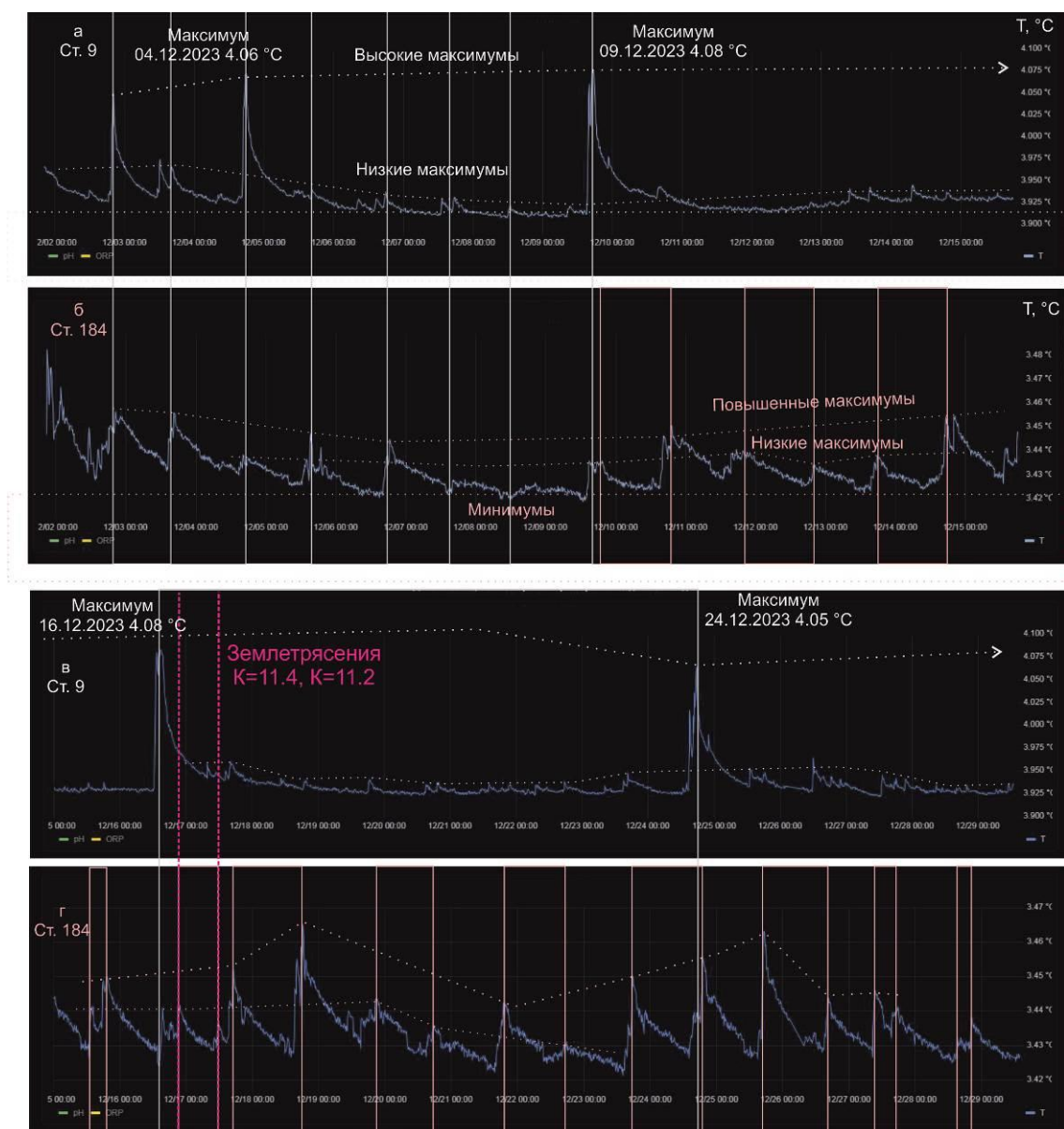
3) с течением времени рост ОВП обеих станций замедляется: на ст. 9 быстрый рост 93 и 15 мВ в день (до 09 декабря) сменяется

медленным ростом 2 и 0.4 мВ в день (после 16 декабря), на ст. 184 начальное продвижение вверх на 200 мВ в день (01–02 декабря) сменяется медленным ростом 7.3 и 2 мВ в день;

4) относительные вариации ОВП станций в общем не согласуются между собой.

### *Температура*

На ст. 9 температура подземных вод в скважине на минимуме составляет около 3.91 °С и импульсно возрастает. Различаются две серии максимумов: высоких, с амплитудой 0.12–0.17 °С и низких, с амплитудой 0.02–0.04 °С. Низкие максимумы образуют фон для высоких максимумов. Каждый высокий максимум обозначается резким подъемом температуры в течение 40–60 минут. Максимальные значения выражаются единичным пиком или выдерживаются в течение какого-то промежутка времени (до 2 часов). Нисходящая ветвь максимума асимптотически приближается к уровню минимальных значений, которые несколько поднимаются 02–06 декабря, находятся на минимуме 07–09 и 11–12 декабря, а затем вновь поднимаются. Снижение минимальной температуры предшествует высокому максимуму 09 декабря и следует за ним. До этого максимума на ст. 9 выдерживается суточная квазипериодичность вариаций температуры, в которую объединяются высокие и низкие максимумы. После 09 декабря температурное поле перестраивается. Суточная квазипериодичность нивелируется. Обозначаются высокие максимумы 16, 24 и 29 декабря (последний находится за рамкой панели рис. 4в).



**Рис. 4.** Временные вариации температуры в подземных водах ст. 9 (а) и 184 (б) с 1 по 15 декабря. Приводятся данные с шагом через 10 минут. После высокого максимума температуры происходят землетрясения на Байкале (16.12.2023 в 23:06,  $K=11.4$ ) и в Прихубсугулье (17.12.2023 в 13:48,  $K=11.2$ ). Условные обозначения см. рис. 3.

**Fig. 4.** Temporal variations of temperature in groundwater of vv. 9 (a) and 184 (b) from December 1 to December 15. The data are given in increments of 10 minutes. After the high maximum of temperature, earth-quakes occur at the Baikal (16.12.2023 at 23:06,  $K=11.4$ ) and Khubsugul (17.12.2023 at 13:48,  $K=11.2$ ). Symbols are as in Fig. 3.

На ст. 184 температура воды в целом ниже, чем на ст. 9 и составляет на минимуме около 3.42 °С. Для температуры ст. 9 характерна суточная квазипериодичность, которая выдерживается по всему ряду декабрьских наблюдений. За исключением начальных повышенных значений температуры 02 декабря, амплитуды температурных максимумов ст. 184 не превышают 0.03 °С.

