

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Научная статья

УДК 556

doi: 10.17223/25421379/35/1

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВОВ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОДЗЕМНЫХ ВОД (ГОРНЫЙ АЛТАЙ)

Сергей Сергеевич Драчев¹, Валентина Елизаровна Кац², Александр Викторович Шитов³,
Екатерина Матвеевна Дутова⁴, Виталий Дмитриевич Покровский⁵



^{1,4} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

² АО «Геологическое предприятие «Алтай-Гео», с. Майма, Россия

³ Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия

^{4,5} Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

¹ oldwolf07@yandex.ru

² altai.geo@yandex.ru

³ sav103@yandex.ru

⁴ dutova@tpu.ru

⁵ pokrovskiy.v@gmail.com

Аннотация. Рассмотрено влияние сейсмических событий на температуру подземных вод на примере участка недр с повышенной тензочувствительностью (наблюдательная скважина на пункте ГОНС «Северная», ул. Северная, 16). Выполнен анализ обширного массива мониторинговых данных; выявлена корреляционная связь между суммарной сейсмической энергией, высвобожденной при землетрясениях и промышленных взрывах, и температурой подземных вод. Показано, что даже отдалённые землетрясения и техногенные сейсмические воздействия способны вызывать заметные изменения температуры подземных вод в рассматриваемой точке наблюдений.

Ключевые слова: Горный Алтай, подземные воды, температура, землетрясения, промышленные взрывы

Для цитирования: Драчев С.С., Кац В.Е., Шитов А.В., Дутова Е.М., Покровский В.Д. Анализ влияния землетрясений и промышленных взрывов на температуру подземных вод (Горный Алтай) // Геосферные исследования. 2025. № 2. С. 6–18. doi: 10.17223/25421379/35/1

Original article

doi: 10.17223/25421379/35/1

ANALYSIS OF THE IMPACT OF EARTHQUAKES AND INDUSTRIAL EXPLOSIONS ON GROUNDWATER TEMPERATURE (GORNÝ ALTAI)

Sergey S. Dravchev¹, Valentina E. Kats², Alexander V. Shitov³, Ekaterina M. Dutova⁴, Vitaliy D. Pokrovskiy⁵

^{1,4} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

² Open Joint-Stock Company "Geological Enterprise Altai-Geo", Mayma, Russia

³ Gorno-Altai State University, Gorno-Altai, Russia

^{4,5} National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

¹ oldwolf07@yandex.ru

² altai.geo@yandex.ru

³ sav103@yandex.ru

⁴ dutova@tpu.ru

⁵ pokrovskiy.v@gmail.com

Abstract. This study was prompted by the major Chuya earthquake, which altered the chemical composition of groundwater in many springs across the Altai Republic. Several springs within the city of Gorno-Altaysk exhibited a significant rise in groundwater temperature. At one of these springs, a long-term monitoring station was established to record groundwater quality. The paper assesses the impact of seismic events on groundwater temperature at a highly tensio-sensitive subsurface site (observation borehole at the State Reference Observation Network (SRON) station "Severnaya", 16 Severnaya St.), located within the mountain-fold structures of the Altai-Sayan orogenic region. An extensive monitoring dataset was analysed, revealing a correlation between the cumulative seismic energy released by earthquakes and industrial blasts and the temperature of the groundwater. The results demonstrate that even distant earthquakes and anthropogenic seismic impacts can induce noticeable temperature variations at the observation point. Possible mechanisms governing the influence of seismic events on groundwater temperature are discussed, including the periodically reversing correlation sign – from positive to negative – between spring temperature and the seismic

energy released. Seismic energy values were derived by recalculating event magnitudes using a refined Gutenberg–Richter relationship. The findings indicate a direct link between groundwater temperature at the SRON (State Reference Observation Network) "Severnaya" station and seismic events of both natural and technogenic origin within the region. The abrupt reversal of the correlation sign 50–60 days after an event is attributed to the migration of deep fluids followed by infiltration of relatively cold groundwater. The influence of industrial explosions on the spring's parameters, despite their considerably lower energy, is explained by induced seismicity manifested as an increase in the magnitude of recorded events. This work continues a series of investigations aimed at identifying hydrogeological and hydrogeochemical precursors of hazardous geodynamic events, a task made urgent by the very low predictive accuracy of current earthquake-forecasting methods.

Keywords: Gorny Altai, groundwater, temperature, earthquakes, industrial explosions

For citation: Drachev S.S., Kats V.E., Shitov A.V., Dutova E.M., Pokrovskiy V.D. (2025) Analysis of the impact of earthquakes and industrial explosions on groundwater temperature (Gorny Altai). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 2. pp. 6–18. doi: 10.17223/25421379/35/1

Введение

Изучение состава и режима подземных вод неразрывно связано с факторами, оказывающими на них влияние, одним из них выступают процессы, сопровождающиеся сейсмическими событиями. При этом необходимо иметь в виду, что массивы горных пород разделены сетью разломов и имеют различные физические свойства, а также насыщены различными флюидами. По разломной сети, в результате напряженного состояния блоков, осуществляется транспортировка флюидов, как из глубин к поверхности, так из соседних регионов, что в свою очередь сказывается на изменении химического состава грунтовых вод [Уткин, Юрков, 1997; Claesson, Skelton at al., 2007; Киссин, 2009; Skelton, Andren at al., 2014; Копылова, Болдина, 2019; Вартанян, 2024].

Данная работа продолжает выполненные ранее нами исследования по поиску гидрогеологических, гидрогеохимических предвестников землетрясений [Кац и др., 2010; Шитов, Кац и др., 2016; Дутова и др., 2020, 2022, 2023], однозначно указывающих на влияние сейсмических событий на гидродинамический режим и качественный состав подземных вод, как регионального, так и локального характера.

Целью этой работы является изучение влияния землетрясений в Алтае-Саянской горной области и промышленных взрывов, производимых на горных выработках Кемеровской области, на температурные характеристики подземных вод Республики Алтай.

Характеристика объекта и методика исследований

Территория Республики Алтай входит в состав Алтае-Саянской горной области. Большую часть ее территории (85 %) занимают горно-складчатые сооружения с массивами трещинных вод. Существенно меньшую часть (15 %) занимают артезианские бассейны (Чуйский, Уймонский, Бертекский, Курайский и Джулукульский). В условиях гидрогеологических массивов подземные воды приурочены к трещинным, трещинно-жильным, трещинно-карстовым и карсто-

вым коллекторам в осадочных, вулканогенных, метаморфических и интрузивных породах широкого возрастного диапазона – от мезозойского до протерозойского. В условиях чехла артезианских бассейнов подземные воды сосредоточены в порово-пластовых коллекторах четвертичных, неогеновых и палеогеновых отложений. В зонах контактов массивов и бассейнов, в фундаменте артезианских бассейнов широкое распространение имеют воды зон тектонических нарушений, характеризующиеся глубокой циркуляцией их и часто контролирующийся родниковой разгрузкой [Дутова и др., 2020].

Мониторинг подземных вод на территории Республики Алтай осуществляется Территориальным центром «Алтайгеомониторинг», являющимся структурным подразделением ОАО «Геологическое предприятие АО «Алтай-Гео». Мониторинг ведется на объектном (локальном), территориальном и региональном уровнях. В результате наблюдений фиксируются гидродинамический (уровень, дебит), температурный режимы и качественный состав подземных вод. Замеры температуры воды в скважинах осуществлялись электронным термометром (Щуп) с точностью измерения 0,5 °С.

Государственный наблюдательный пункт мониторинга (ГОНС) «Северная», расположенный в г. Горно-Алтайске по улице Северной, 16, представляет собой наблюдательную скважину глубиной около 10 м. Данная скважина каптирует совместный водоносный комплекс четвертичных отложений и водоносную зону вендо-нижнекембрийских пород.

Выбор данной точки мониторинга обусловлен её высокой тензочувствительностью и выраженной реакцией на крупное Чуйское землетрясение 2003 г., которое привело к существенным изменениям химического состава и температуры подземных вод (до 40 °С) и в ряде соседних наблюдательных пунктов [Шитов и др., 2008; Кац и др., 2010].

