

## Мониторинг окружающей среды

УДК 550.844+546.791.027+632.126  
<https://doi.org/10.26516/2541-9641.2024.1.42>

### Мониторинг окислительно-восстановительного потенциала подземных вод в режиме реального времени на Култукском полигоне в конце 2023 – начале 2024 г.: сопоставление электрических эффектов с землетрясениями в центральной части Байкальской рифтовой системы

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, г. Иркутск, Россия

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

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

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

**Аннотация.** Приводятся результаты наблюдений окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) в подземных водах двух скважин Култукского полигона в режиме реального времени с декабря 2023 г. до марта 2024 г. В вариациях этого параметра различаются перестройки, сопровождающиеся короткими эпизодами проявления одиночных землетрясений и более продолжительными интервалами серий землетрясений в центральной части Байкальской рифтовой системы. Смена низких значений ОВП высокими значениями сопровождается общим переходом от сильных землетрясений к слабым. Неодинаковые вариации ОВП мониторинговых станций связываются с пьезоэлектрическими эффектами, возникающими при воздействии сейсмических волн на кварц упорядоченной текстуры тектонитов в разных активных структурных элементах Южно-Байкальской впадины: в ее краевом Обручевском разломе и осевой Култукской тектонической ступени.

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

### 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

S.V. Rasskazov<sup>1,2</sup>, I.A. Aslamov<sup>3</sup>, S.V. Snopkov<sup>2,4</sup>, V.I. Archipenko<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.** The results of real-time observations of the oxidation-reduction potential (ORP) in groundwater from two wells in the Kultuk area from December 2023 to March 2024 are presented. Variations of this parameter show reorganizations, accompanied by short episodes of single earthquakes and longer intervals of earthquake series in the central part of the Baikal Rift System. A change from low to high ORP values accompanies the general transition from strong to weak earth-

quakes. The uneven variations in ORP of the monitoring stations are suggested to associate with piezoelectric effects that arise when seismic waves act on quartz of the ordered tectonite structures in different active structures of the South Baikal basin: in its marginal Obruchev fault and in the axial Kultuk tectonic step.

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

## **Введение**

В земной коре широко распространены электрические явления, связанные с пьезоэлектрическими эффектами, которые возникают при повышении горного давления в зернах кварца, имеющих ориентированную текстуру в гнейсах, гранитах и других породах. Фактор упорядоченности пространственной ориентировки минералов имеет определяющее значение, поскольку песчаники – мономинеральные кварцевые породы, сложенные хаотически расположенными зернами, – не обнаруживают пьезоэлектрического эффекта (Волярович, Пархоменко, 1954; Волярович, Соболев, 1965, 1969). Для исследования деформации и разрушения горных пород, наряду с методом электромагнитной эмиссии, широко используются также методы акустической эмиссии и флуоресценции (Веттегрень и др., 2008, 2012).

При сравнении пьезоэлектрических и упругих колебаний был сделан вывод о том, что пьезоэлектрические колебания вызываются в основном поверхностной сейсмической волной. Метод пьезоэлектрического эффекта, разработанный для геофизической разведки кварцевых и пегматитовых жил, основан на преобразовании механической энергии упругой волны в электрическую. Роль преобразователя играет сама жила. При разведке кварцевых тел пьезоэлектрические колебания принимаются разнесенными электродами.

Электромагнитные сигналы рассматриваются в качестве предвестников землетрясений (Соболев и др., 1982; Головкин, 1983; Dovbnya et al., 2006, 2014a, 2014b, 2019). В работах (Ohta et al., 2001; Akhoondzadeh et al., 2010; Bleier et al., 2010; Petraki et al., 2015) предполагается, что перед землетрясениями в минералах (кварце, являющемся полупроводником) вследствие нарастающих механических напряжений образуются по-

движные носители заряда (положительные дыры), которые могут быстро распространяться и проникать в окружающие породы, вызывая в земной коре импульсы токов в сотни килоампер, а, следовательно, и сопутствующие им электромагнитные пульсации. Электромагнитные волны сверхнизкой частоты распространяются на десятки километров в земной коре и обнаруживаются на поверхности Земли (Bortnik et al., 2010).

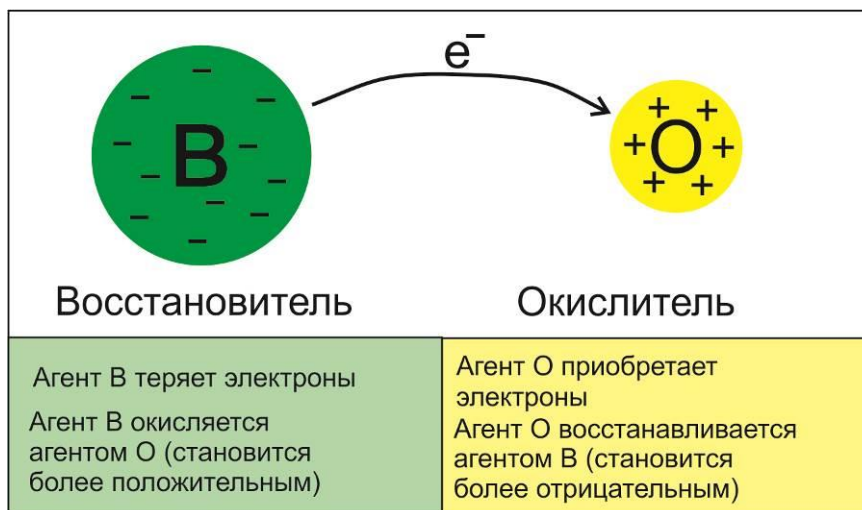
Показателен пример наблюдений электромагнитных пульсаций, которые проявились в течение двух недель перед землетрясением Alum Rock 2007 года ( $M=5.4$ ), которое произошло недалеко от Сан-Хосе в Калифорнии, США. Многие пульсации со значительными амплитудами и продолжительностью 1–30 с имели необычную униполярность (отклоняя фоновые значения показателей только в положительную или отрицательную сторону) и отличались от пульсаций, регистрировавшихся в предыдущие 2 года наблюдений. Показательно, что вскоре после землетрясения необычные пульсации прекратились (Bleier et al., 2010).

При землетрясениях Байкало-Хубсугульской сейсмической активизации 2020–2023 гг. в подземных водах Култукского полигона проводились измерения окислительно-восстановительного потенциала (ОВП) портативным прибором Hanna, которые выявили особые вариации этого параметра и pH (Снопков, Куроленко, 2023). Во время Быстринского землетрясения было определено резкое снижение ОВП как одного из основных признаков этого события (Семинский и др., 2021). Перед следующим за ним Кударинским землетрясением наблюдалась синхронизация вариаций ОВП с общим снижением этого параметра до минимальных значений в течение месяца. После Кударинского землетрясения ОВП синхронно нарастал на всех станциях в течение месяца и проявилось Хубсугульское землетрясение. Это событие обозначилось пере-

ходом от синхронных вариаций ОВП на станциях Култукского полигона к беспорядочным вариациям этого параметра (Рассказов и др., 2023б).

Вариации ОВП подземных вод Култукского полигона воспринимаются как способ регистрации пьезоэлектрических явлений, происходящих в земной коре с течением времени. ОВП представляет собой интегральный электрический показатель среды –

потенциал электронного обмена, который относится к активному окислителю или восстановителю. Окислители захватывают электроны у других молекул, а восстановители отдают электроны другим молекулам. Окислители – вещества, обеспечивающие положительные значения ОВП, восстановители – отрицательные значения этого показателя (рис. 1).



**Рис. 1.** Схема реакций окисления и восстановления в подземных водах. Схема ([https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume\\_Busters/remediate\\_refs/redox\\_chemistry.htm](https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm)) с изменениями.

**Fig. 1.** Scheme of oxidation and reduction reactions in groundwater. The scheme is modified after ([https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume\\_Busters/remediate\\_refs/redox\\_chemistry.htm](https://www.kgs.ku.edu/Hydro/GWtutor/Plume_Busters/remediate_refs/redox_chemistry.htm)).

Измерения ОВП в режиме реального времени широко применяются в мониторинге различных сред. Отслеживается качество воды в гидропонике, пивоварении, ферментации, нитрификации и в других процессах. ОВП дает сигнал о санитарном состоянии в системе раннего предупреждения загрязнения в районах с обширной нефтегазовой деятельностью (Li et al., 2017, 2019). Случаев применения мониторинга ОВП подземных вод для разработки системы слежения за сейсмическим состоянием территорий, кроме наблюдений землетрясений Байкало-Хубсугульской активизации, пока не известно.

В процессе Байкало-Хубсугульской активизации значения ОВП обычно измерялись портативными приборами во время отбора проб подземных вод на анализ элементов и изотопов U с периодичностью около 2 недель или чаще (иногда ежедневно). В

начале декабря 2023 г. на западном берегу Байкала, в скважинах мониторинговых станций 9 (Земляничная, КБЖД) и 184 (Школьная) Култукского сейсмопрогностического полигона, были установлены зонды, считывающие каждые 2 минуты значения ОВП, рН и температуры в режиме реального времени. Условия установки зондов охарактеризованы в статье (Рассказов и др., 2023а). В этой же работе приведены первые результаты наблюдений, полученные за декабрь 2023 г.

Основная цель мониторинга в режиме реального времени – регистрировать именно вариации ОВП. Другие параметры (рН и температура) служат для контроля вариаций ОВП, усложняющихся в результате прокачки скважин. Значения ОВП должны характеризовать электрохимическое состояние воды, поступающей на забой скважины.