Сравнивая данные мониторинговых станций, приходим к выводу о том, что:

- 1) на ст. 184 минимальная температура воды (3.42 °С) ниже, чем на ст. 9 (3.91 °С);
- 2) в течение месяца не наблюдается общих заметных изменений температуры;
- 3) на обеих мониторинговых станциях температура повышается импульсно, различаются серии низких и высоких (повышенных) максимумов;
- 4) максимумы ст. 9 имеют нисходящую ветвь, асимптотически приближающуюся к



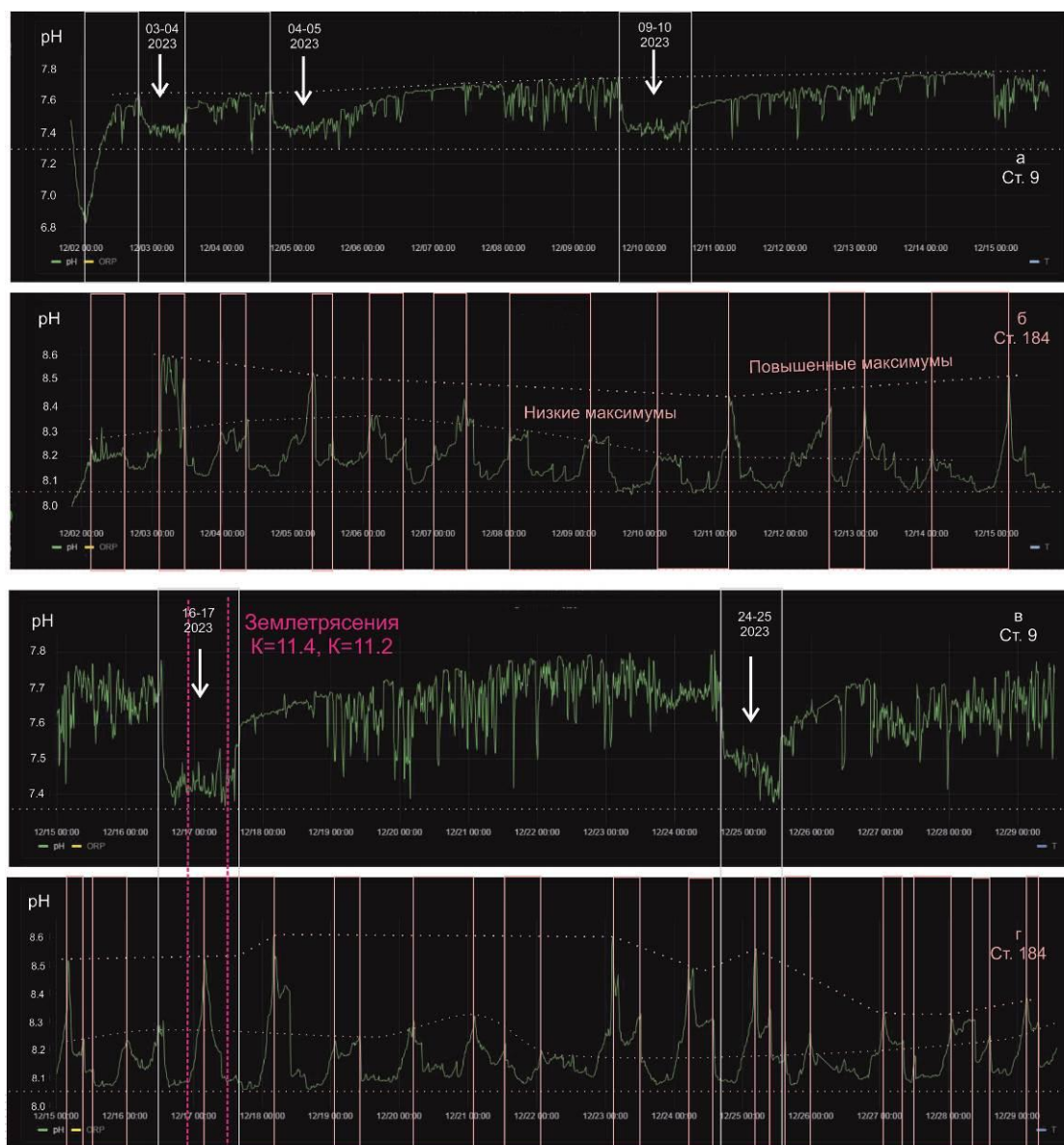
минимальным значениям температуры, максимумы ст. 184 имеют зубчатую форму;

5) с 02 до 07 декабря наблюдается взаимное соответствие температурных максимумов станций 9 и 184. Амплитуды температурных максимумов ст. 184 в это время уменьшаются. 08 и 09 декабря на ст. 184 образуются небольшие минимумы, соответствующие низким максимумам ст. 9.

### pH

На ст. 9 значение pH подземных вод в скважине 02 декабря 2023 г. в 01:50 нахо-

дится на абсолютном минимуме 6.84. В дальнейшем устанавливается минимальный уровень pH 7.26 (04 декабря в 10:20) и с 10 по 16 декабря поднимается до 7.36. Максимальные значения также последовательно увеличиваются от 7.64 02 декабря (в 19:30) до 7.78 14 декабря (в 20:10). Пульсации pH разделяются на временные отрезки продолжительностью от одних суток до семи.



**Рис. 5.** Временные вариации pH в подземных водах ст. 9 (а) и 184 (б) с 1 по 15 декабря. Приводятся данные с шагом через 10 минут. Аномальное снижение pH соответствует по времени землетрясениям на Байкале (16.12.2023 в 23:06,  $K=11.4$ ) и в Прихубсугулье (17.12.2023 в 13:48,  $K=11.2$ ). Условные обозначения см. рис. 3.

**Fig. 5.** Temporal variations of pH in groundwater of stations 9 (a) and 184 (b) from December 1 to December 15. The data are given in 10-min increments. Anomalous pH decrease corresponds to the earthquakes at the Baikal (16.12.2023 at 23:06,  $K=11.4$ ) and Khubsugul (17.12.2023 at 13:48,  $K=11.2$ ). Symbols are as in Fig. 3.

На ст. 184 минимальное значение  $pH=8.0$  определяется в начале наблюдений 01 декабря 2023 г. в 20:40. В последующие дни минимальные значения поднимаются до 8.12, но к 9 декабря в 19:20 выходят на минимум 8.05, который выдерживается до 19 декабря, а затем минимальные значения несколько возрастают. Вариации  $pH$  подчиняются суточной квазипериодичности преимущественно на низких максимумах. Наряду с низкими, проявляются повышенные максимумы.

Сравнивая данные измерений  $pH$  двух станций, приходим к выводу о том, что:

1) преобладающие минимальные значения этого параметра в подземных водах ст. 9 (7.3) ниже, чем в подземных водах ст. 184 (8.05);

2) характер временных изменений  $pH$  станций 9 и 184 резко различается. На ст. 184 имеется отчетливая суточная квазипериодичность вариаций этого параметра. На ст. 9 временные вариации  $pH$  не имеют суточной квазипериодичности и показывают более продолжительные пологие максимумы, разделенные резко очерченными минимумами.

