

Хубсугульское землетрясение 12 января 2021 г. и афтершоки: электрохимические отклики подземных вод юго-западного побережья Байкала

С.В. Снопков^{1,2}, А.А. Куроленко¹

¹Иркутский государственный университет, г. Иркутск, Россия

²Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

Аннотация. 12 января 2021 года произошло сильное землетрясение, эпицентр которого находился в акватории озера Хубсугул (МНР). Особенностью Хубсугульского землетрясения стала продолжительная афтершоковая активность. В период сейсмической активизации в районе Хубсугула проводились детальные измерения электрохимических параметров подземных вод на юго-западном побережье Байкала. Статистический анализ сейсмической активности и изменения электрохимических параметров воды выявил взаимосвязь этих процессов.

Ключевые слова: землетрясение, озеро Хубсугул, озеро Байкал, электрохимический мониторинг, статистический анализ.

The Khubsugul earthquake of January 12, 2021 and its aftershocks: electrochemical responses of groundwaters from southwestern coast of Lake Baikal

S.V. Snopkov^{1,2}, A.A. Kurolenko¹

¹Irkutsk State University, Irkutsk, Russia

²Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. On January 12, 2021, a strong earthquake occurred, the epicenter of which was located in the water area of Lake Khubsugul (Mongolian People's Republic). A feature of the Khubsugul earthquake was the prolonged aftershock activity. The period of seismic reactivation in the Khubsugul area coincided with detailed measurements of electrochemical parameters of groundwaters at the southwestern coast of Lake Baikal. Statistical analysis of seismic activity and changes in the measured groundwater parameters revealed connection between these processes.

Keywords: earthquake, Lake Khubsugul, Lake Baikal, electrochemical monitoring, statistical analysis.

Введение

Сильное Хубсугульское землетрясение, произошедшее 12 января 2021 г., характеризовалось продолжительной афтершоковой активностью. Авторами проведен анализ влияния этой сейсмической активности в районе озера Хубсугул на электрохимические параметры (окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) и pH подземных вод юго-западного побережья Байкала.

Характеристика сейсмической активности

Эпицентр сильного Хубсугульского землетрясения находился в акватории озера Хубсугул (МНР). Землетрясение стало одним из сильнейших сейсмических событий последних десятилетий, и имело магнитуду 16.8 и энергетический класс – 15.7. Интенсивность сотрясений достигала 6 баллов по шкале МСК-64 и ощущалось на территории Иркутской области и республики Бурятия. Почувствовали землетрясение и жители

Красноярского края. Очаг землетрясения располагался на глубине 10 км.

Серия подземных толчков в Монголии, была спровоцирована Быстринским землетрясением, произошедшем в сентябре 2020 года. В результате Быстринского землетрясения активизировался район Центрального Байкала, а затем и район Хубсугула. (Чебыкин и др., 2021).

Особенностью Хубсугульского землетрясения стала продолжительная афтершоковая активность. Количество афтершоков (классом >9) за 80 суток после землетрясения превысило 250. Афтершоковая активность проявилась не только в числе событий, но и в их энергии. Суммарная энергия всех афтершоков составила 15.6 % от энергии главного события. Наибольшее количество афтершоков произошло в первую неделю после основного сейсмического события. За сутки фиксировалось от 9 до 99 афтершоков, достигающих $K = 13.7$, далее в течении 24 дней происходило до 6 событий в сутки (K до 11.5), затем афтершоковый процесс заметно ослабел – не более 2 событий в сутки (K около 10). Исключение составляют произошедшие в этот период два события (K 12.6 и 14.8). Суммарная энергия всех сейсмических событий, произошедших за сутки, в течении месяца оставалась высокой (до 10000 гДж), а

затем резко уменьшилась на 2–3 порядка. Афтершоковая активность Хубсугульского землетрясения проявилась не только в числе событий, но и в энергии. 8 афтершоков имели класс от 12 до 14.8. (Куруленко, Снопков, 2021) (рис. 1).