В зимнее время для предотвращения замерзания устья скважин в условиях отрицательной температуры воздуха осуществляется подогрев воды, благодаря которому имеется возможность оценки фактора поступления воды из верхней части скважины к ее забою в результате возникновения реактивной струи, образующейся при выключении насоса. Нагретая вода верхней части скважины частично перемешивается с водой ее нижней части, в которой установлен зонд. Скважина мониторинговой ст. 9 интенсивно прокачивается раз в неделю. Остальные дни недели из нее в дневное время берется умеренное количество воды. Скважина мониторинговой ст. 184 умеренно прокачивается постоянно в дневное время. Прокачка влечет за собой резкое возрастание температуры воды, фиксируемой зондом, но через некоторое время (в течение первых часов) температура снижается и стремится к фоновым значениям температуры воды, поступающей снизу в забой скважины. При резком возрастании температуры воды скважины рН скачкообразно снижается, а ОВП, наоборот, скачкообразно возрастает. При последующем снятии эффекта температуры рН и ОВП нормализуются и приближаются к этим параметрам глубинных подземных вод.

В декабре 2023 г. значения ОВП подземных вод обеих скважин Култукского полигона возрастали на несколько сотен мВ. Относительное возрастание ОВП, полученное в режиме реального времени для воды забоя скважины, в целом совпадало с относительным возрастанием ОВП, определенным портативным прибором Hanna при отборе проб прогретой воды на устье скважин. Близкие значения ОВП, полученные в декабре 2023 г. для воды забоя и нагретого устья скважин, а также значения этого параметра, полученные для устья скважин в ходе предшествующего мониторинга, свидетельствовали о восстановленном характере подземных вод, сопутствующих сейсмическим событиям короткого эпизода 22–25 ноября в центральной части Байкальской рифтовой системы с типичной для Байкало-

Хубсугульской активизации переключкой землетрясений территорий Байкала и Хубсугула. Подобная переключка состоялась также во время мониторинга в режиме реального времени в коротком сейсмическом эпизоде 16–17 декабря 2023 г.

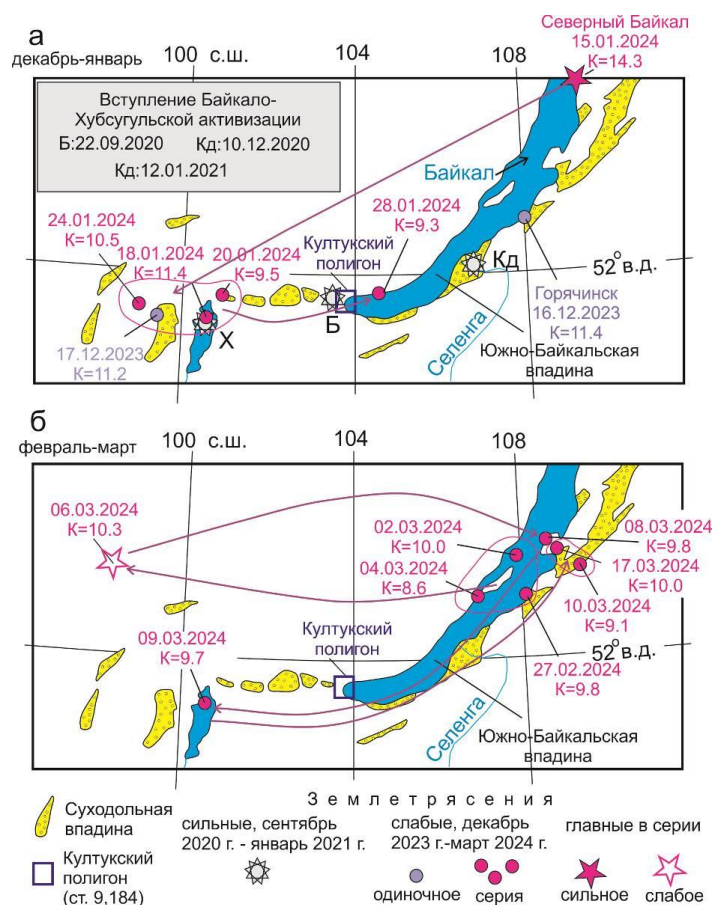
В настоящей работе приводятся результаты наблюдений ОВП в воде скважин в режиме реального времени с декабря 2023 г. до марта 2024 г., включительно, в сопоставлении с землетрясениями, произошедшими в Байкальской рифтовой системе в этот временной интервал.

### ***Переход от коротких сейсмических эпизодов к более продолжительным сейсмическим интервалам***

Во время короткого сейсмического эпизода 16–17 декабря 2023 г. сохраняются признаки Байкало-Хубсугульской активизации. В первый день землетрясение происходит на Южном Байкале, во второй – на Хубсугуле.

Более продолжительная серия землетрясений байкало-хубсугульского типа проявляется с 15 до 28 января 2024 г. Она начинается с сильного землетрясения Северного Байкала, продолжается тремя событиями Прихубсугулья и завершается событием Южного Байкала (рис. 2а). Еще одна продолжительная серия землетрясений происходит в конце февраля – первой половине марта. С 27 февраля до 04 марта регистрируются три слабых сейсмических события на Среднем Байкале, 06 марта – землетрясение в ЮВ части Восточного Саяна, 08 марта – снова землетрясение на Среднем Байкале, 9 марта – землетрясение на Хубсугуле и, наконец, 10 марта – в южной части Баргузинской долины. 13 марта два землетрясения происходят за восточной рамкой схемы рис. 2 (не показаны), что может восприниматься как факт распространения сейсмичности в северо-восточную часть Байкальской рифтовой системы. Последнее землетрясение серии происходит 17 марта на Среднем Байкале, в районе п-ова Святой Нос (рис. 2б).





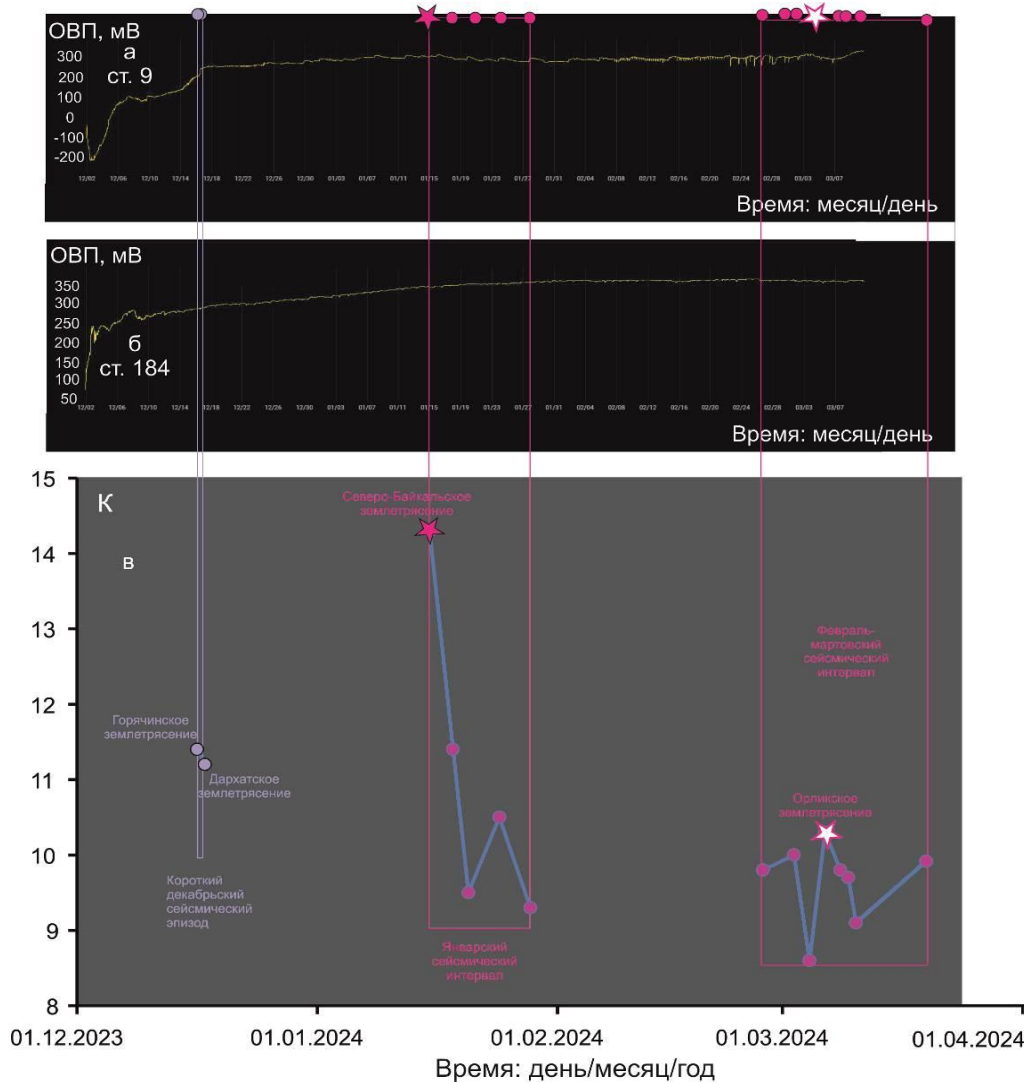
**Рис. 2.** Схема пространственного распределения землетрясений в декабре 2023 г.– январе 2024 г. (а) и в феврале – марте 2024 г. (б). Стрелками показаны последовательности землетрясений, овалами – эпицентральные поля землетрясений, близких по времени. Сохраняется переключка землетрясений, свойственная Байкало-Хубсугульской активизации, вступление которой обозначено сильными землетрясениями 2020–2021 гг.: Б – Быстринским, Кд – Кударинским, Х – Хубсугульским. Здесь и далее все наблюдения приводятся по местному времени, для землетрясений используется каталог (Карта..., 2023).