## Обсуждение результатов

### Причины различий в показаниях зондов

Зонды находятся в разных тектонических структурах. В подземных водах ст. 9 определяются эффекты активного Обручевского разлома, в подземных водах ст. 184 – эффекты торцовой Култукской тектонической ступени Южно-Байкальской впадины (см. рис. 1). Обручевский разлом играет роль краевой структуры Южно-Байкальской впадины, испытывающей общее растяжение. Торцевая Култукская ступень, с одной стороны, имеет магистральное положение в рифтовой структуре, с другой стороны, она ограничивается с юга Главным Саянским разломом, находящимся в условиях сжатия. В показаниях зондов отражаются меняющиеся во времени соотношения сжатия и растяжения верхней части коры. На ст. 9 может потен-

циально преобладать растяжение, на ст. 184 – сжатие.

Скважина ст. 9 располагается на более низкой отметке рельефа, чем ст. 184. Близость ст. 9 к Байкалу и глубокий забой скважины предполагает возможное влияние на ее подземные воды глубинной воды Байкала. Такое влияние может проявиться в ходе наблюдений. Ст. 184 располагается в удалении от Байкала и не должна испытывать его влияния.

Различные показания зондов могут отражать положение скважины ст. 184 на месте природного родника и положение скважины ст. 9 в точке, непосредственно не обозначенной родниковыми водами. Однако выходы родниковых вод распространены в зоне Обручевского разлома вдоль русла р. Медлянки (Расказов и др., 2015). Ближайшие родники находятся на расстоянии 420–450 м к востоку от ст. 9, на абсолютных отметках 470–479 м. Низкий гидростатический уровень скважины ст. 9 (глубина 9 м от устья) приблизительно соответствует гипсометрическому уровню этих родников. Скважина ст. 184 отличается от соседних скважин высоким гидростатическим уровнем (глубина 2.5 м от устья). Здесь подземные воды поступают по проницаемому разлому.

Наконец, нужно отметить еще один фактор, влияющий на различные показания зондов – фактор режима прокачки скважин. Прокачка необходима для гидрогеохимического опробования порций подземных вод, поднимающихся из глубинной части активного разлома. В родниках обычно наблюдается существенное разбавление подземных вод малоглубинными порциями, которые загущивают гидрогеодинамические показатели. В связи с этим для целей гидрогеохимического мониторинга скважины используются предпочтительнее родников. Ст. 184 регулярно прокачивается местными жителями пос. Култук в дневное время и не используется ими в ночное время. В таком же режиме прокачивается ст. 9, но в конце недели в ней осуществляется непрерывная прокачка продолжительностью около 2 часов. Именно

такая прокачка вызывает заметное возрастание температуры и сопутствующие эффекты ОВП и рН. Вероятно, подземные воды поднимаются из более глубокой части Обручевского разлома. Нужно учитывать, однако, зимний подогрев устья скважины, который проводится для предотвращения замерзания воды. Эффективная 2-часовая прокачка может приводить к частичному перемешиванию воды в скважине с проникновением нагретой порции ниже насоса к зонду в момент выключения насоса. В течение 2-х часов насос выключается несколько раз при наполнении емкости 2 м<sup>3</sup>. Влияние фактора проникновения нагретых вод сверху вниз будет нивелировано в весенне-летнее время, когда устье скважины не будет прогреваться.

#### *Различия ОВП в показаниях зондов*

Окислительно-восстановительный потенциал зависит от потоков флюидов – восстановителей или окислителей, возникающих в земной коре при подготовке и реализации землетрясений. Это предположение нуждается в проверке конкретными измерениями содержаний газов на мониторинговых станциях и принимается в настоящем исследовании в качестве рабочей гипотезы.

Пониженные значения ОВП на обеих станциях в начале декабря свидетельствуют о преобладании в потоке флюидов восстановленных компонентов (H<sup>+</sup>, Hg<sup>+</sup>, H<sub>2</sub>S и др.). На станциях 9 и 184 эти компоненты поступают в противофазе. Минимуму ОВП ст. 9 соответствует максимум ОВП ст. 184 и наоборот, максимуму ОВП ст. 9 соответствует минимум ОВП ст. 184. Обручевский разлом обеспечивает проникновение восстановленных флюидов. Резко-отрицательные значения ОВП (до –210 мВ), установленные на ст. 9, характеризуют проявление особенно сильного эффекта потока восстановленных газов на этой чувствительной станции мониторинга. Возрастание ОВП на обеих станциях с течением времени отражает общее снижение роли восстановленных флюидов.

#### *Различия температур в показаниях зондов*

Ежедневный импульсный подъем температуры связан с прокачкой подземных вод

из скважин. Температура в воде ст. 9 резко нарастает вследствие более эффективной прокачки и снижается по асимптоте в результате «рассасывания» образовавшейся тепловой аномалии. Суточные вариации выражены на ст. 9 в меньшей мере, чем на ст. 184. Принимая во внимание образование температурных максимумов вследствие сейсмогенных движений со сжатием и температурных минимумов вследствие сейсмогенных движений с растяжением (Rasskazov et al., 2020), можно допустить также влияние на температуру подземных вод ст. 9 (в Обручевском разломе) ежедневных импульсных деформаций, которые в результате перестройки 9 декабря оказались нивелированными.

Под ст. 184 (в торцовой Култукской тектонической ступени) ежедневный режим прокачки проявляется отчетливее. Предположение о проявлении температурных максимумов в условиях сжатия и о смене режима сжатия режимом растяжения нуждается в дополнительном обосновании гидрогеохимическими данными.

#### *Различия рН в показаниях зондов*

Водородный потенциал зависит от соотношений растворенных компонентов в подземных водах (Крайнов и др., 2012). Причины наблюдаемых вариаций этого параметра в подземных водах станций 9 и 184 пока не ясны. Очевидные различия вариаций рН на этих станциях (см. рис. 5а,б) свидетельствуют об отсутствии контроля компонентов, влияющих на рН, суточными процессами на первой из них и о существенной зависимости таких компонентов от меняющегося состояния подземных вод в течение суток – на второй.