Начиная с 2003 г., сотрудники ТЦ «Алтайгеомониторинг» проводят регулярные измерения температуры подземных вод на данном пункте мониторинга. Измерения осуществляются с периодичностью один

раз в 10 дней при помощи электронного термометра после предварительной прокачки воды механическим насосом, что позволяет обеспечить стабильность и репрезентативность результатов.

Вмещающие породы, вскрытые скважиной до глубины 10 м, – делювиальные отложения, сложенные щебнистыми отломками терригенно-карбонатных пород, залегающие на сланцах, известняках и кварцитах. По имеющимся геологическим разрезам водозаборных скважин в районе пункта ГОНС водоносная зона

устанавливается до глубины 50 м. По геофизическим данным есть вероятность наличия ниже 50 м гранитоидного массива по типу Белокурихинского. На рис. 1 приведена схема разломных зон в регионе исследования, которые предположительно являются путями миграции глубинных флюидов, активно влияющих на гидрогеологические условия в пункте мониторинга «Северная». Схема помогает понять структурно-тектонические особенности региона и их связь с наблюдаемыми изменениями температуры подземных вод.

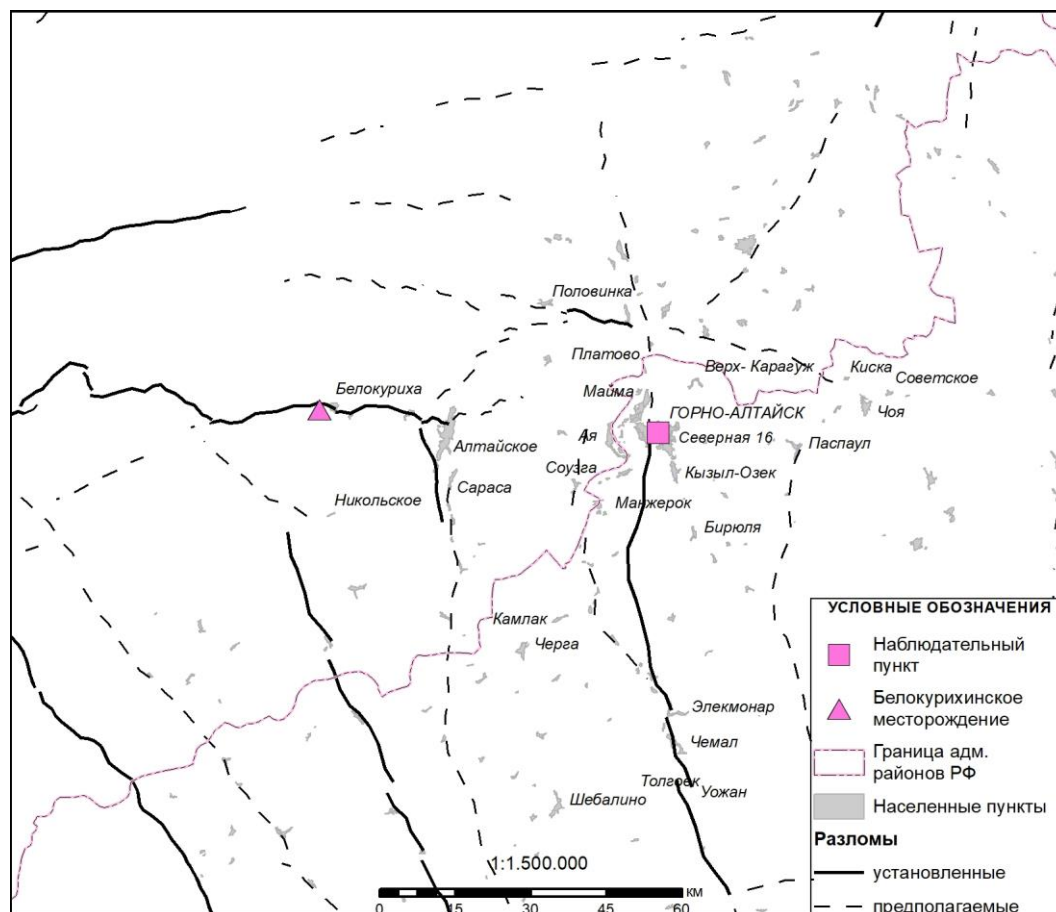


Рис. 1. Схема размещения объекта исследований и расположение разломных зон региона [Zelenin et al., 2022]

Fig. 1. Layout of the research site and the location of fault zones in the region [Zelenin et al., 2022]

Белокурихинское месторождение минеральных вод приурочено к зоне сопряжения отрогов Ануйского хребта Горного Алтая и Предалтайской равнины, вмещающими породами являются гранитоиды Белокурихинского массива. Подземные воды месторождения классифицируются как пресные (минерализация менее 1 г/дм³), сульфатно-гидрокарбонатные натриевые с щелочной реакцией водной среды (pH 9,5), термальные, теплые (температура 35–42 °C), слаборадоновые (5,0–8,1 нКи/дм³), кремнистые

(H₂SiO₃ – 62–74 мг/дм³), фторсодержащие (16–17 мг/дм³), сульфатно-гидрокарбонатные натриевые с щелочной реакцией водной среды (pH 9,5).

В результате крупного Чуйского землетрясения изменился химический состав подземных вод как в целом по Республике Алтай, так и локально, и значимо на отдельных участках. Такие участки, как правило, приурочены к зонам тектонических нарушений. Одним из таких участков оказалась наблюдательная скважина по ул. Северной.

В изучаемом пункте мониторинга состояния вод устанавливаются существенные колебания химического состава и температуры вод. Еще в начале мониторинга (в 2004 г.) было констатируемо увеличение концентрации сульфатов с 8,5 мг/дм³ (фон, усредненное значение) до максимального значения 86,4 мг/дм³ (08.09.2004), хлоридов с 4,9 до 25,5 мг/дм³. Повысилась концентрация растворенной в воде углекислоты до 84,48 мг/дм³ (25.07.2004). Содержание метакремниевой кислоты увеличилось до 25,7–54,9 мг/дм³ [Шитов и др., 2005]. По химическому составу воды в скважине гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные кальциево-натриевые пресные с минерализацией 0,2–0,8 г/л. За период наблюдений увеличилась минерализация воды, менялся ее класс: с гидрокарбонатно-кальциевого на гидрокарбонатно-натриевый.

Концентрация радона в водных пробах по данным радиологической лаборатории ЦСЭН по Республике Алтай составляли 27–41 Бк/дм³. Количество радона в атмосферном воздухе в подполе усадьбы по ул. Северной – 876 Бк/дм³, что более чем в 8 раз превышает нормы НРБ-96 по природным источникам [Аптикаева и др., 2016].

Следует отметить, что основной интерес к объекту вызвало повышение температуры воды за весьма короткий срок, практически сразу после афтершока

(февраль 2004 г.). За период проведенных нами исследований температура воды в скважине изменялась от 37,0 °С (11.06.2004) до 48 °С (01.10.2004). При этом наблюдалось скачкообразное изменение значений температуры с понижением до 37,0 °С (первый минимум) и еще два понижения с минимумами до 35,0 °С (август) и 34,0 °С (сентябрь). Причем температура воды изменялась в пределах 36–37 °С при фоновой температуре подземных вод 7–9 °С. На рис. 2 отображена динамика изменения температуры подземных вод на ГОНС «Северная» в начале мониторинга (2004 г.). На графике наглядно представлены резкие колебания температуры, связанные с реакцией подземных вод на Чуйское землетрясение, подтверждая высокую чувствительность данной скважины к сейсмическим событиям.

В районе расположения ГОНС «Северная» в разные годы функционировали многочисленные гидрогеологические скважины. Дебиты скважин варьировали от 1,3 до 20 л/с, статический уровень колебался от 1,1 до 12 м, а температура изменялась от 16 до 30 °С.