По данным Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (<http://seis-bykl.ru>) такая продолжительная афтершоковая активность происходит редко. Например, после Култукского землетрясения (27 августа 2008 г., $M=6.3$) произошло 8 афтершоков (максимальный класс – 13); после Мондинского землетрясения (5 апреля 1950 г., $M=7$) было зарегистрировано 12 убывающих по силе афтершоков. Продолжительная афтершоковая активность наблюдалась после Среднебайкальского землетрясения (29 августа 1959 г., $M=6.8$). Эпицентр основного события находился в акватории озера Байкал. В течение 7 часов после землетрясения было зарегистрировано 104 повторных толчка, общее же число афтершоков за три последующих месяца превысило 700, а до мая 1960 года было зарегистрировано более 1200 толчков. Общая площадь, охваченная сотрясениями, составила около 700 тысяч кв. км.

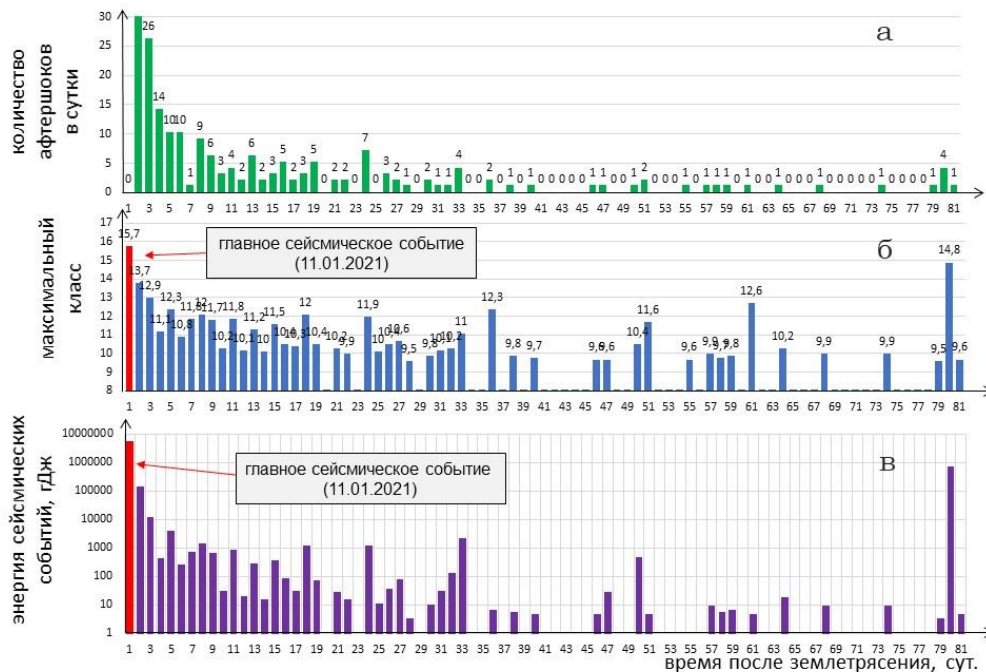


Рис. 1. Сейсмические события на оз. Хубсугул в январе – апреле 2021 г. По абсциссе указаны дни, прошедшие после землетрясения; а – количество афтершоков за сутки; б – максимальный сейсмический класс события за сутки; в – суммарная энергия событий за сутки.

Fig. 1. Seismic events on Lake Khubsugul in January – April, 2021. The abscissa axis indicates days that have passed since the earthquake; *a* is the number of aftershocks per day; *b* is the maximum seismic class of the event per day; *v* is the total energy of events per day.

Методика

Электрохимические измерения подземных вод проводятся при отборе проб гидрогеохимического мониторинга на Култукском полигоне, который находится в зоне сочленения Главного Саянского разлома с Обручевским и Юго-Западным бортовым разломами, ограничивающими западную часть Южно-Байкальской впадины (Чебыкин и др., 2021) Култукский полигон, включающий более 20 станций (водоисточников), начал действовать в 2012 г. Пробы воды отбираются через 3–7 дней. Электрохимические параметры подземных вод – окислительно-восстановительный потенциал (ОВП), водородный показатель (рН), общая минерализация (TDS), а также температура

(*t*) – измеряются портативными приборами «Нанна» и «Эксперт».