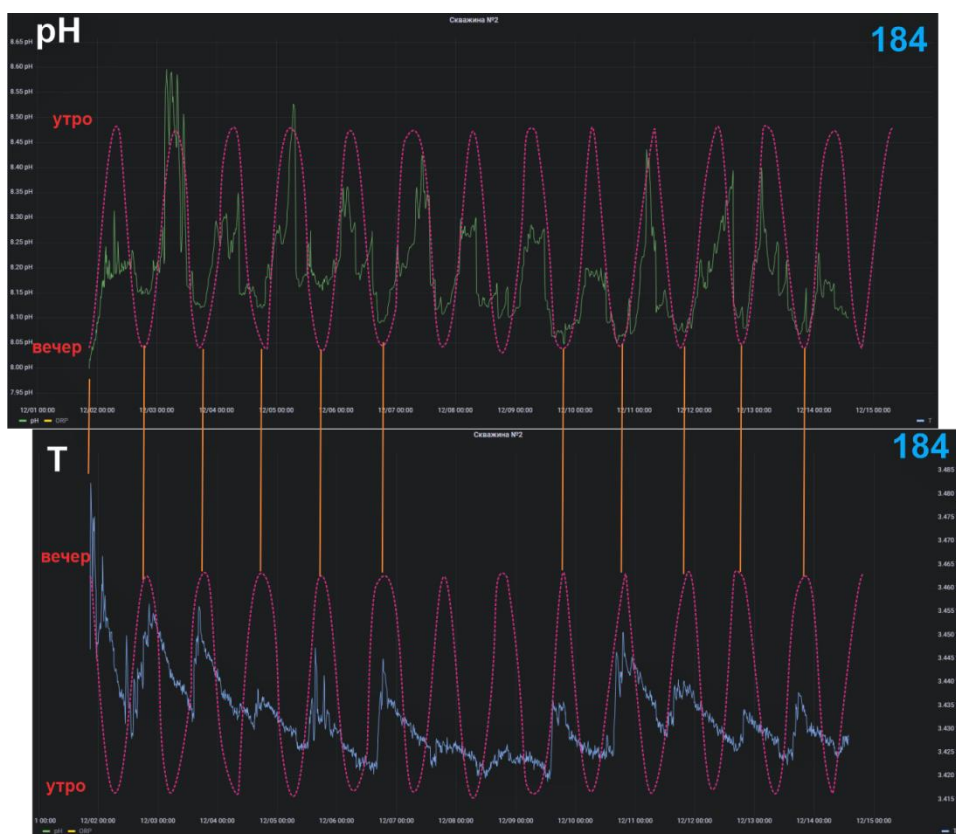
На ст. 9 наблюдаются вариации рН, которые можно связать с гидрогеохимическими изменениями в подземных водах, а на ст. 184 прослеживаются серии высоких максимумов, которые представляют собой аномалии на фоне низких максимумов. Таким образом, при сравнительном анализе результатов непрерывных измерений рН появляется возможность использования их различий в подземных водах станций 9 и 184 для выявления направленности развития процессов в

комплексировании с данными об ОВП, температуре и гидрогеохимическими показателями.

*Соотношения максимумов и минимумов рН и температуры ст. 184*

Для вариаций рН и температуры этой станции характерна суточная квазипериодичность. Обычно в утренние часы рН воз-

растает, а в вечерние снижается. Температура, наоборот, в вечерние часы возрастает, а в утренние – снижается. Таким образом, рН и температура постоянно находятся в противофазных соотношениях (рис. 6). Отклонение от этой закономерности может составить предмет особого рассмотрения при анализе аномальных показаний.



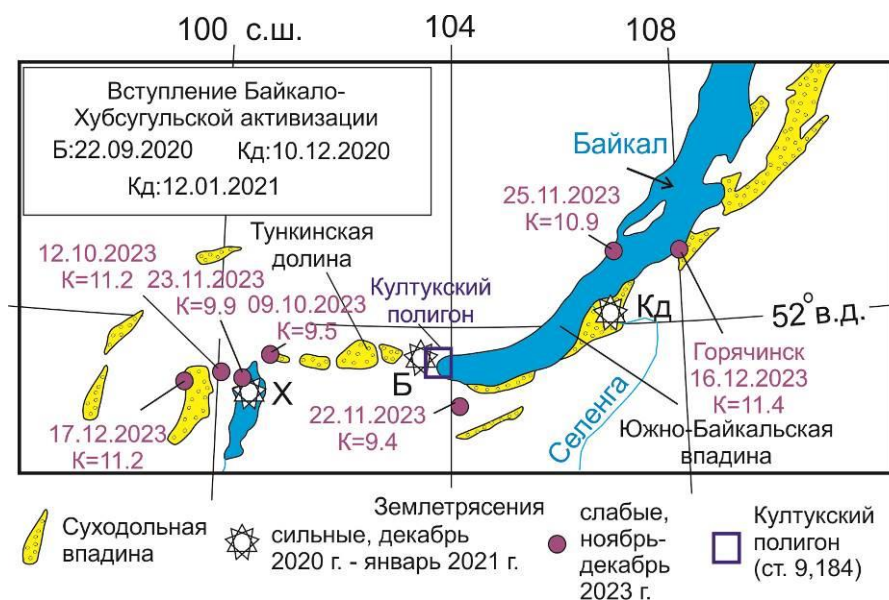
**Рис. 6.** Противофазные соотношения рН и температуры ст. 184. Приводятся данные с шагом через 10 минут.

**Fig. 6.** Anty-phase pH and temperature relationship of station 184. Data are given in 10-minute increments.

*Сейсмические импульсы в БРС 22–25 ноября и 16 декабря 2023 г., сопоставление с вариациями ОВП, рН и температуры подземных вод*

Процессы подземных вод имеют парагенетические соотношения с процессами подготовки и реализации землетрясений. Параметры подземных вод характеризуют процессы, происходящие в резервуаре верхней части коры, сейсмический процесс подготавливается и реализуется в ее средней части.

Месячным наблюдениям ОВП, рН и температуры подземных вод предшествует сейсмический импульс в центральной части БРС 22–25 ноября 2023 г. (рис. 7). 22 ноября в 01:20 слабое землетрясение ( $K=9.4$ ) происходит в районе Култукского полигона, на хр. Хамар-Дабан. 24 ноября в 00:18 следует слабый сейсмический толчок в эпицентральной поле сильного Хубсугульского землетрясения ( $K=9.9$ ), а затем, 25 ноября в 21:44 – еще один толчок посильнее в Южно-Байкальской впадине ( $K=10.9$ ).