**Fig. 2.** Scheme of the spatial distribution of earthquakes in December 2023–January 2024 (a) and in February–March 2024 (b). Arrows show sequences of earthquakes, ovals show the epicentral fields of earthquakes close in time. The roll call of earthquakes characteristic of the Baikal-Khubsugul reactivation remains, the entry of which was indicated by strong earthquakes in 2020–2021: Б – Vystraya, Кд – Kudara, Х – Khubsugul. Hereinafter, all data are given in the local time, the catalog (Map..., 2023) is used.

### Вариации ОВП в сопоставлении с землетрясениями

По наблюдениям четырех месяцев мониторинговые станции 9 и 184 дают неодинаковый рост ОВП. Короткие Байкало-Хубсугульские переключки землетрясений 22–25 ноября и 16–17 декабря 2023 г. обозначают низкие и быстро возрастающие значения ОВП. На ст. 9 последний из этих интервалов (16–17 декабря) приходится на резкий перегиб от быстрого к медленному подъему ОВП. Последующему временному отрезку соответствуют продолжительные

серии с 15 до 28 января и с 27 февраля до 09 марта 2024 г., переключаются на Байкале и Хубсугуле. Декабрьский короткий эпизод землетрясений среднего энергетического класса (K=11.2–11.4) сменяется январским сейсмическим интервалом, начинающимся сильным Северо-Байкальским землетрясением (K=14.3) и февраль-мартовским интервалом слабых землетрясений (K не выше 10.3). Выход с низких значений ОВП на высокие значения сопровождается переходом от более сильных землетрясений к слабым (рис. 3).



**Рис. 3.** Тренды возрастания ОВП подземных вод мониторинговых ст. 9 (а) и 184 (б), сопровождающие проявление коротких эпизодов одиночных землетрясений (столбики пастельно-голубого цвета) и более продолжительных интервалов их серий (столбики пурпурного цвета). Для землетрясений использованы значки, подобные значкам на рис. 2.

**Fig. 3.** Trends of increasing groundwater ORP at monitoring stations 9 (a) and 184 (b) that accompany occurring of short episodes of single earthquakes (pastel blue bars) and longer intervals of their series (purple bars). For earthquakes, marks similar to those in Fig. 2 are used.

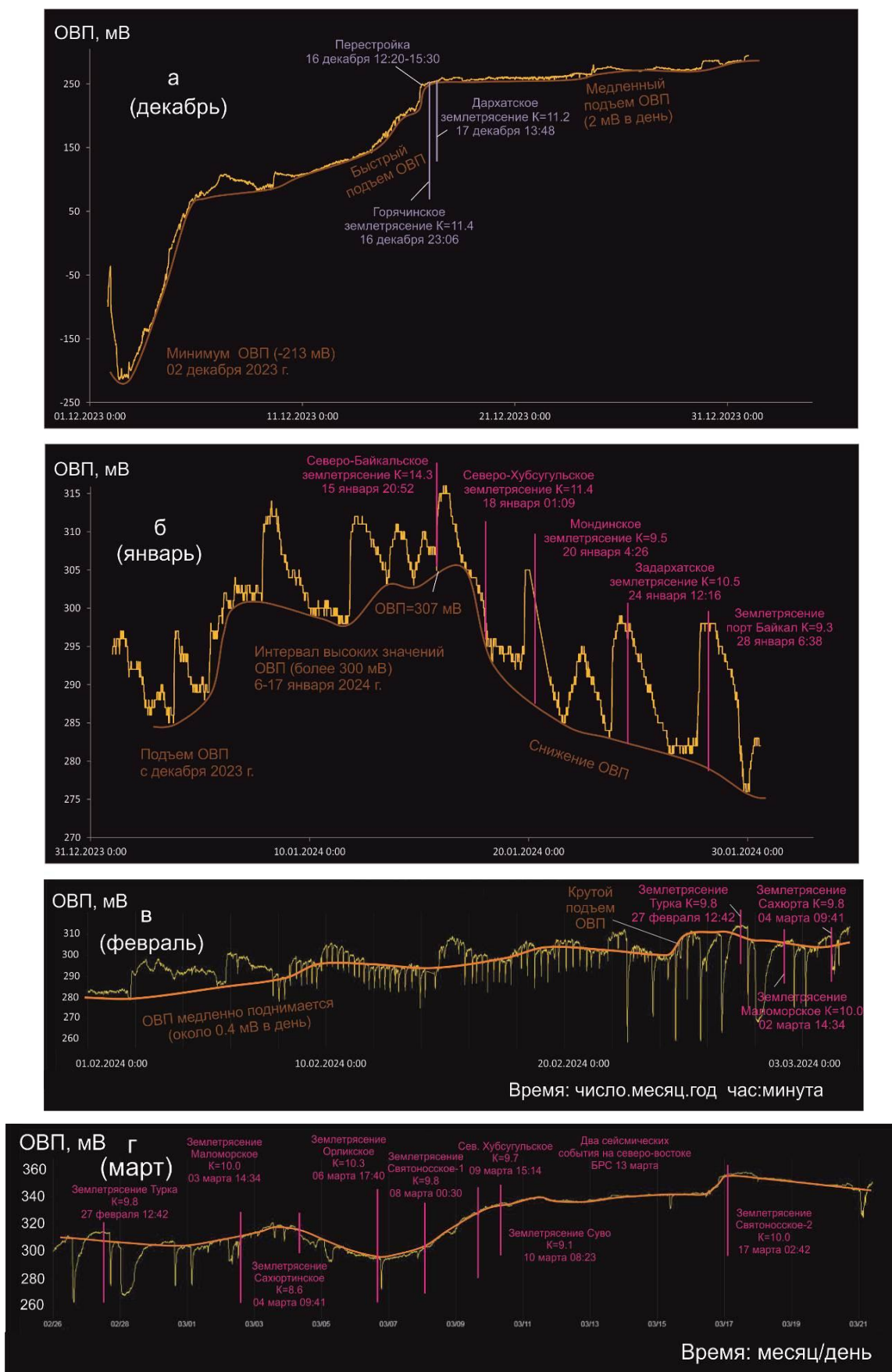
### Станция 9

Рассмотрим более детальную расшифровку временных вариаций ОВП ст. 9 по месячным интервалам (рис. 4). 02 декабря 2023 г. значения ОВП находятся на минимуме (–213 мВ). В течение декабря ОВП возрастает и 6–17 января 2024 г. выходит на высокие значения (более 300). По нижней огибающей линии максимум (более 307 мВ) устанавливается на этой станции с 19:00 15 января до 21:00 16 января. Начальный подъем значений ОВП вечером 15 января ст. 9 синхронизируется с пиком температуры, который на следующий день нивелируется. ОВП воды ст. 9 достигает максимума (более 300 мВ) 6–

17 января 2024 г. и к концу января снижается. Минимум ОВП (276 мВ) устанавливается 29 января с 19:50 до 24:00.

16 декабря 2023 г. быстрый подъем ОВП ст. 9 сменяется медленным подъемом этого параметра (2 мВ в день). Перестройка ОВП сопровождается Горячинским землетрясением 16 декабря в 23:06 и Дархатским землетрясением 17 декабря в 13:48 (рис. 4а).

После продолжительного подъема ОВП выходит на максимум 06–17 января. На максимуме ОВП 15 января в 20:52 происходит сильное Северо-Байкальское землетрясение (К=14.3). После этого землетрясения ОВП снижается. На фоне снижения ОВП до конца января следуют еще четыре землетрясения.



**Рис. 4.** Вариации ОВП подземных вод ст. 9 с 01 до 31 декабря 2023 г. (а), с 31 декабря 2023 г. до 30 января 2024 г. (б), с 31 января до 05 марта (в) и с 26 февраля до 21 марта 2024 г. (г). На панелях а и б генеральная линия огибает варьирующие значения ОВП снизу, при появлении отрицательных импульсов на панели в – соответствует минимумам значений фона. Пастельно-

голубым цветом выделены короткие эпизоды проявления землетрясений, пурпурным – временные интервалы более продолжительных серий.

**Fig. 4.** Groundwater ORP variations at station 9 from December 1 to 31, 2023 (a), from December 31, 2023 to January 30, 2024 (b), from January 31 to March 5 (c), and from February 26 to March 21, 2024 (d). In panels a and b, the general line bends around the varying ORP values from below; when negative pulses appear in panel c, it corresponds to the minimal values of the background values. Short episodes of earthquakes are highlighted in pastel-blue; time intervals of longer series are highlighted in purple.

Весь февраль ОВП ст. 9 медленно поднимается (в среднем на 0.4 мВ в день). Землетрясения в это время отсутствуют. С 11:00 24 февраля до 07:00 25 февраля значение ОВП возрастает на 13 мВ (с 299 до 312 мВ). Через 2 дня (27 февраля) в 12:42 на Среднем Байкале регистрируется слабое землетрясение Турка, за которым 02–04 марта на Среднем Байкале следуют еще два сейсмических толчка. 04 марта поддерживается повышенное значение ОВП (317 мВ), которое снижается к 06 марта до 296 мВ. В это время происходит Орликское землетрясение, которое по энергетическому классу ( $K=10.3$ ) превышает (хотя и незначительно) все другие землетрясения февраль-мартовского интервала. Остальные три землетрясения (08, 09 и 10 марта) регистрируются на фоне заметного возрастания ОВП, достигающего к 11 марта 340 мВ.