Температура почвы в закопушках на глубине 30–40 см составила 23–25 °С при температуре воздуха 7 °С (25.09.2004). Температура воздуха в подполе дома в зимний период равнялась 20 °С, несмотря на сильные морозы в феврале.

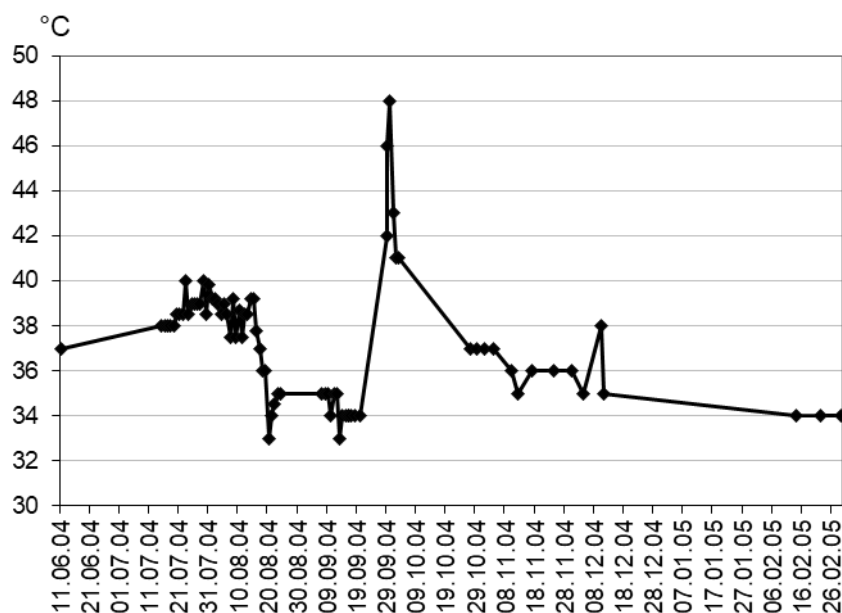


Рис. 2. Динамика изменения температуры на ГОНС «Северная» в начале мониторинга

Fig. 2. Temperature dynamics at the GONS Severnaya station at the beginning of the monitoring period

В период 14.01–24.03.2021 нами проводились краткосрочные ежесуточные исследования для выявления реагирования геохимических характеристик подземных вод на сейсмические события. Было установлено, что Хубсугульское землетрясение (2021 г.)

оказало влияние на геохимический состав вод ГОНС «Северная» (Горно-Алтайск), где в момент основного толчка отмечено резкое изменение измеряемых характеристик (температуры, pH, Eh) [Дутова и др., 2022]. Установленный факт влияния Хубсугульского

землетрясения на состояние подземных вод свидетельствует о том, что подземные воды данной точки мониторинга могут реагировать даже на землетрясения, удаленные на расстояния более 1000 км.

Как показали последующие исследования, химический состав вод в колонке за период наблюдений с 2004–2023 гг. весьма чутко реагирует на все малоамплитудные сейсмические события как в эпицентральной части Чуйского (2003 г.) землетрясения, так и на сейсмические события в Алтае-Саянском регионе (на сопредельных территориях). Воды скважины можно рассматривать в качестве индикатора сейсмических событий [Кац и др., 2010].

Для изучения влияния энергии землетрясений на характеристики подземных вод использовался пересчет магнитуды землетрясений в сейсмическую энергию, выраженную в эргах. Необходимо отметить, что известная формула Гутенберга – Рихтера [Gutenberg, Richter, 1956] в данном случае отличается от формулы (1) главным образом тем, что она была получена по записям сильных землетрясений ($M > 6$) на широкополосных приборах:

$$\log E = 1,5 \times M + 11,8. \quad (1)$$

В представленном виде соотношение уточнено по результатам обработки данных по 200 коровым землетрясениям с магнитудами $M > 6$, происходившими

на всем земном шаре, и по ряду более слабых ($4 < M < 6$) кавказских землетрясений [Садовский, 2004].

Результаты и обсуждение

Для оценки влияния землетрясений на температуру подземных вод в пункте мониторинга нами были использованы данные о сейсмических событиях и промышленных взрывах в Алтае-Саянской горной области, за период 2013–2023 гг. На рис. 3 показано местоположение ГОНС «Северная» относительно эпицентров землетрясений, произошедших за период 2013–2023 гг., что позволило оценить пространственное распределение сейсмической активности и её потенциальное влияние на пункт мониторинга.

Рис. 4 показывает местоположение ГОНС «Северная» относительно участков выполнения промышленных взрывов за 2013–2023 гг. [Алтае-Саянский..., 2025].

Для количественной оценки сейсмической энергии землетрясений использовался пересчет магнитуд в энергию в эргах по уточнённой формуле Гутенберга – Рихтера.

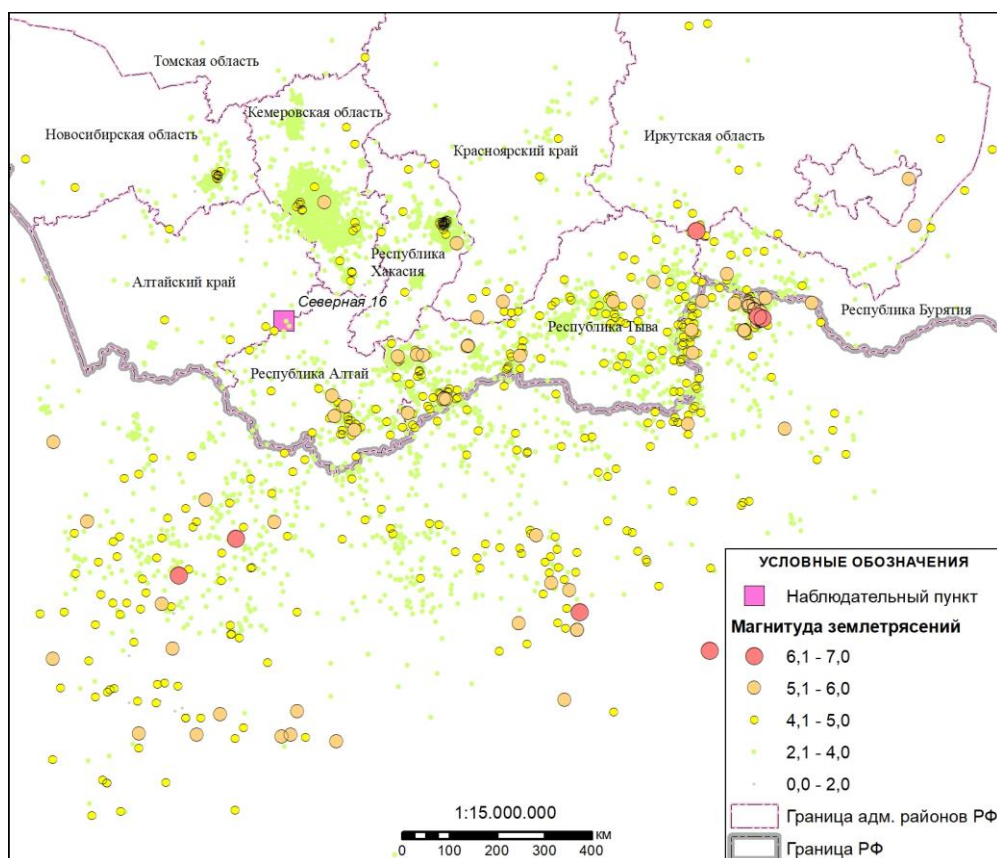


Рис. 3. Место расположения ГОНС «Северная» относительно эпицентров землетрясений за 2013–2023 гг. [Алтае-Саянский..., 2025]

Fig. 3. Location of the GONS Severnaya station relative to earthquake epicenters from 2013 to 2023 [Altai-Sayan..., 2025]