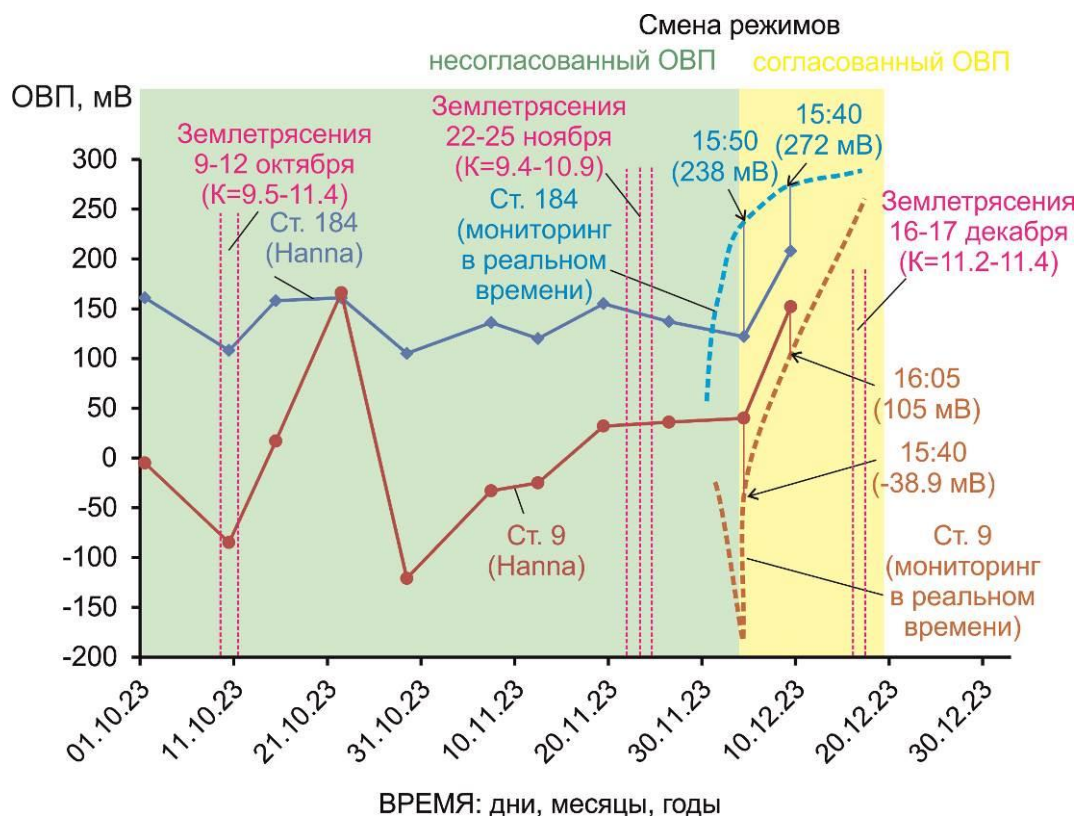


**Рис. 7.** Схема распределения сильных землетрясений вступления Байкало-Хубсугульской активизации в 2020–2021 гг. и слабых землетрясений в ноябре-декабре 2023 г. Землетрясения 2020–2021 гг.: Б – Быстринское, Кд – Кударинское, Х – Хубсугульское. Использован каталог (Карта..., 2023).

**Fig. 7.** Scheme of distribution of strong earthquakes in the entrance of the Baikal-Khubsugul seismic reactivation in 2020–2021 and weak earthquakes in November-December 2023. Earthquakes in 2020–2021: Б – Vystraya, Кд – Kudara, Х – Khubsugul. The catalog (Map..., 2023) is used.

На рис. 8, по результатам измерений портативным прибором Hanna, получаются соизмеримые максимумы ОВП на обеих станциях 22 октября 2023 г. Перед ними (10 октября) ст. 9 показывает низкое (отрицательное) значение ОВП со слабым снижением ОВП ст. 184. В это время (9–12 октября) происходят землетрясения ( $K=9.5–11.4$ ). После них (29 октября) ст. 9 также показывает низкое (отрицательное) значение ОВП со слабым снижением ОВП ст. 184. Землетрясения отсутствуют, но проявляются в ходе последующего возрастания ОВП 22–25 ноября 2023 г. ( $K=9.4–10.9$ ). Эти землетрясения происходят за 8–9 дней до начала мониторинга ОВП в реальном времени. В пробе, отобранной сразу после землетрясений (26 ноября) портативным прибором Hanna на ст. 9 определяется значение ОВП=36 мВ, близкое к значениям этого параметра 19 ноября (до землетрясений) и 4

декабря (во время мониторинга в реальном времени). Между 26 ноября и 04 декабря (8 дней) пробы не отбираются и измерений ОВП не проводится. Между тем, при ежедневном отборе проб в подобной обстановке после землетрясений 2020–2021 гг. на ст. 9 регистрировались резкие вариации ОВП (Рассказов и др., 2023). Такие же резкие вариации, по-видимому, имеют место между 26 ноября и 4 декабря, о чем свидетельствуют резко отрицательные значения ОВП ст. 9 в начале мониторинга в режиме реального времени. Сравнительно низкие значения ОВП, не согласованные с вариациями ОВП ст. 9, определяются в это же время на ст. 184. Резко несогласованные вариации ОВП на ст. 9 и 184 сменяются согласованным медленным ростом этого показателя. Одновременное резкое снижение ОВП станций покажет сейсмоопасное состояние БРС с проявлением сильного землетрясения.



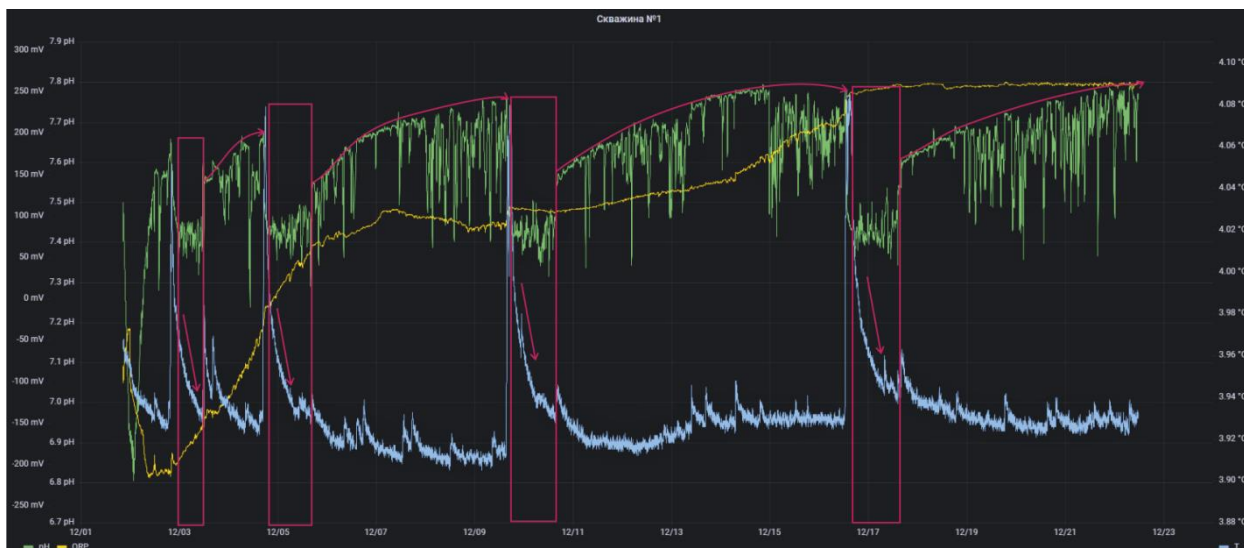
**Рис. 8.** Сопоставление результатов измерений ОВП портативным прибором Hanna и зондом ТМА-11 с землетрясениями в центральной части БРС. Значения портативного прибора Hanna 4 и 9 декабря занижаются относительно значений ОВП зонда на ст. 184 и завышаются относительно значений ОВП зонда на ст. 9.

**Fig. 8.** Comparison of the results of ORP measurements by the portable Hanna instrument and TMA-11 probes with earthquakes in the central part of the Baikal Rift System. The values of the portable Hanna instrument on December 4 and 9 are underestimated relative to the ORP values of the probe at station 184 and overestimated relative to the ORP values of the probe at station 9.