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

#### Станция 184

На рис. 5 приводится детальная расшивка по месячным интервалам временных вариаций ОВП ст. 184. 01 декабря 2023 г. в 20:40 значение ОВП находится на минимуме (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. Горячинское и Дархатское землетрясения 16–17 декабря в значениях ОВП не выражены.

По нижней огибающей линии в первой половине января ОВП ст. 184 возрастает по 2.13 мВ в день. После перестройки ОВП 13–15 января, сопровождающей сильное Северо-Байкальское землетрясение ( $K=14.3$ , 15 января в 20:52), темп возрастания ОВП снижается до 0.95 мВ в день. Еще четыре январских землетрясения происходят на фоне сниженного темпа нарастания ОВП. За январь значения ОВП по нижней огибающей линии постепенно возросли от 320 до 359 мВ.

В феврале темп роста значений ОВП ст. 184 по нижней огибающей линии становится крайне малым и составляет 0.11 мВ в день. Низкие значения (около 358–359 мВ) проявляются 06, 15 и 23 февраля. Между этими минимумами значения ОВП повышаются на 3–4 мВ. Землетрясения в это время отсутствуют.

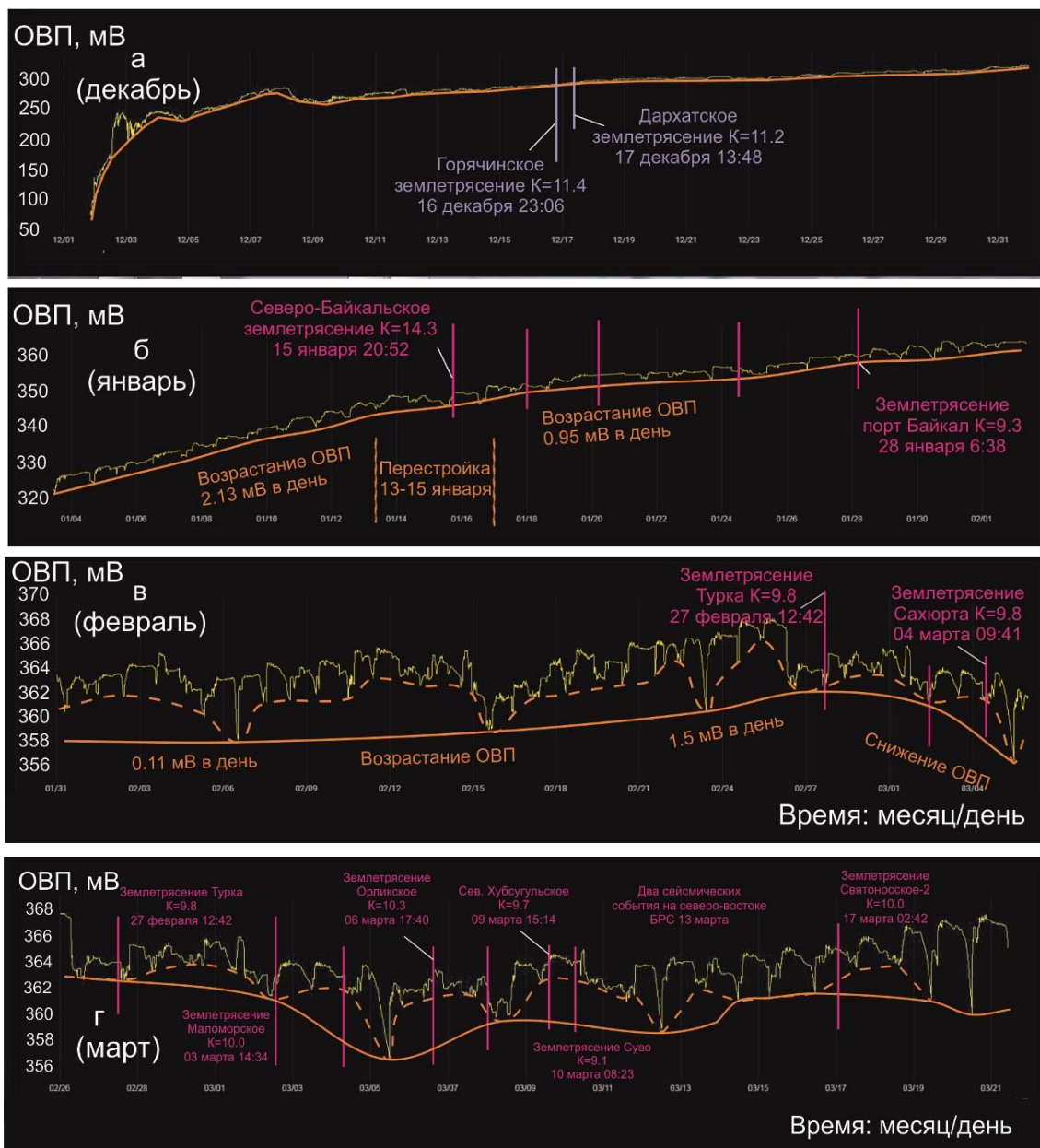
После минимума 23 февраля ОВП заметно увеличивается (до 1.5 мВ в день) и на максимуме 363 мВ 27 февраля в 12:42 сопровождается слабым землетрясением Турка на Среднем Байкале, за которым 02–04 марта на этой же территории следуют еще два сейсмических толчка на фоне снижения ОВП. 05 марта в 11:32 проявляется отрицательный ОВП импульс (значение 357 мВ), подобный импульсам 06, 15 и 23 февраля. Этот импульс, однако, может иметь значение перестройки, поскольку попадает между последним событием из трех начальных февраль-мартовских землетрясений Среднего Байкала и Орликским землетрясением 06 марта. Остальные три землетрясения (08, 09 и 10 марта) регистрируются на фоне слегка возросшего ОВП.

За четырех-месячный временной отрезок наблюдений мы видим разный характер вариаций ОВП ст. 184 при землетрясениях: 1) короткий декабрьский сейсмический эпизод



не сопровождается заметными изменениями тренда ОВП, 2) январский сейсмический интервал, начинающийся сильным Северо-Байкальским землетрясением, сопровождается перестройкой тренда ОВП с замедлением темпа его возрастания, 3) февраль-мартовский сейсмический интервал, начинающийся группой слабых сейсмических

событий Среднего Байкала, отчетливо обозначается перестройкой тренда ОВП на максимуме с последующим снижением и возрастанием значений этого параметра. 08–14 марта сохраняется общая тенденция снижения ОВП ст. 184, относительно максимума 359 мВ, установившегося во время землетрясения Турка.



**Рис. 5.** Вариации ОВП подземных вод ст. 184 с 01 до 31 декабря 2023 г. (а), с 31 декабря 2023 г. до 30 января 2024 г. (б), с 31 января до 05 марта 2024 г. (в) и с 26 февраля до 21 марта 2024 г. (г). Условные обозначения см. рис. 3.

**Fig. 5.** Groundwater ORP variations at station 184 from December 1 to December 31, 2023 (a), from December 31, 2023 to January 30, 2024 (b), from January 31 to March 5, 2024 (c), and from February 26 to March 25, 2024 (g). Symbols are as in Fig. 3.

## Обсуждение

По изменению ОВП в подземных водах регистрируются косейсмические пьезоэлектрические эффекты верхней части коры. Возникает вопрос, несет ли этот метод регистрации пьезоэлектрических эффектов информацию, сопоставимую с той, которая была уже получена геофизическими методами при изучении электрических эффектов, сопровождавших землетрясения в Байкальской рифтовой системе? Можно ли в работах по оценке угрозы землетрясений сопоставлять геофизические наблюдения электрических сигналов с наблюдениями вариаций ОВП в подземных водах?

### *Соотношение регистрации электрических явлений в воде и кварцсодержащей породе*

После экспериментальных и теоретических работ по пьезоэлектрическим эффектам в кварце и других минералах как результата распространения сейсмических волн (Волярович, Пархоменко, 1954; Волярович, Соболев, 1965, 1969) теоретические предпосылки использования электрохимических параметров подземных вод для регистрации землетрясений обсуждались в работах (Freund, 2002, 2013). В качестве причины их изменения предполагалось проявление пероксидных дефектов, существующих в структурах породообразующих минералов (кварца), с развитием электрохимических процессов при ведущей роли подземных вод в качестве электролита.