Результаты

На ст. 190 Култукского полигона, в колодце глубиной 8 м, расположенном в 150 м от берега Байкала, с 19 декабря 2020 г. по февраль 2021 г. была проведена серия ежедневных измерений ОВП, рН, TDS и *t* воды для оценки степени их изменчивости. По счастливому стечению обстоятельств, период проведения детальных исследований совпал по времени с Хубсугульским землетрясением и его наиболее сильными афтершоками, что позволило детально проанализировать характер взаимосвязи сейсмических событий и изменения электрохимических параметров воды (рис. 2).

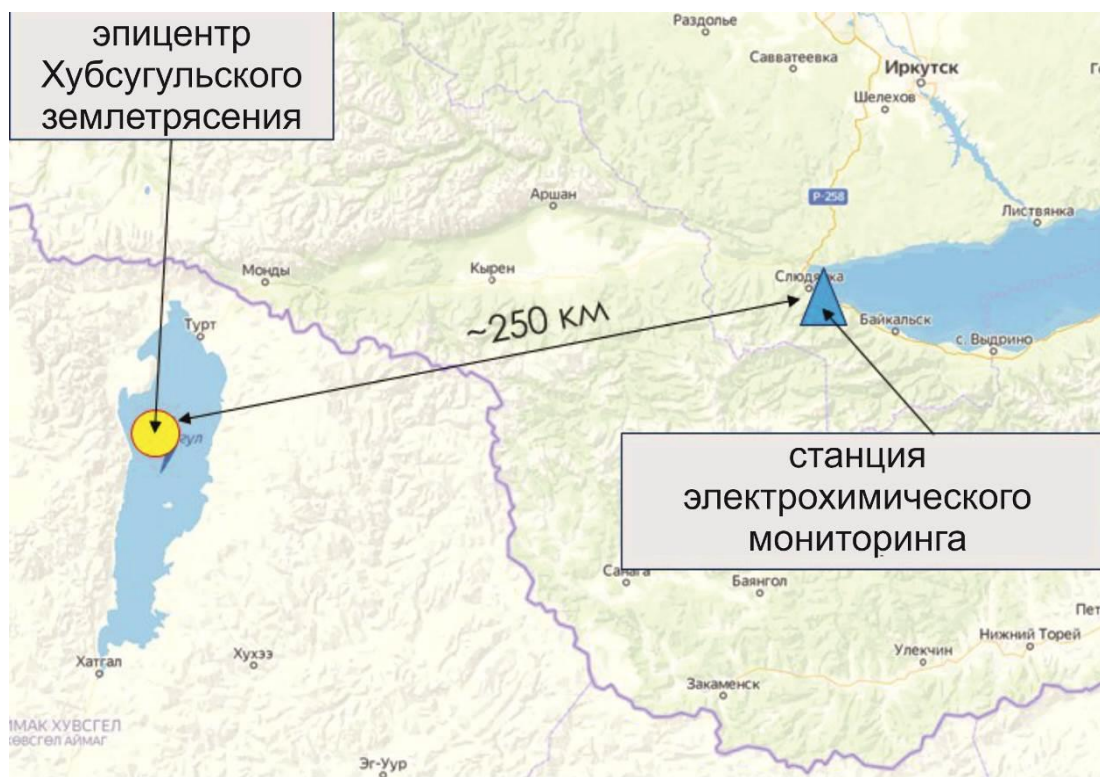


Рис. 2. Схема расположения ст. 190 Култукского полигона относительно эпицентра Хубсугульского землетрясения.

Fig. 2. Scheme of the location of station 190 of the Kultuk polygon relative to the epicenter of the strong Khubsugul earthquake.

Результаты измерений показаны на рис. 3. Изменения электрохимических параметров показаны в сравнении с высвобождающейся

энергией сейсмических событий в районе оз. Хубсугул. Суточная энергия сейсмических событий была рассчитана по данным, взя-

тым с сайта Байкальского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (<http://seis-bykl.ru>).

Используя данные мониторинга параметров ОВП и рН, а также E (десятичный логарифм суточной сейсмической энергии) были выполнены расчеты линейных коэффициентов корреляции (R_{xy}) анализируемых параметров. Расчет статистик выполнялись в программе Excel MS Office.