*Аномальные (асейсмические и косейсмические) вариации параметров подземных вод 9 и 16 декабря 2023 г.*

плитудных значений рН при снижении температуры, после которых идет постепенное повышение рН (рис. 9).

В скв ст. 9 после падения рН в каждом из периодов выявляются интервалы малоам-



**Рис. 9.** Согласованные аномальные временные вариации ОВП, рН и температуры в подземных водах ст. 9. Приводятся данные с шагом через 2 минуты.

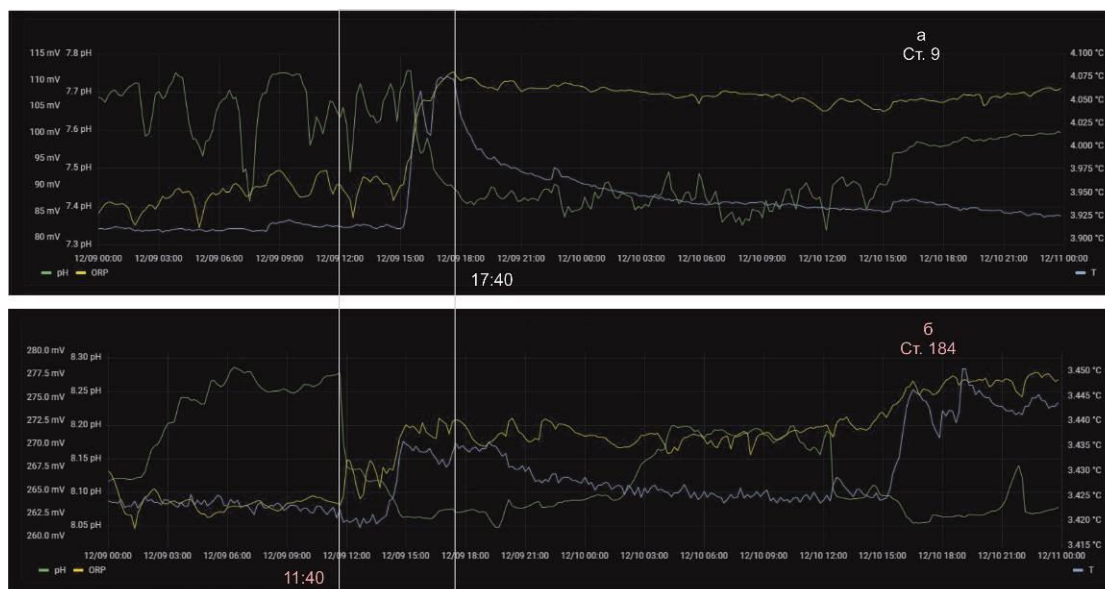
**Fig. 9.** Consistent anomalous temporal variations of ORP, pH, and temperature in groundwater of station 9. The data are given in 2-minute increments.

09 и 16 декабря 2023 г. наблюдаются частично сходные между собой аномальные вариации параметров подземных вод. 09 декабря БРС остается асейсмичной, тогда как 16 декабря происходит Горячинское землетрясение  $K=11.4$ . Режим прокачки скважин обеспечивает аномалии электрохимических параметров, но какие показания станций 09 и 16 декабря имеют при этом сходство и какие показания различаются? Ответ на этот вопрос может способствовать выяснению критериев определения косейсмичного и асейсмичного режимов в центральной части БРС.

9 декабря 2023 г. на мониторинговых станциях аномально меняются параметры во временном интервале с 11:40 до 17:40 (продолжительность 6 часов).

Первое аномальное вступление наблюдается на ст. 184 (рис. 10). Значение ОВП=263 мВ в 11:40 резко растет до 268 мВ к 12:00 и колеблется на этом верхнем пределе до

14:20 с новым резким возрастанием и выходом на плато 272 мВ в 15:00. Одновременно с началом резкого возрастания ОВП ст. 184 наблюдается резкое снижение рН этой станции от 8.28 в 11:40 до 8.14 в 12:00. Более медленное снижение рН приводит к минимальному значению 8.06 в 14:50. Температура 9 декабря снижается незначительно и находится на минимуме 3.42 °С до 13:30 с запаздыванием относительно изменений ОВП и рН. С 13:30 до 14:50 температура резко возрастает на 0.02 °С и выходит на плато, поддерживается на нем до 19:20 и затем плавно снижается по асимптоте к минимальной температуре 3.42 °С. Принимая резкое возрастание температуры как показатель аномалии вод ст. 184, изменения ОВП и рН этой станции характеризуют предшествующие процессы резервуара подземных вод, спровоцировавшие изменения этих параметров в водах этой станции.



**Рис. 10.** Аномальные временные вариации ОВП, рН и температуры в подземных водах ст. 9 (а) и 184 (б) 9 декабря с 11:40 до 17:40. Приводятся данные с шагом через 10 минут.

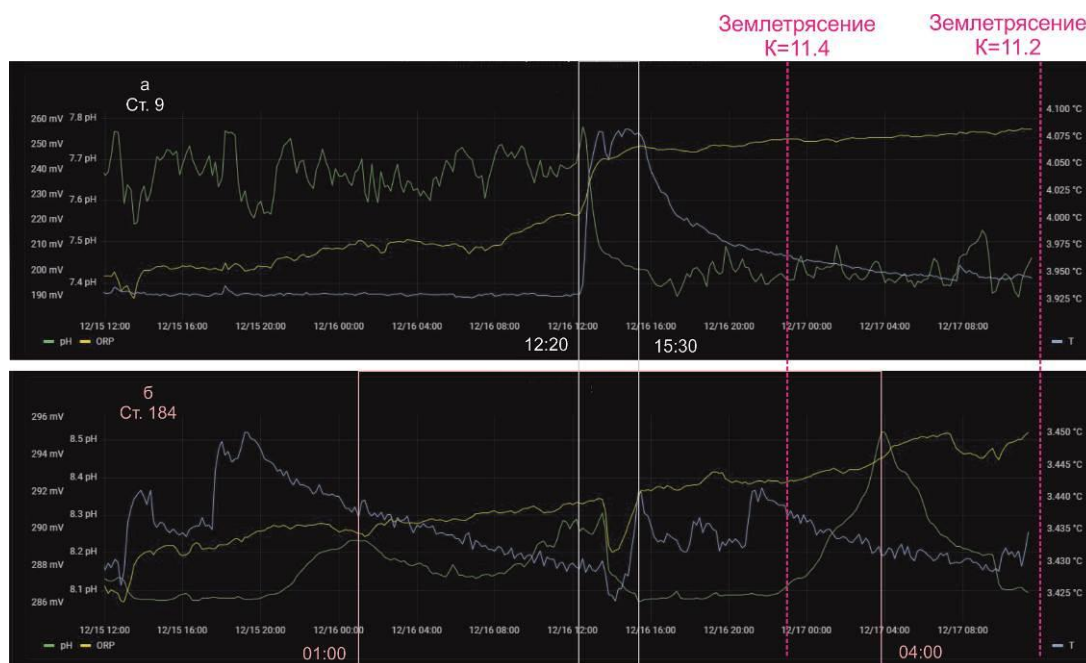
**Fig. 10.** Anomalous temporal variations of ORP, pH, and temperature in groundwater of stations 9 (a) and 184 (b) on December 9 from 11:40 to 17:40. The data are given in 10-minute increments.