В работе (Волярович, Пархоменко, 1954, с. 242) приводится информация об экспериментах «...по воспроизведению сейсмоэлектрического эффекта  $E$  ... в искусственно увлажненных образцах горных пород. При этом было установлено, что до искусственного увлажнения образец доломита при воздействии на него упругих волн электризации не обнаруживал. После увлажнения этого образца при прохождении упругой волны наблюдалось возникновение потенциала на его гранях. Существенно, что знак заряда, подаваемого на электронную трубку, в данном случае не зависел от того, с какой грани образца снимались заряды, а определялся градиентом перепада давления. Таким обра-

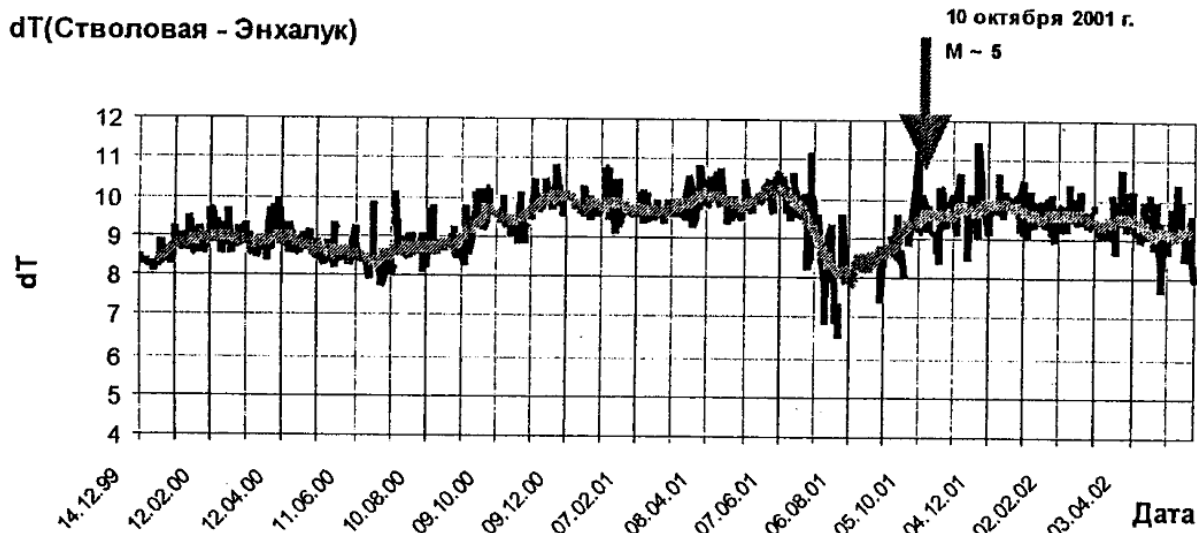
зом, возникновение потенциала в увлажненных образцах горных пород при прохождении упругой волны и отсутствие полярности, по нашему мнению, являются достаточным подтверждением того, что наблюдавшийся в полевых условиях А.Г. Ивановым эффект действительно обусловлен наличием твердой и жидкой фаз. У горных пород, обнаруживающих пьезоэлектрический эффект (гранит), высушивание их с целью удаления содержащейся в них влаги не понижало пьезоэффекта».

В работе, опубликованной позже (Balk et al., 2009), предполагается, что обычные магматические и высоко метаморфические породы содержат спящие дефекты кристаллической структуры, которые при механическом напряжении высвобождают носители электронного заряда. Таким образом, порода представляет собой электроаккумулятор. Носителями заряда в кварцевых породах являются дефектные электроны, известные как «положительные дыры» – электронные состояния, связанные с  $O^-$  в матрице  $O^{2-}$ . Установлено, что дефектные электроны перемещаются по градиентам напряжений на расстояния порядка метров в лабораторных экспериментах и километров в полевых условиях. На границе раздела порода–вода дефектные электроны порождают высокоактивные радикалы кислорода, которые окисляют воду ( $H_2O$ ) до перекиси водорода ( $H_2O_2$ ). При этом на каждые два носителя заряда образуется одна молекула  $H_2O_2$ . В лабораторных экспериментах электрическая цепь замыкалась путем прокладки медного проводника от нагруженной породы к ненапряженной. В естественных условиях замыкание цепи может быть обеспечено за счет электролитической проводимости подземных вод.

### *Результаты геофизических наблюдений электромагнитных эффектов при землетрясениях в Байкальской рифтовой системе*

На Среднем Байкале в месте высокоградиентного перехода Стволовая–Энхалук от положительной к отрицательной аномалии произошло сейсмическое событие 10 октября 2001 г. В разностной кривой проявилась бухта, предшествующая землетрясению

(рис. 6). Это сильное землетрясение связывалось с ростом положительной магнитной аномалии (Гольдин и др., 2003).

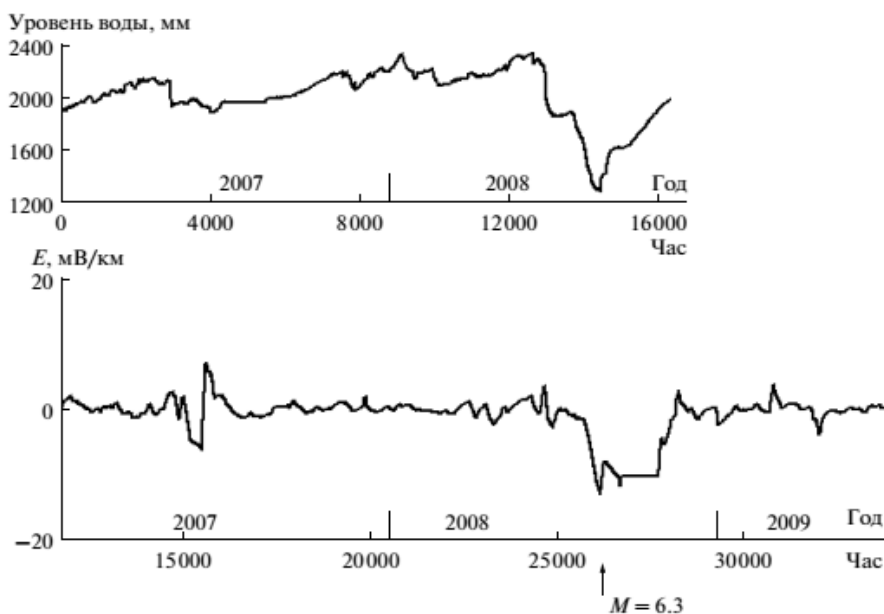


**Рис. 6.** Изменение разности модуля полного вектора магнитного поля между пунктами Стволовая и Энхалук, сопровождавшее землетрясение 10 октября 2001 года с  $M \approx 5$  (Гольдин и др., 2003).

**Fig. 6.** Variation of the modulus difference of the total magnetic field vector between the Stvolovaya and Enkhaluk sites, accompanying the earthquake on October 10, 2001 with  $M \approx 5$  (Goldin et al., 2003).

Перед подготовкой сильного Култукского землетрясения 2008 г. ( $M = 6.3$ ), во время которого уровень подземных вод понижался, одновременно понижалась напряженность

электрического поля внутриземных источников (рис. 7). Это связывалось с проявлением пьезоэлектрических эффектов (Мороз, Мороз, 2012).

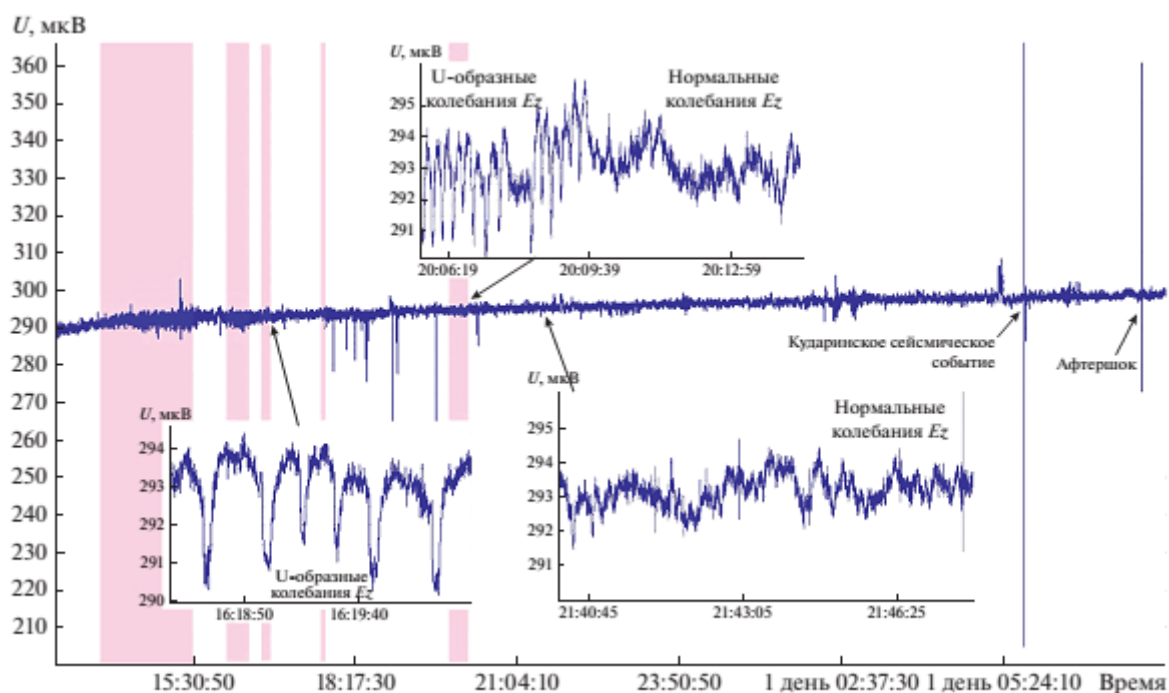


**Рис. 7.** Сопоставление графиков напряженности электрического поля внутриземных источников в п. Быстрая и уровня подземных вод в п. Талая (Мороз, Мороз, 2012). На временной оси указан момент Култукского землетрясения с  $M = 6.3$ .

**Fig. 7.** Comparison of changes in the electric field strength of intraterrestrial sources in the Bystraya site and the groundwater level in the Talaya site (Moroz, Moroz, 2012). The moment of the Kultuk earthquake with  $M = 6.3$  is marked on the time axis.

Подобные эффекты отмечались в виде U-образных колебаний вертикальной электрической компоненты  $E_z$  (рис. 8) за сутки до сильного Кударинского землетрясения

(09.12.2020 г.,  $M_w = 5.5$ ) на полигоне «Куяда», расположенном в 40 км от его эпицентра (Семинский, Поспеев, 2022).