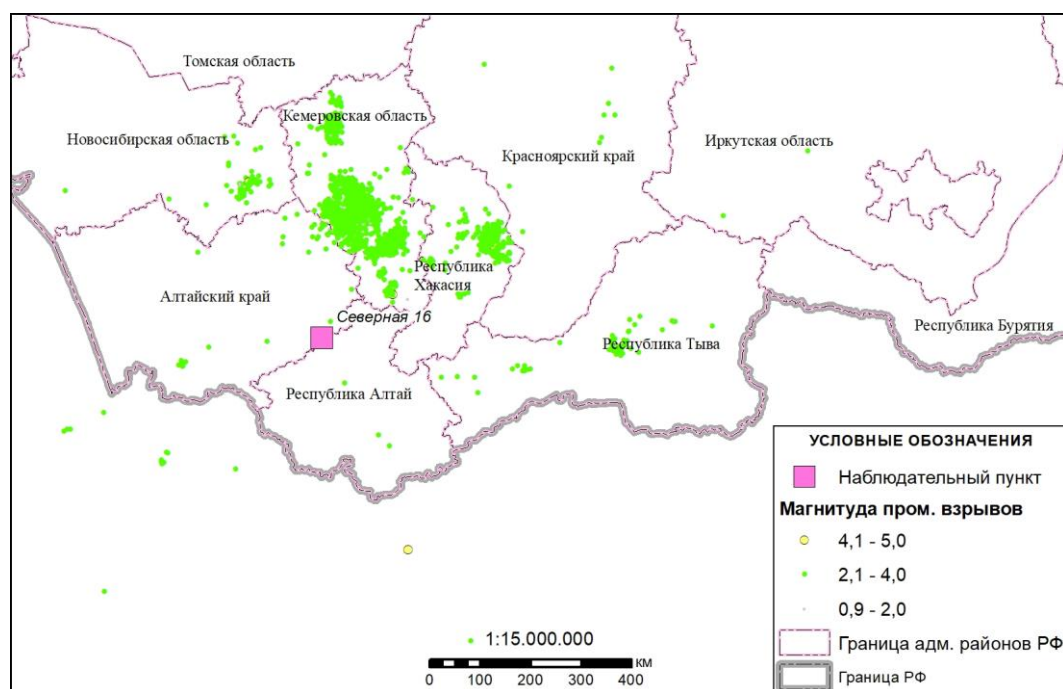


Рис. 4. Место расположения ГОНС «Северная» относительно участков выполнения промышленных взрывов за 2013–2023 гг. [Алтае-Саянский..., 2025]

Fig. 4. Location of the GONS Severnaya station relative to industrial blasting sites from 2013 to 2023 [Altai-Sayan..., 2025]

Для обеспечения единой временной привязки и сопоставимости данных сейсмическая энергия суммировалась в интервалы по 10 дней, что соответствует периоду измерения температуры на пункте мониторинга (5, 15 и 25-е числа каждого месяца). Таким образом, была получена совмещенная таблица температур и сейсмической энергии от землетрясений и взрывов в Алтае-Саянской горной области, представленная графически (см. рис. 5, 6). Результаты исследований, представленные на рисунках, иллюстрируют динамику температуры подземных вод и выделенной сейсмической энергии соответственно. Сопоставление этих графиков дает возможность наглядно проследить временные задержки и изменения корреляции между сейсмическими событиями и температурными реакциями подземных вод.

Помимо сейсмических событий в Алтае-Саянской горной области нами также учитывались взрывы, проводимые в результате горных работ в Кемеровской области. Данные о взрывах и их энергии получены по материалам Алтае-Саянского филиала Единой геофизической службы РАН (см. рис. 7) [Алтае-Саянский..., 2025]. Кемеровская область и взрывы, производимые на ее территории, расположены на расстоянии порядка первых сотен километров от пункта наблюдения, поэтому нами было предположено, что производимые взрывы также могут оказывать влияние на температуру подземных вод в пункте мониторинга.

Для анализа взаимосвязи между температурой подземных вод и энергией сейсмических событий применялся корреляционный анализ в скользящем временном окне. Данный подход выбран, исходя из необходимости учесть временные задержки и инерционность реакции гидрогеологических параметров на сейсмические и техногенные воздействия. Размер временного окна подбирался опытным путем, учитывая характерные временные интервалы реакции подземных вод на сейсмические события. В результате были выбраны два основных временных окна анализа: 120 и 300 сут.

Временное окно в 120 суток (соответствующее 12 измерениям при частоте 3 раза в месяц) было выбрано для выявления относительно краткосрочных эффектов от сейсмических событий и промышленных взрывов, проявляющихся в течение первых месяцев после воздействия. Временное окно в 300 сут (соответствующее 30 измерениям) использовалось для анализа долговременных реакций и позволило оценить затухающие и кумулятивные эффекты от нескольких последовательно произошедших событий. Выбор данных временных интервалов был обусловлен стремлением обеспечить оптимальный баланс между разрешающей способностью анализа и статистической значимостью получаемых корреляционных результатов.

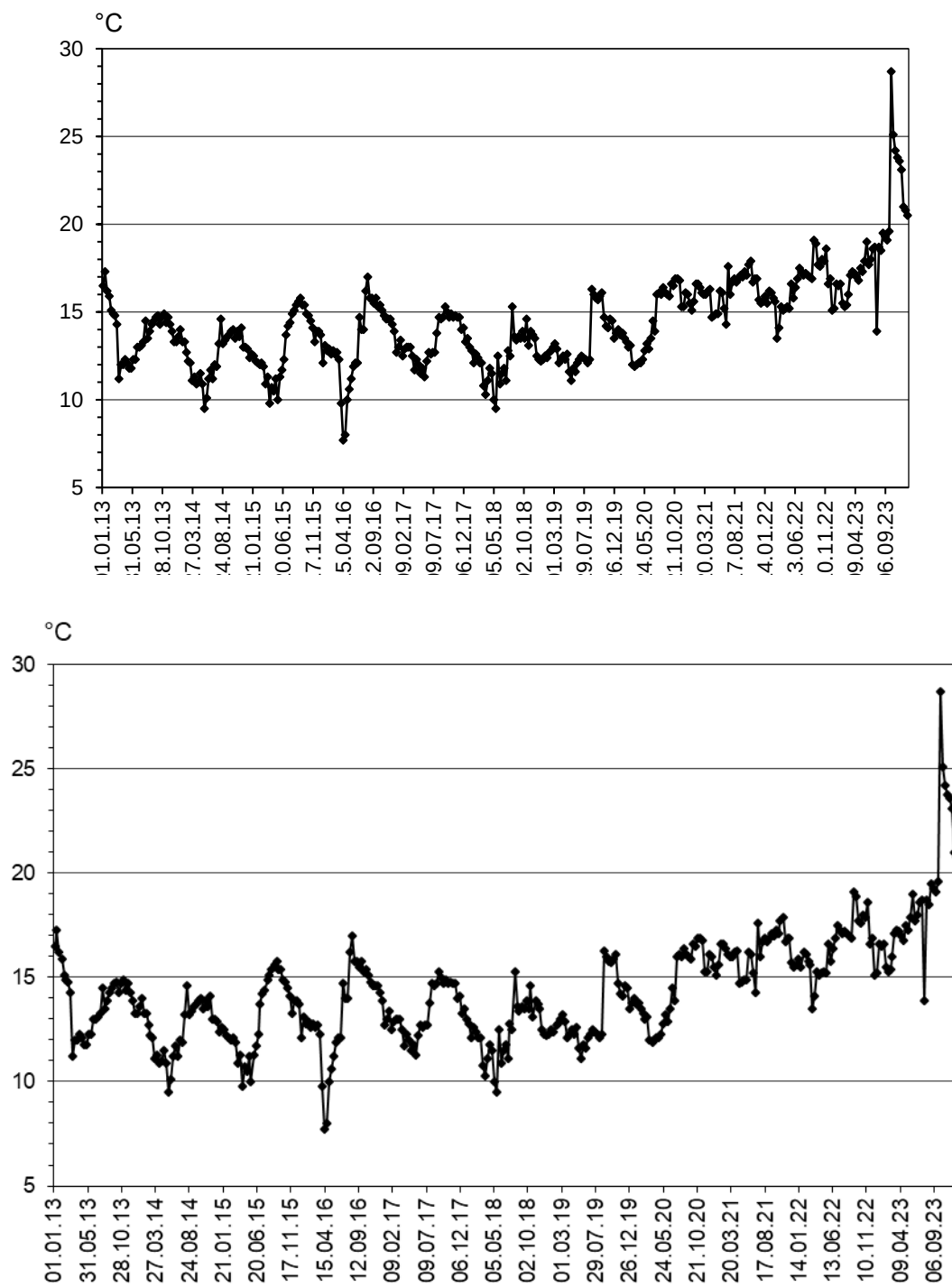


Рис. 5. Динамика изменения температуры подземных вод на ГОНС «Северная»