Аномальные изменения параметров 09 декабря на ст. 9 запаздывают относительно начавшихся изменений ОВП и рН ст. 184 и сопутствуют подъему температуры на этой станции. Температура ст. 9 остается на минимуме 3.91 °С до 15:10 и резко возрастает до 4.07 °С к 17:40, после чего снижается с выходом на асимптоту минимальных значений. Учитывая ступенчатое возрастание температуры ст. 184 до 14:50, можно заметить, что ст. 9 получает тепловую порцию во временном интервале с 15:10 до 17:40. Иными словами, сначала в аномальные изменения вовлекается Култукская торцевая тектоническая ступень, а затем Обручевский разлом.

Несколько раньше начавшихся (в 15:10) изменений в Обручевском разломе 09 декабря начинается изменение ОВП. В 14:40 ОВП ст. 9 еще находится на минимуме 87.1 мВ, резко возрастает до 106 мВ к 16:10 и еще повышается до 112 мВ к 17:40. Несколько позже начавшихся (в 15:10) изменений в Обручевском разломе начинается изменение рН ст. 9. В 15:30 еще определяется максимум рН=7.76, но затем наблюдается резкое снижение значений до 7.54 к 16:00 и еще более сильное (до 7.41) к 18.10.

16 декабря 2023 г. аномально меняются все три параметра обеих мониторинговых станций в более узком временном интервале, чем 9 декабря – с 12:20 до 15:30 (продолжительность 3 часа 10 минут) (рис. 11).





**Рис. 11.** Аномальные временные вариации ОВП, рН и температуры в подземных водах ст. 9 (а) и 184 (б) 16 декабря с 12:20 до 15:30. Приводятся данные с шагом через 10 минут. Условные обозначения см. рис. 3.

**Fig. 11.** Anomalous temporal variations of ORP, pH, and temperature in groundwater of stations 9 (a) and 184 (b) on December 16 from 12:20 to 15:30. Data are given in 10-minute increments. Symbols are as in Fig. 3.

На ст. 9 значение ОВП=223 мВ в 12:20 растет до 245 мВ к 13:30 и в дальнейшем повышается по более пологой линии, в общем соответствующей генеральному декабрьскому тренду. На ст. 184 значение ОВП=292 мВ падает до 289 мВ к 14:00 и вновь возвращается к значению ОВП=292 мВ в 15:30 с дальнейшим повышением по пологому направлению, соответствующему генеральному декабрьскому тренду. Кратковременная аномалия ОВП вызвана импульсным поступлением восстановленных флюидов под ст. 184 при скачкообразном усилении доминирующего в декабре процесса снижения роли восстановленных флюидов под ст. 9.

Возрастание ОВП сопровождается повышением температуры на ст. 9 от минимального значения (3.93 °C) в 12:20 до максимального (4.08 °C) в 13:20. Температура поддерживается на максимуме больше 2 часов (до 15:30) и затем резко снижается с выходом на асимптоту минимальных значений. На ст. 184 температура снижается линейно с 3.45 °C в 19:30 15 декабря до 3.43 °C в 13:30 16 декабря и более резко падает еще на 0.01 °C в 14:10, затем резко возрастает до 3.44 °C в 15:20–15:30. Высокий температурный мак-

симум ст. 9 16 декабря подобен высокому температурному максимуму этой же станции 9 декабря. Температурный минимум ст. 184 16 декабря вызывается эффектом растяжения под ней синхронно с эффектом сжатия, отражающимся в температурном максимуме ст. 9. Кора растягивается под ст. 184 и сжимается под ст. 9 в одно и то же время.

На ст. 9 рН изменяется 16 декабря так же как 9 декабря. Максимум рН=7.78 в 12:30 сменяется его резким понижением до значения 7.48 в 13:30 с последующим переходом к значениям на одном уровне в интервале 7.38–7.51. На ст. 184 максимум рН=8.31 в 13:30 16 декабря сменяется резким понижением значения до 8.14 в 14:00, переходом к рН=8.09 в 22:30 и дальнейшим подъемом с выходом на максимум 8.52 в 04:00 17 декабря. Суточная квазипериодичность рН существенно нарушается.

16 декабря в 23:06 происходит землетрясение в районе Среднего Байкала (K=11.4, координаты: 52.71° с.ш., 108.05° в.д.). Еще одно землетрясение следует 17 декабря в 13:48 в западной части Дархатской впадины (K=11.2, координаты: 51.15° с.ш., 98.33° в.д.). Аномальные вариации ОВП, рН и тем-

пературы в подземных водах Култукского полигона предшествуют этим землетрясениям.

Между аномальными вариациями параметров 9 и 16 декабря наблюдаются явные различия:

1) временной диапазон аномальных изменений параметров 9 декабря имеет в 2 раза большую продолжительность (6 ч.), чем интервал аномальных изменений параметров 16 декабря (3 ч. 10 мин.);

2) аномальные изменения параметров 9 декабря начинаются неодновременно, и в целом сначала активизируется торцовая Култукская тектоническая ступень, а затем – Обручевский разлом. Аномальные изменения параметров на станциях 16 декабря протекают синхронно;

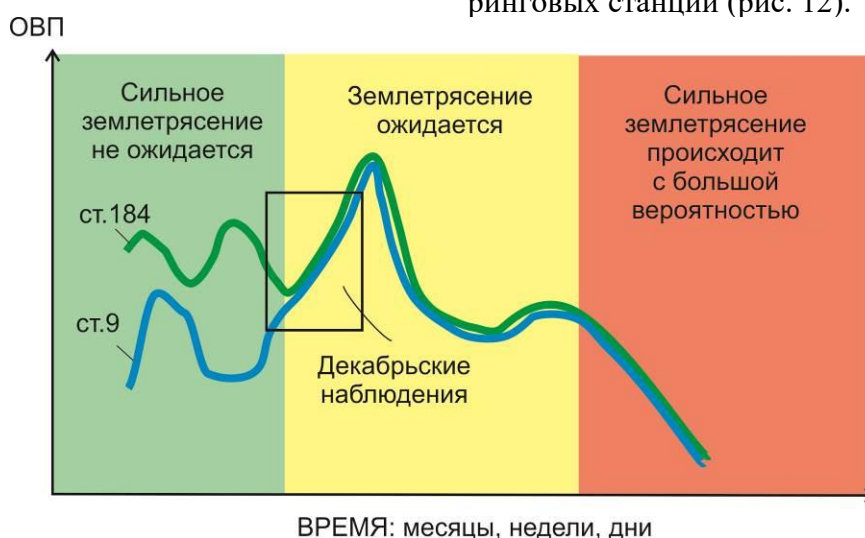
2) значения ОВП станций с 9 до 16 декабря заметно возрастают. Максимальное значение ОВП после скачкообразного поднятия на ст. 9 увеличивается от 112 мВ 9 декабря до 245 мВ 16 декабря, а на ст. 184 – от 272 мВ 9 декабря до 292 мВ 16 декабря (с эпизодом аномального падения до 289 мВ). Рост ОВП характеризует направленный процесс преобразования Култукского резервуара подземных вод.