Коэффициент корреляции ОВП и рН составил 0.36, что свидетельствует о значимой прямой взаимосвязи параметров. Для данной выборки 95 %-ный уровень достоверности корреляционной связи составляет 0.25; 99 %-ный – 0.325. Коэффициент корреляции для E и ОВП, E и рН составил, соответственно, -0.3 и -0.48 . Значимая обратная зависимость параметров указывает на то, что чем выше энергия сейсмических событий, тем сильнее снижались значения ОВП и рН воды.

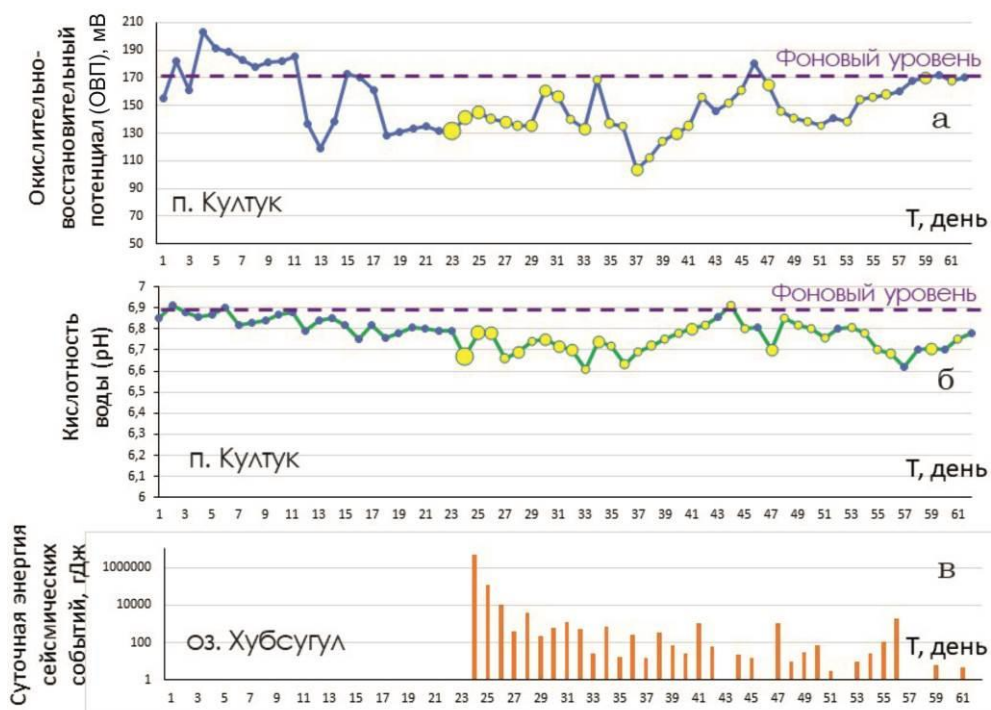


Рис. 3. Графики значений окислительно-восстановительного потенциала (а) и рН (б) воды ст. 190, а также высвободившейся за сутки сейсмической энергии (в). По абсциссе показаны дни с 19 декабря 2020 г. Штриховой фиолетовой линией отмечен фоновый уровень параметров по результатам двух-летних наблюдений; желтыми маркерами выделены сейсмические события $K > 10$ (размер маркера пропорционален классу события).

Fig. 3. Graphs of the redox potential (a) and pH (b) of water from station 190, as well as seismic energy released during the day (c). The abscissa shows days since December 19, 2020. The dashed purple line marks the background level of parameters based on results of two-year observations; seismic events $K > 10$ are designated by yellow markers (marker size is proportional to the event class).

Учитывая то, что изменения электрохимических параметров могли происходить не одновременно с сейсмическими событиями, а либо запаздывать, либо, наоборот, предшествовать им, был проведен расчет коэффициентов корреляции параметров при смещении анализируемых параметров во времени относительно друг друга в одну и другую

сторону с шагом 1 день. Методика расчета показана на рисунке 4.

По результатам указанных статистических расчетов были построены графики изменения R_{xy} для пар ОВП– E и рН– E (рис. 5) Характер изменения коэффициентов корреляции при смещении данных во времени показывает, что наиболее значимая корреляционная связь проявляется при смещении гра-

фиков на несколько дней. Причем окислительно-восстановительный потенциал и водородный показатель по-разному реагируют на повышение энергии сейсмических событий: если понижение ОВП предшествует

сейсмическому событию, опережая его на 3–4 дня ($R_{xy} = -0.44$), то pH, наоборот, достигает минимальных значений в тот же день или через 1–3 дня после него ($R_{xy} = -0.44$).