**Рис. 8.** Скриншот окна программы “ViewField” с визуализацией записи вертикальной электрической компоненты  $E_z$  в период 09–10.12.2020 г. (полигон “Куяда”). Розовые полигоны – моменты проявления аномальных U-образных колебаний с периодами 5–30 с (Семинский, Поспеев, 2022).

**Fig. 8.** Screenshot of the “ViewField” program window with visualization of the recording vertical electrical component  $E_z$  at 09–10.12.2020 (Kuyada site). Pink polygons are the periods of occurrence of anomalous U-shaped oscillations with frequencies of 5–30 s (Seminsky, Pospееv, 2022).

В приведенных примерах определения косейсмических электрических эффектов геофизическими методами остается неясным, как эти эффекты должны применяться для оценки сейсмической угрозы в Байкальской рифтовой системе? В работе (Гольдин и др., 2003) рассмотрен исключительный случай проявления землетрясения, локализованного в высокоградиентной зоне непосредственно на территории наблюдений. Вряд ли приближение сильного землетрясения на обширной территории Байкальской рифтовой системы может определяться по методу считывания разности электромагнитных аномалий. Понижение напряженности электрического поля внутриземных источников при Култукском землетрясении в п. Быстрая (Мороз, Мороз, 2012) определено единственный раз. Остается неясным, проявился ли подобный эффект в этой же точке наблюдения, например, при сильных землетрясениях Байкало-Хубсугульской активи-

зации? Наконец, станция «Куяда», на которой определены аномальные U-образные колебания вертикальной электрической компоненты  $E_z$  с периодами 5–30 с (Семинский, Поспеев, 2022), находится на Бугульдейском массиве метагабброидов. В породах такого состава пьезоэффекты (свойственные упорядоченным кварцевым текстурам) генерироваться не должны. Возникает вопрос о других вероятных механизмах косейсмических изменений компоненты  $E_z$ .

#### *Сравнительный анализ косейсмических вариаций ОВП подземных вод ст. 9 и 184*

Исследования косейсмической химической гидрогеодинамики проводятся на Култукском сейсмопрогностическом полигоне в сочленении Главного Саянского и Обручевского разломов. Первый из них является структурным швом фундамента Сибирского палеоконтинента, который характеризовался левосторонними сдвиговыми смещениями,

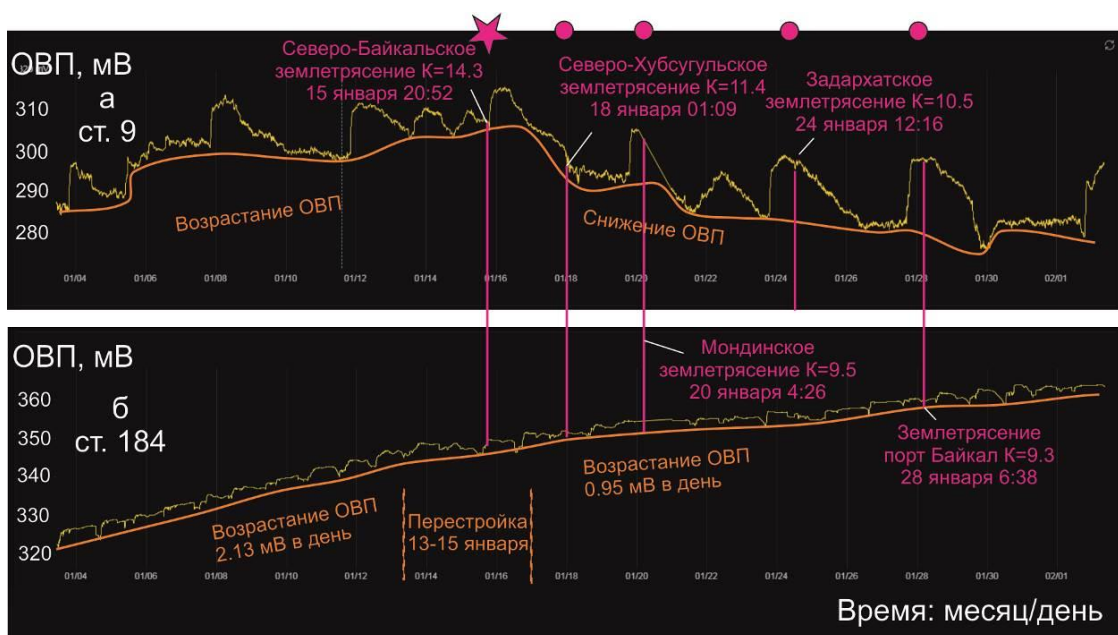


не превышающими в сейсмодислокациях нескольких десятков метров, второй трассирует северный борт Южно-Байкальской впадины как структуры с суммарным позднекайнозойским вертикальным смещением более 4 км. В районе Култукского полигона зона тектонитов (включая милониты) составляет несколько км. Станции наблюдений находятся непосредственно в зоне тектонитов, состоящих из мелких зерен кварца, которые были упорядочены при тектонических движениях, сопровождавшихся образованием псевдотахилитов (Rasskazov et al., 2021). Кварцосодержащие породы зоны милонитов играют роль генераторов электрических сигналов от сейсмических волн. Соответственно, возбуждаемые ими сигналы могут отражаться на вариациях ОВП подземных вод, циркулирующих в зоне тектонитов.

Результаты ОВП мониторинга зависят, прежде всего, от положения станции в том или ином активном разломе. Чувствительность ст. 9 к сильным землетрясениям определяется ее установкой в активном субширотном фрагменте Обручевского разлома. Ст. 184 характеризует осевую часть рифтовой структуры в торцовой Култукской тектонической ступени Южно-Байкальской впадины, наклоненной с запада на восток, в сторону Байкала. За 4-месячный период наблюдений окислительные свойства под-

земных вод изменились кардинально, что отразилось в возрастании значений ОВП двух станций на несколько сотен милливольт. Декабрьские землетрясения среднего энергетического класса ( $K=12.2-12.4$ ) были явно связаны с предшествующей сейсмичностью Байкало-Хубсугульской активизации. Об этом свидетельствует их проявление на восходящей линии ОВП с ее перегибом на ст. 9. Судя по низким (отрицательным) значениям ОВП, эта станция более чувствительна к сильным землетрясениям, чем ст. 184, имевшая лишь положительные значения этого показателя (см. рис 3а и 4а).

Сильное Северо-Байкальское землетрясение ( $K=14.3$ ) 15 января 2024 г. сопровождалось перестройкой ОВП-сигналов 13–15 января на обеих мониторинговых станциях. В то же время понижение ОВП от максимума ст. 9, соответствующего по времени этому землетрясению, опять свидетельствует о ее высокой чувствительности к регистрации сильных землетрясений. На ст. 184 ОВП продолжает возрастать 13 января, но в замедленном темпе. До 11:00 13 января выдерживается сравнительно крутой наклон линии ОВП (2.13 мВ в день). После 11:00 линия становится более пологой (0.95 мВ в день). ОВП подземных вод ст. 184 возрастает в течение всего января от 320 мВ (1 января) до 363 мВ (31 января) (рис. 9).

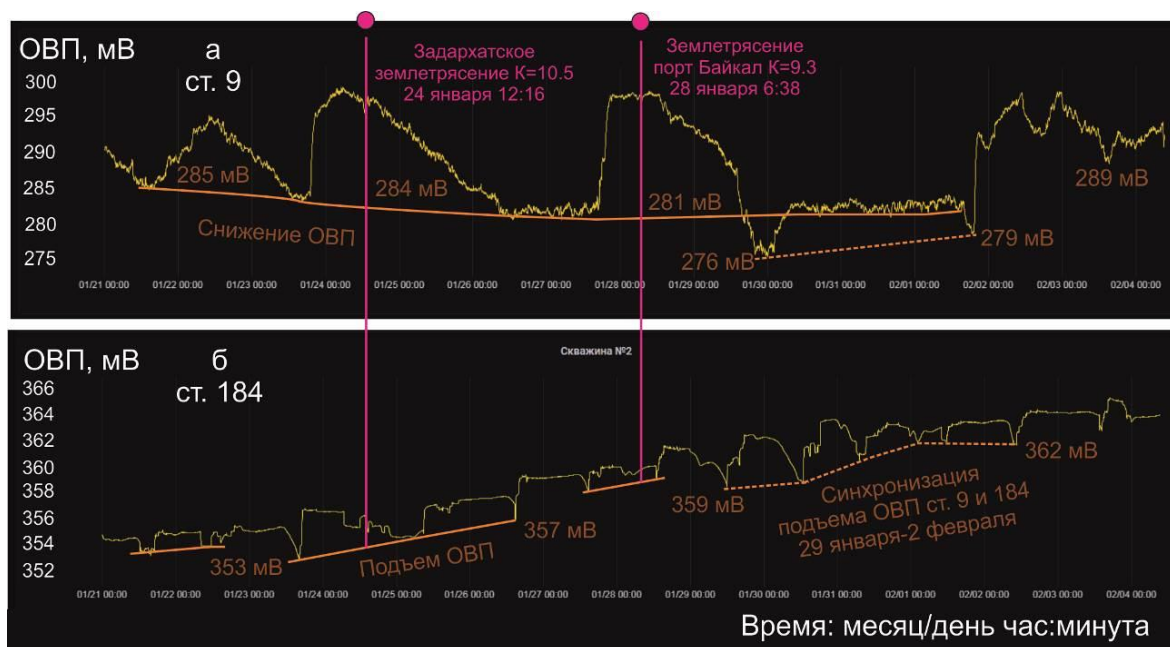


**Рис. 9.** Сопоставление вариаций ОВП подземных вод ст. 9 (а) и ст. 184 (б) с 31 декабря 2023 г. до 30 января 2024 г. Для ОВП на панелях а и б используются разные шкалы. Генеральная линия ОВП проводится по минимумам значений фона. Единичные землетрясения в середине декабря приходятся на перегиб графика. Оживление сейсмической активности во второй половине января сопровождается снижением ОВП.