Fig. 5. Dynamics of groundwater temperature at the GONS Severnaya station

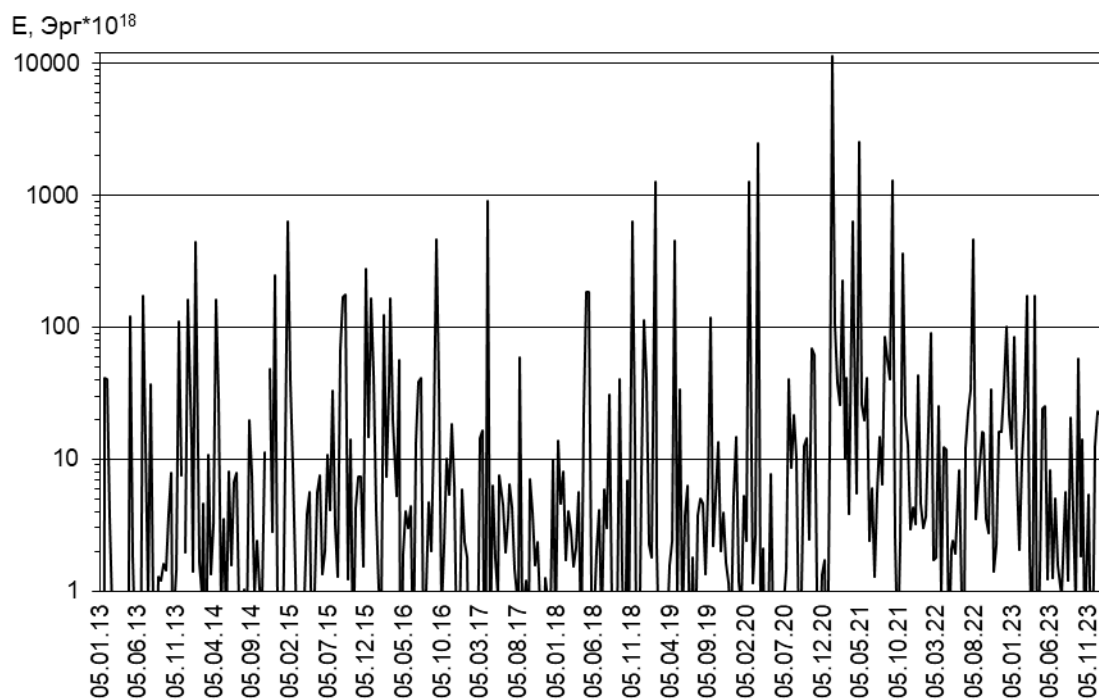


Рис. 6. Выделенная сейсмическая энергия в результате землетрясений в Алтае-Саянской горной области

Fig. 6. Released seismic energy from earthquakes in the Altai-Sayan mountain region

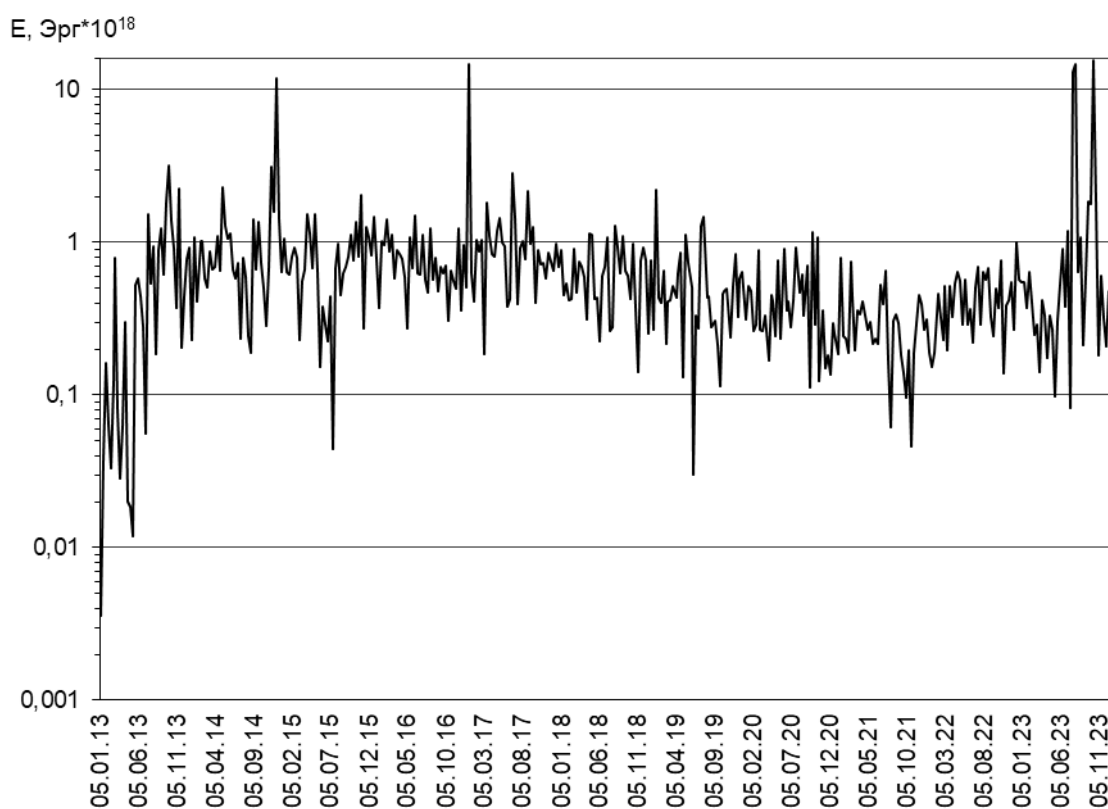


Рис. 7. Выделенная сейсмическая энергия в результате промышленных взрывов в Кемеровской области

Fig. 7. Released seismic energy from industrial explosions in the Kemerovo Region

Рис. 8, 9 показывают результаты корреляционного анализа с использованием окон в 120 и 300 сут соответственно. Эти графики демонстрируют, как изме-

няется сила и знак корреляционной связи в зависимости от временного окна и удаленности во времени от события.

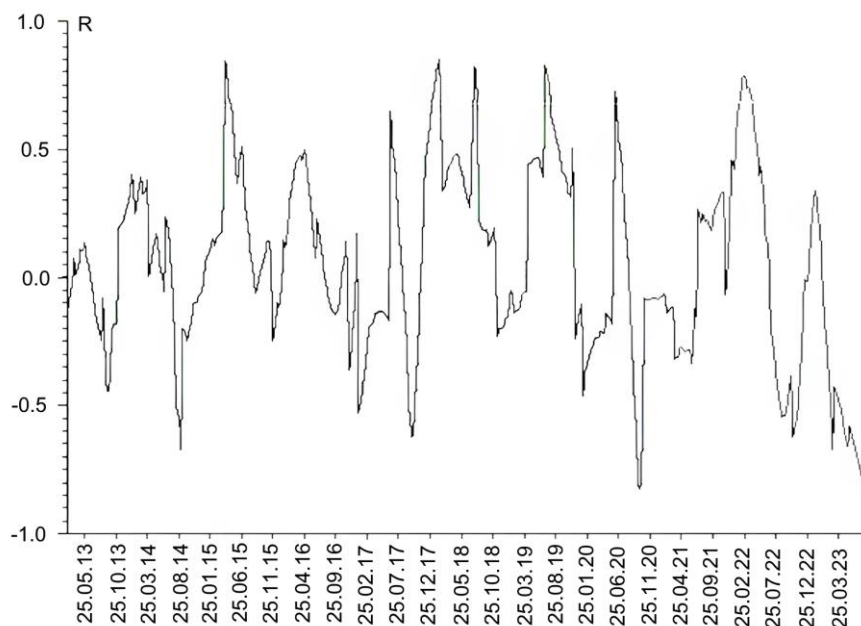


Рис. 8. Скользящие коэффициенты взаимной корреляции (R) рядов температуры подземных вод и выделенной сейсмической энергии в результате землетрясений в Алтае-Саянской горной области ($\lg E$)
Частота опроса – 3 отсчета/мес; скользящее временное окно – 120 сут; доверительная корреляция при уровне значимости 0,05 – $r_{кр} = 0,576$