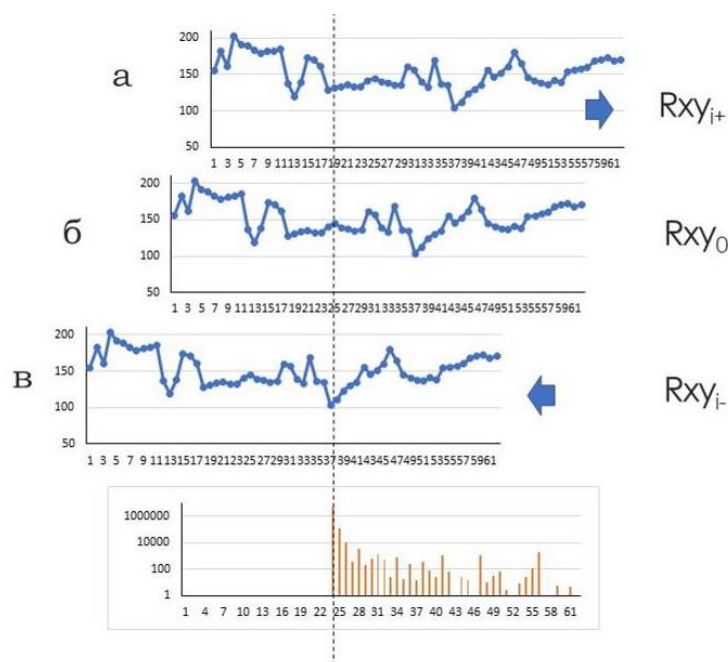


Рис. 4. Методика расчета R_{xy} при проверке гипотезы о возможном предшествовании одних событий другим: а – смещение графика электрохимического параметра в случае предположения о его предшествовании сейсмическому событию; б – без смещения графиков (случай одновременности событий); в – смещение графика электрохимического параметра в случае предположения о его появлении в результате сейсмического события.

Fig. 4. Method for calculating R_{xy} when testing the hypothesis about the possible precedence of some events by others: а – shift of the graph of the electrochemical parameter in case when it precedes a seismic event; б – without graph shift (case of simultaneous events); в – shift of the graph of the electrochemical parameter in the case of its appearance as a result of a seismic event.

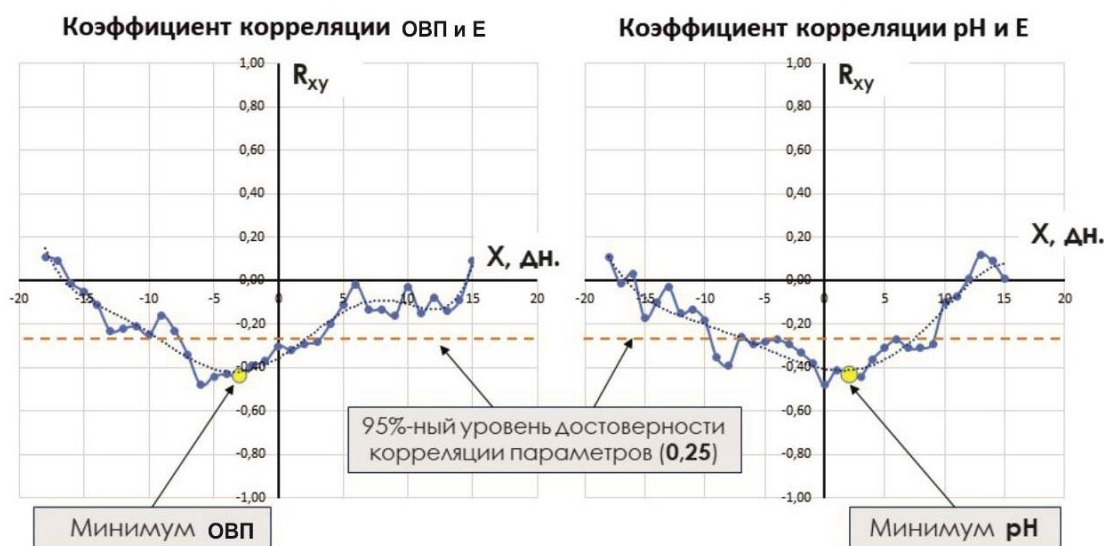


Рис. 5. Изменение коэффициентов корреляции при смещении графиков анализируемых параметров друг относительно друга.