**Fig. 9.** Comparison of groundwater ORP variations at stations 9 (a) and 184 (b) from December 31, 2023 to January 30, 2024. Different scales are used for ORP in panels a and b. The general ORP line is drawn along the minimal background values. Single earthquakes in mid-December occur at the inflection point of the graph. The rejuvenation of seismic activity in the second half of January is accompanied by decrease in ORP.

Мы видим, что все землетрясения второй половины января соответствуют нисходящей кривой ОВП подземных вод ст. 9. Вслед за последним землетрясением этой серии (порт Байкал, 29 января 6:38) ОВП вод ст. 9 выходит на минимальное значение 276

мВ и 2 февраля повышается до 279 мВ. Это возрастание синхронизируется с длительным общим возрастанием ОВП вод ст. 184 (рис. 10). Такая перестройка в ОВП-сигналах подземных вод обозначает завершение сейсмического интервала.



**Рис. 10.** Сопоставление вариаций ОВП подземных вод ст. 9 (a) и ст. 184 (б) в конце серии январских землетрясений с 21 января до 04 февраля 2024 г. Землетрясения прекращаются при синхронизации подъема ОВП на мониторинговых станциях.

**Fig. 10.** Comparison of groundwater ORP variations at stations 9 (a) and 184 (b) at the end of the series of January earthquakes from January 21 to February 4, 2024. Earthquakes have ceased when the ORP rise is synchronized at the monitoring stations.

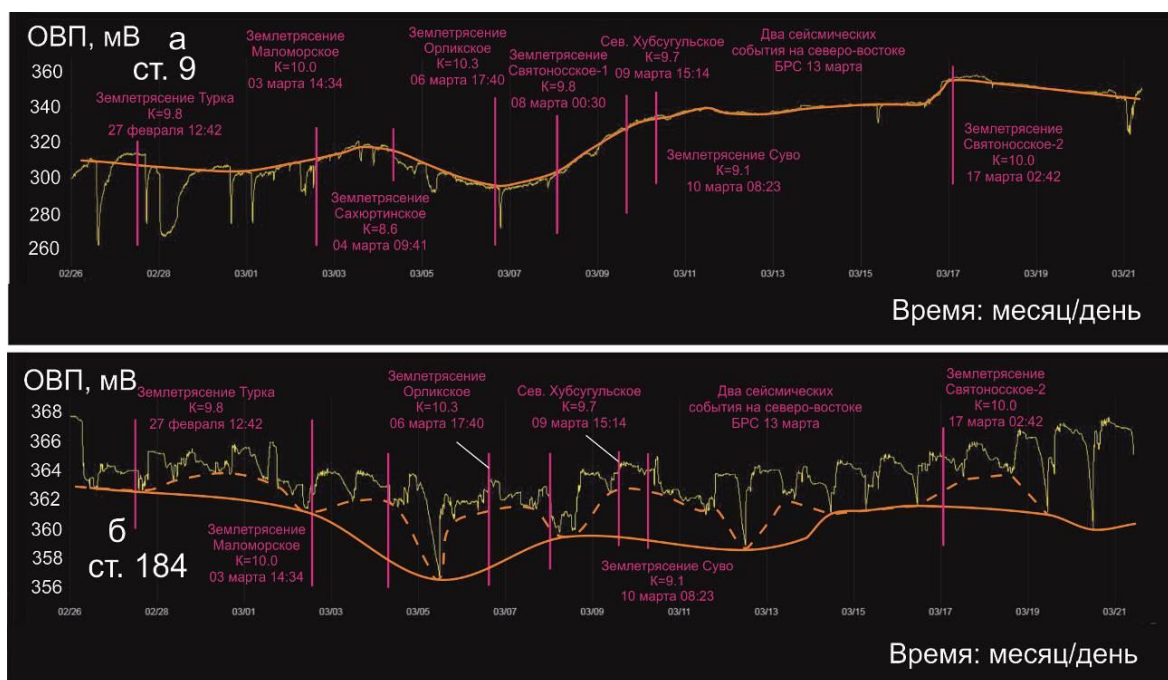
При землетрясениях в конце февраля и первой половине марта характер ОВП-вариаций меняется (рис. 11). Три начальных землетрясения Среднего Байкала соответствуют нисходящей линии ОВП ст. 184, тогда как линия ОВП ст. 9 находится на одном уровне и несколько поднимается. Во второй половине этого сейсмического интервала значения ОВП ст. 184 выходят из минимума, а значения ОВП ст. 9 волнообразно снижаются и возрастают. Минимум ст. 184 предшествует минимуму ст. 9. Такое смещение минимумов характеризует начальный отклик снижения ОВП ст. 184 в осевой торцовой Култукской тектонической ступени на землетрясения, рассеянные по сечению впадины

Среднего Байкала. Подобный процесс на ст. 9 в краевом Обручевском разломе Южно-Байкальской впадины включается позже, когда происходит Орликское землетрясение, но уже начинает нивелироваться при землетрясении Святоносском-1.

С 06 марта на ст. 184 и с 07 марта на ст. 9 наблюдаются землетрясения при возрастающем ОВП. Наблюдаемое увеличение ОВП может объясняться возможным повышением концентрации в воде перекиси водорода (являющейся мощным окислителем со значением ОВП порядка 2000 мВ), образующейся в ходе электрохимических реакций на границе нагруженной кварцевой породы с подземными водами. Такое соотно-

шение наблюдаемой динамики ОВП и землетрясений отличается от их соотношений в ходе реализации предшествующих землетрясений, происходивших на фоне снижения ОВП подземных вод. Последнее может быть

вызвано частичной разгрузкой кварцевых пород с сопутствующим снижением пьезоэлектрических эффектов и, как следствие, интенсивности электрохимических процессов на границе порода–вода.



**Рис. 11.** Сопоставление вариаций ОВП подземных вод ст. 9 (а) и ст. 184 (б) с 26 февраля до 14 марта при землетрясениях.

**Fig. 11.** Comparison of groundwater ORP variations at stations 9 (a) and 184 (b) from February 26 to March 14 during earthquakes.

### Заключение

Наблюдения на Култукском полигоне, выполненные в режиме реального времени с 1 декабря 2023 г. до 21 марта 2024 г., свидетельствуют о последовательном подъеме ОВП подземных вод на несколько сот милливольт. Пространственное распределение землетрясений в Байкальской рифтовой системе в этот временной интервал соответствует Байкало-Хубсугульской перекличке землетрясений. Низкие значения ОВП в начале наблюдений сопровождаются землетрясениями умеренной и большой силы, высокие значения ОВП к концу наблюдений сопутствуют слабым землетрясениям.

Результаты, полученные в режиме реального времени, подтверждают существенные вариации ОВП подземных вод Култукского полигона, установленные эпизодическими измерениями этого параметра портативными приборами в предшествую-

щие 3.5 года. На двух станциях, одна из которых (ст. 9) находится в зоне бортового Обручевского разлома Южно-Байкальской впадины, а другая (ст. 184) – на ее торцовой Култукской тектонической ступени, наблюдается разный характер проявления пьезоэлектрических эффектов. В период вступления интервалов землетрясений по вариациям ОВП ст. 9 отчетливо регистрируются сейсмические толчки повышенной силы бортового разлома впадины и по вариациям ОВП ст. 184 – слабые толчки, рассеянные во впадине осевой части рифтовой системы.

Выявленные закономерности в вариациях ОВП будут корректироваться в ходе продолжающегося гидрогеохимического мониторинга и мониторинга ОВП в режиме реального времени. В разработке подходов к оценке сейсмической угрозы в центральной части Байкальской рифтовой системы было бы рациональным найти возможности для сопоставления полученных косейсмических



электрических сигналов ОВП в подземных водах из зон активных разломов с электрическими сигналами, регистрируемыми геофизическими методами. Решение вопроса о ходе косейсмических гидрогеохимических изменений подземных вод по механизму генерации перекиси водорода и, возможно, других окислителей требует постановки специальных исследований на станциях мониторинга с привлечением конкретных аналитических данных по подземным водам.

### **Благодарности**

Мониторинг ОВП подземных вод в режиме реального времени проводится в рамках реализации крупного научного проекта «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» (Карта..., 2012).

### **Литература**

Веттегрень В.И., Башкарев А.Я., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Фрактолюминесценция кристаллического кварца при ударе // Физика твердого тела. 2008. Т. 50, Вып. 1. С. 29–31.

Веттегрень В.И., Куксенко В.С., Мамалимов Р.И., Щербаков И.П. Динамика фрактолюминесценции, электромагнитной и акустической эмиссии при ударе по поверхности гранита // Физика Земли. 2012, № 5. С. 58–63.

Воларович М.П., Пархоменко Э.И. Пьезоэлектрический эффект горных пород // Докл. АН СССР. Геофизика. 1954. Том ХСІХ. № 2. С. 239–242.