### Особая роль ОВП в наблюдениях оценки сейсмической угрозы в центральной части БРС

Результаты наблюдений трех лет Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации выявили разный характер вариаций ОВП на торцовой Култукской ступени и в прибортовых разломах Южно-Байкальской впадины (Рассказов и др., 2023).

В декабрьских наблюдениях один зонд (ст. 184) давал данные ОВП на торцовой Култукской ступени, другой (ст. 9) – в зоне прибортового Обручевского разлома. Несогласованные колебания свидетельствуют об отсутствии угрозы сильных землетрясений в разломах центральной части Байкальской рифтовой системы (зеленый уровень сейсмической угрозы).

Переход к согласованию с возрастанием ОВП на обеих станциях показывает предсейсмогенное состояние (желтый уровень сейсмической угрозы). Именно такое состояние регистрируется в декабрьских наблюдениях. Опасность реализации сильного землетрясения появляется при общем снижении значения этого параметра на большинстве станций Култукского резервуара. Чтобы проявилась эта тенденция, должна произойти структурная перестройка центральной части БРС. Она случится после достижения высоких значений этого параметра мониторинговых станций (рис. 12).



**Рис. 12.** Принципиальная схема вариаций ОВП ст. 9 и 184 для оценки сейсмической угрозы зеленого, желтого или красного уровней в центральной части Байкальской рифтовой системы.

**Fig. 12.** Principal scheme of ORP variations of stations 9 and 184 for assessment of seismic threat of green, yellow or red levels in the central part of the Baikal rift system.

## Заключение

На Култукском полигоне БРС впервые выполнены измерения ОВП, рН и температуры подземных вод в режиме реального времени на станциях, установленных в зоне активного краевого Обручевского разлома Южно-Байкальской впадины (ст. 9) и на ее торцевой Култукской тектонической ступени (ст. 184). Во время наблюдений с 1 до 29 декабря 2023 г. ОВП ст. 9 возрастает от –210 до 274 мВ (интервал 474 мВ), ст. 184 – от 78 до 315 мВ (интервал 237 мВ). Вариации температуры с 1 до 9 декабря на обеих станциях имеют согласованную суточную квазипериодичность, после 9 декабря суточные температурные квазипериоды на ст. 184 продолжают, но на ст. 9 нивелируются. Вариации рН ст. 9 характеризуются пульсациями во временных отрезках продолжительностью от одних суток до пяти, вариации рН ст. 184 подчиняются суточной квазипериодичности.

Вариации параметров характеризуют режим прокачки скважин, но на фоне этих вариаций проступают главные тренды изменений состояния резервуара подземных вод, парагенетически связанные с подготовкой землетрясений. Полученные мониторинговые ряды характеризуют состояние Култукского резервуара подземных вод после слабого отголоска Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации в виде короткого импульса 22–25 ноября ( $K=9.4-10.9$ ) и при реализации землетрясений умеренной силы ( $K=11.2-11.4$ ) на Среднем Байкале 16 декабря и в Прихубсугулье 17 декабря 2023 г. В измеряемых параметрах подземных вод выявляются различия между аномальными косейсмическими и асейсмическими показателями.

## Благодарности

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» (Карта..., 2012).

## Литература

Карта эпицентров землетрясений. Иркутск: Байкальский Филиал Геофизической Службы, 2023. <http://www.seis-bykl.ru>

Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Издание второе, дополненное. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 671 с.

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 ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  в подземных водах из активных разломов западного побережья Байкала // Геодинамика и тектонофизика. 2015. Т. 6, № 4. С. 519–554.

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. 2023. Т. 3, № 1. С. 181–201. [doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181](https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.1.181)

Снопков С.В., Куроленко А.А. Хубсугульское землетрясение 12 января 2021 г. и афтершоки: электрохимические отклики подземных вод юго-западного побережья Байкала / С.В. Снопков, А.А. Куроленко // Геология и окружающая среда. 2023. Т. 3, № 1. С. 172–180. DOI 10.26516/2541-9641.2023.1.172

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  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  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 по зоне Главного Саянского разлома // Геология и геофизика. 1999. Т. 40, № 6. С. 936–937.

Rasskazov S., Ilyasova A., Bornyakov S., Chuvashova I., Chebykin E., 2020b. Responses of a  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  activity ratio in groundwater to earthquakes in the South Baikal Basin, Siberia. *Front. Earth Sci.*, 14(4), 711–737. [doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5](https://doi.org/10.1007/s11707-020-0821-5)

## References

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

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

Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. Geochemistry of groundwater. Second edition, expanded. M.: TsentrLitNefteGaz, 2012. 671 p.

Map of earthquake epicenters. Irkutsk: Baikal Branch of the Federal Research Center Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, 2023. <http://www.seis-bykl.ru>

Rasskazov S.V., Chebykin E.P., Pyasova A.M., Vodneva E.N., Chuvashova I.S., Borneyakov S.A.,

**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,*

*664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,*

*Лимнологический институт СО РАН,*

*старший научный сотрудник,*

Seminsky A.K., Snopkov S.V., Chechel'nitsky V.V., Gileva N.A. Development of the Kultuk seismic prognostic polygon: ( $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ ) and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  variations in groundwater from active faults on the western coast of the Baikal // *Geodynamics and Tectonophysics*. 2015. V. 6, No. 4. P. 519–554.

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

Snopkov S.V., Kurolenko A.A. The Khubsugul earthquake of January 12, 2021 and its aftershocks: electrochemical responses of groundwaters from southwestern coast of Lake Baikal // *Geology and Environment*. 2023. Vol. 3, No. 1. P. 172–180. DOI 10.26516/2541-9641.2023.1.172

*email: ilya\_aslamov@bk.ru.*

**Aslamov Ilya Aleksandrovich,**

*Candidate of physical and mathematical sciences,*

*664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,*

*Limnological Institute SB RAS,*

*Senior Researcher,*

*email: ilya\_aslamov@bk.ru.*

**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,*

*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.*

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

**Arkhipenko Vladislav Ivanovich,**  
664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3, Limno-  
logical Institute SB RAS,  
main electronics engineer,  
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 sci-  
ences,  
664033 Irkutsk, Lermontov st., 128,  
assistant professor,

*Institute of the Earth's Crust SB RAS,  
leading engineer,  
email: ila@crust.irk.ru.*

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

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