Fig. 8. Sliding mutual correlation coefficients (R) between groundwater temperature series and released seismic energy from earthquakes in the Altai-Sayan mountain region ($\lg E$)
Sampling frequency – 3 points/month; sliding time window – 120 days; critical correlation coefficient at significance level 0,05 – $r_{cc} = 0,576$

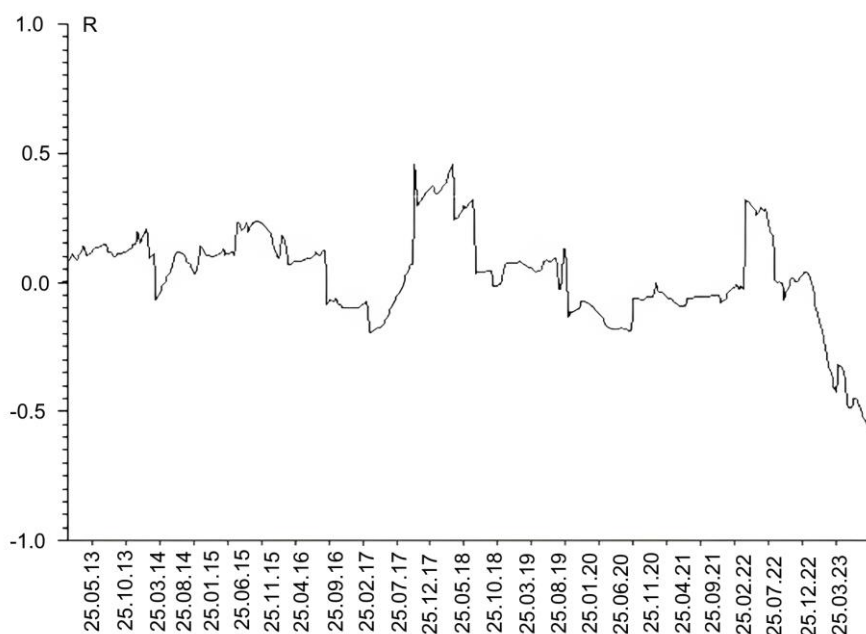


Рис. 9. Скользящие коэффициенты взаимной корреляции (R) ряда температуры подземных вод и ряда выделенной сейсмической энергии в результате землетрясений в Алтае-Саянской горной области ($\lg E$)
Частота опроса – 3 отсчета/мес; скользящее временное окно – 300 сут; доверительная корреляция при уровне значимости 0,05 – $r_{кр} = 0,361$

Fig. 9. Sliding mutual correlation coefficients (R) between groundwater temperature series and released seismic energy series from earthquakes in the Altai-Sayan mountain region ($\lg E$)
Sampling frequency – 3 points/month; sliding time window – 300 days; critical correlation coefficient at significance level 0,05 – $r_{cc} = 0,361$

При этом было выявлено, что большая часть сейсмических событий, происходивших в изучаемый период времени, отражается положительной связью с температурой в пункте мониторинга. Причем рост корреляции, особенно от удаленных землетрясений, наблюдается спустя 30–40 сут после сейсмического события.

При этом спустя 50–60 сут после землетрясения корреляция меняет знак на отрицательный. Таким образом, крупное землетрясение или серия афтершоков отмечается резким повышением степени связи между наблюдаемыми параметрами (до значимых величин) и затем таким же резким понижением.

Практически все крупные сейсмические события отмечаются повышением степени связи между температурой и выделенной сейсмической энергией, хотя не все достигают значимых величин корреляции.

Рис. 10, 11 отражают аналогичный анализ взаимосвязи температуры подземных вод с энергией промышленных взрывов в Кемеровской области, демонстрируя влияние техногенных факторов на гидрогеологические процессы.

В связи с расширением диапазона выборки скользящего временного окна (до 300 сут) (рис. 11) другие сейсмические события перебивают выявленные пики скользящей корреляции.

Анализ сопоставления значений температуры в пункте мониторинга и выделенной энергии промышленных взрывов в Кемеровской области показал, что несмотря на значительно более низкий уровень энергий, промышленные взрывы оказывают также влияние на характеристики температуры подземных вод в точке мониторинга (рис. 10, 11). Данный факт может быть обусловлен наведенной сейсмичностью от промышленных взрывов, выражающейся в увеличении событий с магнитудой 3–4 [Еманов и др., 2020], что характеризуется значительно большей сейсмической энергией, нежели сам взрыв, и может оказывать влияние на удаленные объекты.

При этом по кривой скользящего коэффициента корреляции очень хорошо прослеживается сезонность взрывов (при увеличении взрывов уровень корреляции повышается). При увеличении выборки до 300 сут сезонные характеристики стираются или объединяются в одну большую временную область повышенной связи между наблюдаемыми параметрами.

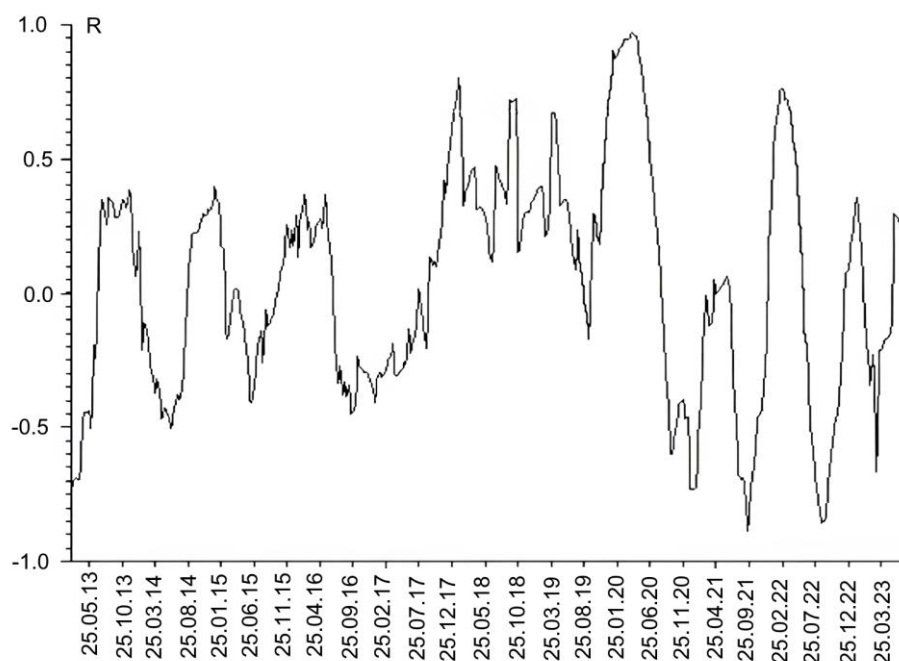


Рис. 10. Скользящие коэффициенты взаимной корреляции (R) рядов температуры подземных вод и выделенной сейсмической энергии от взрывов в Кемеровской области (lgE)

Частота опроса – 3 отсчета/мес; скользящее временное окно – 120 сут; доверительная корреляция при уровне значимости 0,05 – $r_{кр} = 0,576$