Воларович М.П., Соболев Г.А. Использование пьезоэлектрического эффекта горных пород для подземной разведки тел-пьезоэлектриков // Докл. АН СССР. 1965. Т. 162, № 3. С. 556–558.

Воларович М.П., Соболев Г.А. Пьезоэлектрический метод геофизической разведки кварцевых и пегматитовых жил. М.: Наука, 1969. 132 с.

Головков В.П. (ред.) Электрические и магнитные предвестники землетрясений. Ташкент: изд-во ФАН Узбекской ССР, 1983. 135 с.

Гольдин С.В., Дядьков П.Г., Селезнев В.С., Шерман С.И. Некоторые результаты исследований в связи со среднесрочным прогнозом землетрясений на Южно-Байкальском геодинамическом полигоне // Проблемы сейсмологии III-го тысячелетия: Материалы междунар. геофиз. конф. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2003. С. 11–31.

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

Мороз Ю.Ф., Мороз Т.А. Аномалии электрического поля и электропроводности земной коры в связи с Култукским землетрясением на оз. Байкал // Физика Земли. 2012. № 5. С. 64–64.

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, рН и температуры подземных вод Култукского резервуара в режиме реального времени (Байкальская рифтовая система) // Геология и окружающая среда. 2023а. Т. 3, № 4. С. 161–181. <https://doi.org/10.26516/2541-9641.2023.4.161>

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

Семинский И.К., Поспеев А.В. Отражение крупных для Байкальского рифта землетрясений 2020-2021 г. в данных режимных наблюдений магнитотеллурического поля Земли // Физика Земли. 2022. № 4. С. 46–55. <https://DOI:10.31857/S0002333722040093>

Семинский К.Ж., Борняков С.А., Добрынина А.А., Радзиминович Н.А., Рассказов С.В., Саньков В.А., Миалле П., Бобров А.А., Ильясова А.М., Салко Д.В., Саньков А.В., Семинский А.К., Чебыкин Е.П., Шагун А.Н., Герман В.И., Тубанов Ц.А., Улзибат М., 2020. Быстринское землетрясение в Южном Прибайкалье (21.09.2020г., Mw=5.4): основные параметры, признаки подготовки и сопровождающие эффекты // Геология и геофизика. 2021. Т. 62, № 5. С. 727–743.



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

Соболев Г.А., Гохберг М.Б. и др. Электромагнитные предвестники землетрясений. М.: Наука. 1982.

Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M.R. Investigation of VLF and HF waves showing seismo-ionospheric anomalies induced by the 29 September 2009 Samoa earthquake (Mw=8.1). *Natural Hazards and Earth System Science*. 2010. Vol. 10, No. 5. P. 1061–1067. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-1061-2010>.

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

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

Bortnik J., Bleier T.E., Dunson C., Freund F. Estimating the seismotelluric current required for observable electromagnetic ground signals // *Annales Geophys.* 2010. Vol. 28, No. 8. P. 1615–1624. <https://doi.org/10.5194/angeo-28-1615-2010>

Dovbnaya B.V., Zotov O.D., Mostryukov A.O., Shchepetnov R.V. Electromagnetic signals close in time to earthquakes // *Izv., Phys. Solid Earth*. 2006. Vol. 42, No. 8. P. 684–689. DOI: 10.1134/S1069351306080052

Dovbnaya B.V. Electromagnetic precursors of earthquakes and their recurrence // *Geophysical J.* 2014a. Vol. 36, No. 3. P. 160–165. DOI: 10.24028/gzh.02033100.v36i3.2014.116069.

Dovbnaya B.V., Potapov A.S., Guglielmi A.V., Rakhmatulin R.A. On the impact of MHD resonators on the geomagnetic pulsations // *Geophysical J.* 2014b. Vol. 36, No. 6. P. 143–152. DOI: 10.24028/gzh.0203-3100.v36i6.2014.111053

Dovbnaya B.V., Pashinin A.Yu., Rakhmatulin R.A. Short-term electromagnetic precursors of earthquakes // *Geodynamics & Tectonophysics*.

2019. Vol. 10, No. 3. P. 731–740. DOI: 10.5800/GT-2019-10-3-0438.

Freund F. Charge generation and propagation in rocks // *J. Geodynamics*. 2002. Vol. 33. P. 545–572.

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

Li H., Gu J., Hanif A., Dhanasekar A., Carlson K. Quantitative decision making for a groundwater monitoring and subsurface contamination early warning network // *Science of the Total Environment*. 2019. Vol. 683. P. 498–507. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.121>

Li H.S., Son J.-H., Hanif A., Gu J.L., Dhanasekar A., Carlson K. Colorado Water Watch: Real-Time Groundwater Monitoring for Possible Contamination from Oil and Gas Activities // *Journal of Water Resource and Protection*. 2017. Vol. 9. P. 1660–1687. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2017.913104>

Ohta K., Umeda K., Watanabe N., Hayakawa M. ULF/ELF emissions observed in Japan possibly associated with the Chi-Chi earthquake in Taiwan // *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 2001. Vol. 1, No. 1. P. 37–42.

Petraki E., Nikolopoulos D., Nomicos C., Statham J., Cantzos D., Yannakopoulos P., Kottou S. Electromagnetic pre-earthquake precursors: Mechanisms, data and models-A review // *Journal of Earth Science & Climatic Change*. 2015. Vol. 6, No. 1. P. 250. doi:10.4172/2157-7617.1000250

Rasskazov S., Chuvashova I., Yasnygina T., Saranina E., Gerasimov N., Ailow Y., Sun Y.-M. Tectonic generation of pseudotachylytes and volcanic rocks: Deep-seated magma sources of crust-mantle transition in the Baikal Rift System, Southern Siberia // *Minerals*. 2021. V. 11, No. 5. P. 487.

## References

Goldin S.V., Dyadkov P.G., Seleznev V.S., Sherman S.I. Some research results in connection with the medium-term forecast of earthquakes at the South Baikal geodynamic site // *Problems of seismology of the 3rd millennium: Materials of the international. geophysics conf.* Novosibirsk: Publishing house SB RAS, 2003. pp. 11–31.

Golovkov V.P. (ed.) *Electrical and magnetic precursors of earthquakes*. Tashkent: publishing house of the FAN of the Uzbek SSR, 1983. 135 p.

Moroz Yu.F., Moroz T.A. Anomalies of the electric field and electrical conductivity of the earth's

crust in connection with the Kultuk earthquake on Lake. Baikal // Physics of the Earth. 2012. No. 5. pp. 64–64.

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

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

Seminsky I.K., Pospeev A.V. Reflection of large earthquakes for the Baikal rift of 2020-2021 in the data of regime observations of the Earth's magnetotelluric field // Physics of the Earth. 2022. No. 4. pp. 46–55. <https://DOI:10.31857/S0002333722040093>

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

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

Sobolev G.A., Gokhberg M.B. and others. Electromagnetic precursors of earthquakes. M.: Science. 1982.

Vettegren V.I., Bashkarev A.Ya., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P. Fractoluminescence of crystalline quartz upon impact // Solid State Physics. 2008. Vol. 50, Issue. 1. P. 29–31.

Vettegren V.I., Kuksenko V.S., Mamalimov R.I., Shcherbakov I.P. Dynamics of fractoluminescence, electromagnetic and acoustic emission upon impact on a granite surface // Physics of the Earth. 2012. No. 5. P. 58–63.

Volarovich M.P., Parkhomenko E.I. Piezoelectric effect of rocks // Dokl. Academy of Sciences of the USSR. Geophysics. 1954. Vol. XCIX. No. 2. P. 239–242.

Volarovich M.P., Sobolev G.A. Use of the piezoelectric effect of rocks for underground exploration of piezoelectric bodies // Dokl. Academy of Sciences of the USSR. 1965. Vol. 162, No. 3. P. 556–558.

Volarovich M.P., Sobolev G.A. Piezoelectric method for geophysical exploration of quartz and pegmatite veins. M.: Nauka, 1969. 132 p.

**Рассказов Сергей Васильевич,**

доктор геолого-минералогических наук, профессор,  
664025 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,  
Иркутский государственный университет, геологический факультет,  
заведующий кафедрой динамической геологии,  
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
заведующий лабораторией изотопии и геохронологии,  
тел.: (3952) 51–16–59,  
email: rassk@crust.irk.ru.

**Rasskazov Sergei Vasilievich,**

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

**Асламов Илья Александрович,**

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник,  
664033 Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3,  
Лимнологический институт СО РАН,  
email: ilya\_aslamov@bk.ru.

**Aslamov Ilya Aleksandrovich,**

*Candidate of physical and mathematical sciences, Senior Researcher,  
664033 Irkutsk, st. Ulan-Batorskaya, 3,  
Limnological Institute SB RAS,  
email: ilya\_aslamov@bk.ru.*

**Снопков Сергей Викторович,**

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

**Snopkov Sergey Viktorovich,**

*Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, assistant professor,  
664025 Irkutsk, Lenin st., 3,  
Irkutsk State University, Faculty of Geology,  
664074, Irkutsk, st. Kurchatova, 3,  
Irkutsk National Research Technical University, Siberian School of Geosciences, Leading Researcher,  
email: snopkov\_serg@mail.ru.*

**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.*

**Ильасова Айгуль Маратовна,**

*кандидат геолого-минералогических наук, ведущий инженер,  
664033 Иркутск, ул. Лермонтова, д. 128,  
Институт земной коры СО РАН,  
email: ila@crust.irk.ru.*

**Ilyasova Aigul Maratovna,**

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

**Чебыкин Евгений Павлович,**

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

**Chebykin Evgeny Pavlovich,**

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

---