Fig. 5. Change in correlation coefficients when the graphs of the analyzed parameters are shifted relative to each other.

Эти особенности корреляции параметров можно увидеть при визуальном анализе графиков на рис. 6.

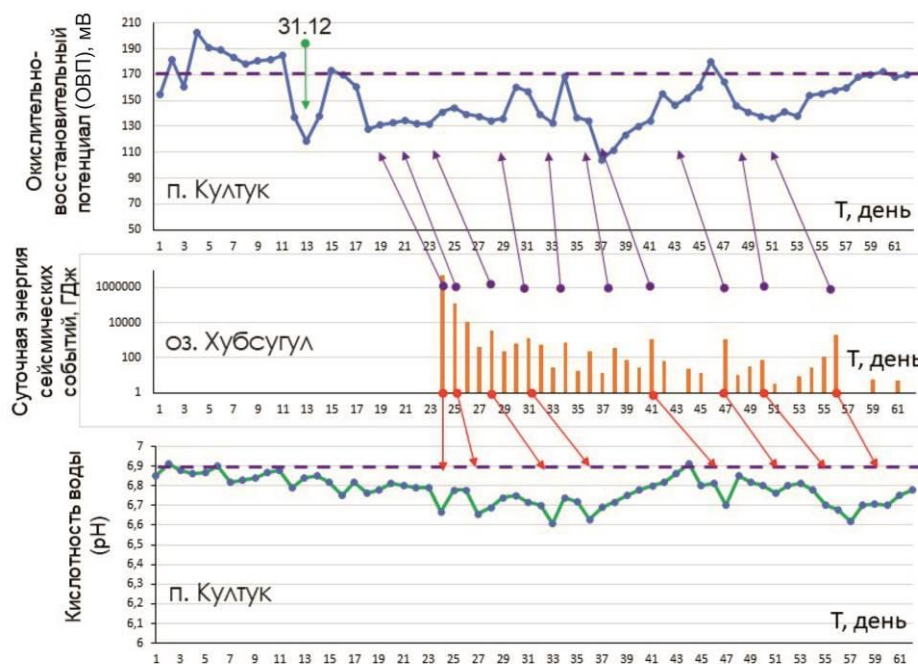


Рис. 6. Взаимосвязь электрохимических свойств воды и энергии сейсмических событий. Фиолетовыми стрелками показано как понижение уровня ОВП предшествует сейсмическим событиям, а уменьшение pH – проявляется как их последствия (красные стрелки). Зеленая стрелка показывает аномалию ОВП, предположительно, связанную с землетрясением, произошедшим 29.12.2020 г. в районе Верхней Ангары ($K=12.9$).

Fig. 6. Relationship between electrochemical properties of water and energy of seismic events. Purple arrows show how a decrease in the ORP level precedes seismic events, and a decrease in pH manifests itself as their consequences (red arrows). The green arrow shows the ORP anomaly, presumably related to the earthquake that occurred on December 29, 2020 in the Upper Angara region ($K=12.9$).

Большинству эпизодов высвобождения сейсмической энергии ($K \geq 12$) предшествует понижение ОВП (за 3–5 дней до события), причем, чем выше высвобождающая энергия, тем раньше начинается снижаться уровень окислительно-восстановительного потенциала. Отрицательные аномалии водородного показателя появляются, в среднем, через 2-3 дня после события. При этом наблюдается обратный эффект: чем сильнее событие, тем быстрее оно находит свое отражение в изменении pH.

Окислительно-восстановительный потенциал зависит от соотношения окислительных и восстановительных компонентов, растворенных в воде (Крайнов и др., 2012). Вариации уровня ОВП в качестве опережающей экспресс-информации используются при анализе обстановки проявления сильных землетрясений (Чебыкин и др., 2021).

На рис. 7 показаны зависимости времени появления и амплитуды аномалий ОВП и pH от среднесуточной выделяемой сейсмической энергии.