Fig. 10. Sliding mutual correlation coefficients (R) between groundwater temperature series and released seismic energy from explosions in the Kemerovo Region (lgE)

Sampling frequency – 3 points/month; sliding time window – 120 days; critical correlation coefficient at significance level 0,05 – $r_{cc} = 0,576$

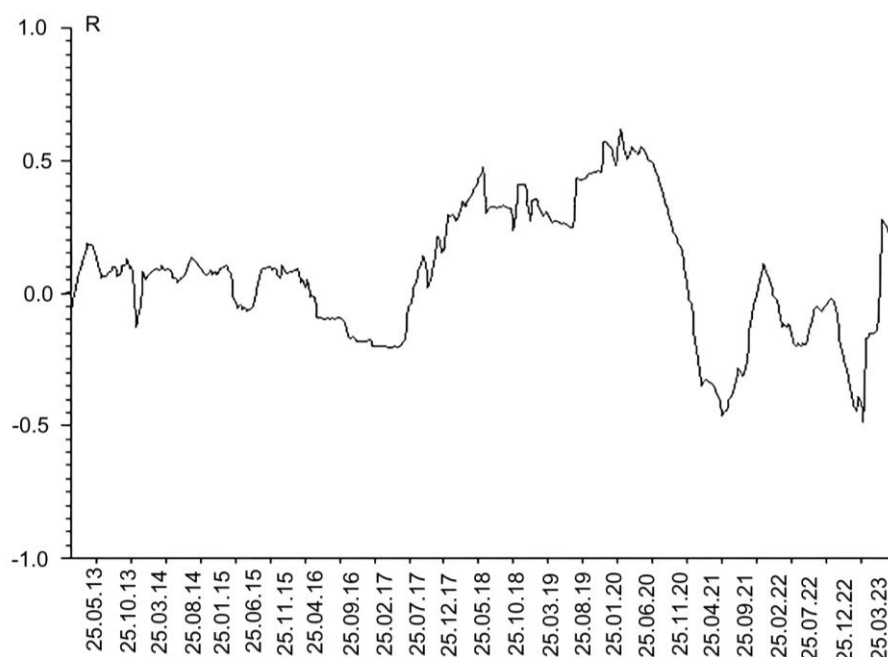


Рис. 11. Скользящие коэффициенты взаимной корреляции (R) ряда температуры подземных вод и ряда выделенной сейсмической энергии от взрывов в Кемеровской области (IgE)

Частота опроса – 3 отсчета/мес; скользящее временное окно – 300 сут; доверительная корреляция при уровне значимости 0,05 – $r_{кр} = 0,361$

Fig. 11. Sliding mutual correlation coefficients (R) between groundwater temperature series and released seismic energy series from explosions in the Kemerovo Region (IgE)

Sampling frequency – 3 points/month; sliding time window – 300 days; critical correlation coefficient at significance level 0,05 – $r_{cc} = 0,361$

Заключение

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что изменения температуры подземных вод в пункте наблюдений ГОНС «Северная» напрямую связаны с сейсмическими и техногенными событиями в регионе. Особый интерес представляет выявленное изменение знака корреляционной связи с положительного на отрицательный спустя 50–60 сут после событий. Подобные изменения могут быть связаны с комплексом геодинамических процессов и требуют более детального анализа.

Одной из возможных причин такого явления является процесс миграции глубинных флюидов, активизирующийся вследствие изменения напряженно-деформированного состояния земной коры после землетрясений или промышленных взрывов. В период сразу после сейсмического события разломные зоны раскрываются и проницаемость пород увеличивается, что приводит к интенсификации вертикальной миграции теплых флюидов и, как следствие, повышению температуры подземных вод. В последующие

периоды, когда напряжение в породах начинает снижаться и проницаемость постепенно уменьшается, интенсивность флюидной миграции снижается, и это отражается в изменении корреляционной связи на отрицательную.

Также возможно, что негативная корреляция обусловлена охлаждением водоносного горизонта в результате поступления холодных поверхностных или инфильтрационных вод, активизированного тем же изменением проницаемости пород после пикового момента раскрытия разломов. Таким образом, наблюдаемое изменение знака корреляции является отражением сложного взаимодействия между вертикальной и горизонтальной миграцией различных типов флюидов, изменения гидродинамических условий и напряженно-деформированного состояния массива пород.

Дополнительные исследования, включая проведение геохимического и изотопного анализа флюидов, позволят уточнить механизмы их миграции и лучше понять природу наблюдаемых гидрогеологических явлений.

Список источников

Алтае-Саянский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН». Оперативные сообщения о сейсмических событиях. Новосибирск, 2025. URL: <https://asgsr.ru/node/1> (дата обращения: 23.01.2025).

Аптикаева О.И., Шитов А.В. Динамика радоновой активности в связи с землетрясениями (на примере Алтайской сейсмоактивной области) // Геофизические процессы и биосфера. 2016. Т. 15, № 1. С. 25–42.

- Вартанян Г.С. Флюидосфера и эндодренаж Земли: Некоторые геофизические и биофизические последствия // Геофизические процессы и биосфера. 2024. Т. 23, № 1. С. 65–79. doi: 10.21455/GPB2024.1-4
- Дутова Е.М., Кац В.Е., Шитов А.В., Сурнин А.И., Молоков В.А. Гелий в подземных водах Республики Алтай // Геодинамика и тектонофизика. 2020. № 11 (3). С. 651–663. doi: 10.5800/GT-2020-11-3-0497
- Дутова Е.М., Кац В.Е., Шитов А.В., Сурнин А.И., Драчев С.С. Результаты краткосрочного мониторинга содержания гелия и обобщенных показателей в подземных водах Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2022. Т. 333. С. 38–46.
- Дутова Е.М., Шитов А.В., Кац В.Е., Драчев С.С. Динамика гелия в подземных водах Горного Алтая // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами : материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева, Томск, 16–21 октября 2023 г. Томск : Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 339–342. EDN UEFHDO.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Шевкунова Е.В., Подкорытова В.Г., Куприш О.В. Наведённая сейсмичность в угольных и железорудных районах Кузбасса // Российский сейсмологический журнал. 2020. № 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/navedyonnaya-seysmichnost-v-ugolnyh-i-zhelezorudnyh-rayonah-kuzbassa> (дата обращения: 03.04.2025).
- Кац В.Е., Шитов А.В., Драчёв С.С. О механизмах изменения химического состава и температуры подземных вод в районе Горно-Алтайска // Геоэкология. 2010. № 3. С. 207–212.
- Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизический и тектонический аспекты. Институт физики Земли. М. : Наука, 2009. 329 с.
- Копылова Г.Н., Болдина С.В. Гидрогеосейсмологические исследования на Камчатке: 1977–2017 гг. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 3–20.
- Садовский М.А. Избранные труды: Геофизика и физика взрыва / отв. ред. В.В. Адушкин. М. : Наука, 2004. 440 с.
- Уткин В.И., Юрков А.К. Радон и проблема тектонических землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1997. № 4. С. 84–92.
- Шитов А.В., Ушакова В.Г., Большух Т.В., Гвоздарев А.Ю., Кочеева Н.А. Термальные источники, активизировавшиеся после сейсмической деятельности на территории Горного Алтая // Геоэкология Алтае-Саянской горной страны: Ежегодный международный сборник. Горно-Алтайск : РИО, 2005. С. 112–118.
- Шитов А.В., Кац В.Е., Харьковина М.А. Эколого-геодинамическая оценка Чуйского землетрясения // Вестник Московского университета. Сер. Геология. 2008. № 3. С. 41–47.
- Шитов А.В., Кац В.Е., Дутова Е.М., Молоков В.Ю., Покровский В.Д. Изменение химического состава подземных вод республики Алтай при землетрясениях // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 1. С. 19–29.
- Claesson L., Skelton A. et al. The timescale and mechanisms of fault sealing and water-rock interaction after an earthquake // Geofluids. 2007. № 7 (4). P. 427–440.
- Gutenberg B., Richter C. Magnitude and energy of earthquakes // Annals of Geophysics. 1956. V. 9, № 1. P. 1–15.
- Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset // Earth System Science Data. 2022. V. 14. P. 4489–4503. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/14/4489/2022/> (Date of accessed: 07.04.2025).
- Skelton A., Andren M. et al. Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland // Nature Geoscience. 2014. № 7 (10). P. 752–756.