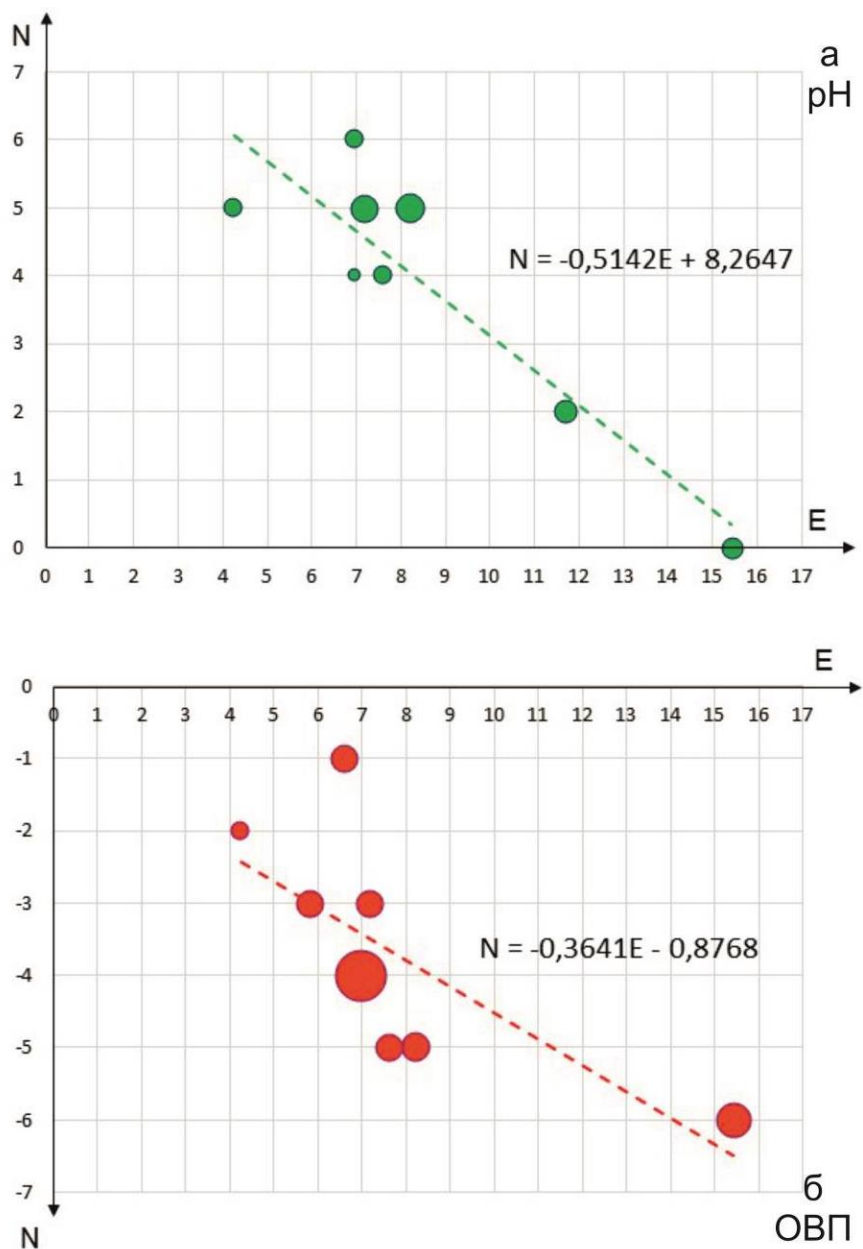


Рис. 7. Диаграммы изменения времени появления (N) аномалий рН (а) и ОВП (б) от среднесуточной выделяемой сейсмической энергии (E). Размер маркеров пропорционален величине аномалии параметров. Штриховой линией показан линейный тренд, описанный приведенными уравнениями.

Fig. 7. Diagrams of changes in time of occurrence (N) of (a) pH and ORP (б) anomalies versus the average daily released seismic energy (E). The size of the markers is proportional to the magnitude of the parameter anomaly. The dashed line shows a linear trend described by the indicated equations.