References

- Altaye-Sayanskiy filial Federal'nogo issledovatel'skogo tsentra «Edinaya geofizicheskaya sluzhba RAN». Operativnyye soobshcheniya o seysmicheskikh sobytiyakh [Altai-Sayan Branch of the Federal Research Center 'Unified Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences'. Operational reports on seismic events] Electronic resource. Novosibirsk, 2025. <https://asgsr.ru/node/1> (Date of accessed: 23.01.2025). In Russian
- Apitkaeva O.I., Shitov A.V. Radon activity dynamics in connection with earthquakes (case study of the Altai seismic region) // Geophysical Processes and Biosphere. 2016. V. 15, No. 1. pp. 25–42. In Russian
- Vartanyan G.S. The fluidosphere and Earth's endodrainage: Some geophysical and biophysical consequences // Geophysical Processes and Biosphere. 2024. V. 23, No. 1. pp. 65–79. <https://doi.org/10.21455/GPB2024.1-4>. In Russian
- Dutova E.M., Kats V.E., Shitov A.V., Surnin A.I., Molokov V.A. Helium in groundwater of the Altai Republic // Geodynamics and Tectonophysics. 2020. V. 11, No. 3. pp. 651–663. doi: 10.5800/GT-2020-11-3-0497. In Russian
- Dutova E.M., Kats V.E., Shitov A.V., Surnin A.I., Drachev S.S. Results of short-term monitoring of helium and general indicators in the groundwater of Gorny Altai // Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo-Resource Engineering. 2022. V. 333. pp. 38–46. In Russian
- Dutova E.M., Shitov A.V., Kats V.E., Drachev S.S. *Dinamika geliya v podzemnykh vodakh Gornogo Altaya* [Helium dynamics in the groundwater of Gorny Altai] // *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami: Materialy V Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem imeni professora S.L. Shvartseva, Tomsk, 16–21 oktyabrya 2023 goda* [Geological Evolution of Water–Rock Interaction: Proceedings of the 5th All-Russian Scientific Conference with International Participation named after Prof. S.L. Shvartsev, Tomsk, October 16–21, 2023]. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University, 2023. pp. 339–342. EDN UEFHDO. In Russian
- Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Shevkunova E.V., Podkorytova V.G., Kuprish O.V. *Navedennaya seysmichnost' v ugol'nykh i zhelezorudnykh rayonakh Kuzbassa* [Induced seismicity in coal and iron ore areas of Kuzbass] // Russian Seismological Journal. 2020. No. 3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/navedyonnaya-seysmichnost-v-ugolnyh-i-zhelezorudnyh-rayonah-kuzbassa> (Date of accessed: 03.04.2025). In Russian
- Kats V.E., Shitov A.V., Drachev S.S. On the mechanisms of changes in the chemical composition and temperature of groundwater in the Gorno-Altai region // *Geoekologiya* [Geoeology]. 2010. No. 3. pp. 207–212. In Russian
- Kissin I.G. *Flyuidy v zemnoy kore. Geofizicheskiy i tektonicheskiy aspekty* [Fluids in the Earth's Crust: Geophysical and Tectonic Aspects]. Institute of the Physics of the Earth. Moscow: Nauka, 2009. 329 p. In Russian

- Kopylova G.N., Boldina S.V. Hydrogeo-seismological studies in Kamchatka: 1977–2017 // *Vulkanologiya i seysmologiya* [Volcanology and Seismology]. 2019. No. 2. pp. 3–20. In Russian
- Sadovsky M.A. *Izbrannyye trudy: Geofizika i fizika vzryva* [Selected Works: Geophysics and Explosion Physics] Ed. by V.V. Adushkin. Moscow: Nauka, 2004. 440 p. In Russian
- Utkin V.I., Yurkov A.K. Radon and the problem of tectonic earthquakes // *Vulkanologiya i seysmologiya* [Volcanology and Seismology]. 1997. No. 4. pp. 84–92. In Russian
- Shitov A.V., Ushakova V.G., Bolbukh T.V., Gvozdev A.Yu., Kocheeva N.A. *Termal'nyye istochniki, aktivizirovavshiesya posle seysmicheskoy deyatelnosti na territorii Gornogo Altaya* [Thermal springs activated after seismic activity in Gorny Altai] // *Geoekologiya Altaye-Sayanskoy gornoy strany. Ezhegodnyy mezhdunarodnyy sbornik* [Geoecology of the Altai–Sayan Mountain Country. Annual International Collection]. Gorno-Altaysk: RIO, 2005. pp. 112–118. In Russian
- Shitov A.V., Kats V.E., Kharkina M.A. Ecological and geodynamic assessment of the Chuya earthquake // *Moscow University Geology Bulletin*. 2008. No. 3. pp. 41–47. In Russian
- Shitov A.V., Kats V.E., Dutova E.M., Molokov V.A., Pokrovskiy V.D. Changes in the chemical composition of groundwater in the Altai Republic during earthquakes // *Bulletin of Tomsk Polytechnic University*. 2016. V. 327, No. 1. pp. 19–29. In Russian
- Claesson L., Skelton A. et al. The timescale and mechanisms of fault sealing and water-rock interaction after an earthquake // *Geofluids*. 2007. V. 7, No. 4. pp. 427–440.
- Gutenberg B., Richter C. Magnitude and energy of earthquakes // *Annals of Geophysics*. 1956. V. 9, No. 1. pp. 1–15.
- Zelenin E.A., Bachmanov D.M., Garipova S.T., Trifonov V.G., Kozhurin A.I. The Active Faults of Eurasia Database (AFEAD): the ontology and design behind the continental-scale dataset [Electronic resource] // *Earth System Science Data*. 2022. V. 14. pp. 4489–4503. URL: <https://essd.copernicus.org/articles/14/4489/2022/> (Date of accessed: 07.04.2025).
- Skelton A., Andren M. et al. Changes in groundwater chemistry before two consecutive earthquakes in Iceland // *Nature Geoscience*. 2014. V. 7, No. 10. pp. 752–756.

Информация об авторах:

Драчев С.С., аспирант, кафедра природопользования, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: oldwolf07@yandex.ru

Каи В.В., ведущий специалист, АО «Геологическое предприятие “Алтай-Гео”», с. Майма, Республика Алтай, Россия.

E-mail: altai.geo@yandex.ru

Шитов А.В., кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры географии и природопользования, Горно-Алтайский государственный университет, Горно-Алтайск, Россия.

E-mail: sav103@yandex.ru

Дутова Е.М., доктор геолого-минералогических наук, профессор? кафедра природопользования, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия; профессор, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

E-mail: dutova@tpu.ru

Покровский В.Д., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Инженерная школа природных ресурсов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия.

E-mail: pokrovskiy.v@gmail.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Dravchev S.S., post-graduate student, Department of Environmental Management, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: oldwolf07@yandex.ru

Kats V.E., Head of the Monitoring Service, Open Joint-Stock Company "Geological Enterprise Altai-Geo", Mayma, Russia.

E-mail: altai.geo@yandex.ru

Shitov A.V., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, Gorno-Altaysk State University, Gorno-Altaysk, Russia.

E-mail: altai.geo@yandex.ru

Dutova E.M., Dr. Sci. (Geol.-Miner.), Professor Department of Environmental Management, Geology and Geography Faculty, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia; Professor, School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: dutova@tpu.ru

Pokrovskiy V.D., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor, School of Natural Resources Engineering, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

E-mail: pokrovskiy.v@gmail.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.04.2025; одобрена после рецензирования 25.05.2025; принята к публикации 02.06.2025

The article was submitted 23.04.2025; approved after reviewing 25.05.2025; accepted for publication 02.06.2025