Коэффициент корреляции параметров N и E составляет $-0,72$ и $-0,91$ соответственно для ОВП и рН. При этом, взаимосвязь среднесуточной энергии и модуля амплитуды аномалии ОВП и рН прослеживается слабо: R_{xy} составляет $-0,26$ и $-0,27$, соответственно для ОВП и рН. Для данной выборки 95 %-ный уровень достоверности корреляционной связи составляет $0,63$.

Заключение

Проведенный статистический анализ данных электрохимического мониторинга показал, что серия сейсмических событий, произошедших на оз. Хубсугул в начале 2021 года, проявилась в снижении значений ОВП и рН подземных вод юго-западного побере-

жья Байкала (на расстоянии более 200 км). Понижение ОВП предшествовало сейсмическим событиям, а уменьшение рН проявлялось как последствие сейсмических толчков. Было замечено, что, чем сильнее было сейсмическое событие, тем раньше возникала аномалия ОВП и быстрее повышалась кислотность воды после землетрясения.

Безусловно, на изменение электрохимических параметров подземных вод оказывает влияние большое число факторов и землетрясение лишь один из них. Из-за неоднозначности причин откликов электрохимических параметров на сейсмические события, они не могут использоваться как прямые сейсмопрогностические признаки. Однако, обнаруженные статистические зависимости, по мнению авторов, представляют интерес. Необходимо продолжить изучение влияния сейсмической активности на электрохимические параметры подземных вод.

Литература

Куроленко А.А., Снопков С.В. Хубсугульское землетрясение 2021 года. // Вестник Иркутского университета. Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. Вып. 24. С. 48–50.

Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. Издание второе, дополненное. М.: ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. 672 с.

Чебыкин Е.П., Ильясова А.М., Рассказов С.В., Чувашова И.С., Борняков С.А., Снопков С.В. Култукское сочленение активных разломов Южно-Байкальской впадины и Главного Саянского разлома: чувствительный полигон гидрогеохимического мониторинга подготовки сильного землетрясения // Разломообразование в литосфере и сопутствующие процессы: тектонофизический анализ: тезисы докладов Всероссийского

совещания, посвященного памяти профессора С. И. Шермана. Иркутск, 26–30 апреля 2021 г. Иркутск: Издательство ИГУ, 2021. С. 225–226.

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.

References

Kurolenko A.A., Snopkov S.V. Khubsugul earthquake in 2021 // Bulletin of the Irkutsk State University. Irkutsk: ISU Publishing House, 2021. Issue 24. P. 48–50. (in Russian)

Krainov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. Geochemistry of groundwaters. Theoretical, applied and ecological aspects. Second edition, extended. M.: TsentrLitNefteGaz, 2012. 672 p. (in Russian)

Chebykin E.P., Ilyasova A.M., Rasskazov S.V., Chuvashova I.S., Bornyakov S.A., Snopkov S.V. Kultuk junction of active faults of the South Baikal depression and the Main Sayan fault: a sensitive polygon for hydrogeochemical monitoring of the preparation of a strong earthquake // Faulting in the lithosphere and related processes: tectonophysical analysis: abstracts of reports of the All-Russian meeting dedicated to the memory of Professor S.I. Sherman. Irkutsk, April 26–30, 2021. Irkutsk: IGU Publishing House, 2021. P. 225–226. (in Russian)

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

Snopkov Sergey Viktorovich,

Candidate of Geological and Mineralogical Sciences,
664003 Irkutsk, Lenin, str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Assistant Professor,
664074, Irkutsk, Kurchatov str., 3,
Siberian School of Geosciences, Irkutsk National
Research Technical University,
Leading Researcher,
email: snopkov_serg@mail.ru.

Снопков Сергей Викторович,

кандидат геолого-минералогических наук, доцент,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный университет, геологический факультет, доцент,
664074, г. Иркутск, ул. Курчатова, 3, Сибирская школа геонаук, Иркутский национальный исследовательский технический университет, ведущий научный сотрудник,
email: snopkov_serg@mail.ru.

*Куроленко Анатолий Александрович,
664003 Иркутск, ул. Ленина, д. 3,
Иркутский государственный универси-
тет, геологический факультет,
студент 4 курса.*

*Kurolenko Anatoliy Alexandrovich,
664003 Irkutsk, Lenin str., 3,
Irkutsk State University, Faculty of Geology,
Student of the 4-th course.*
