

УДК 55.504.624.131

ИССЛЕДОВАНИЕ КОСЕЙСМИЧЕСКИХ ГЕОТЕРМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ГОРНО-АЛТАЙСКА В АФТЕРШОКОВЫЙ ПЕРИОД ЧУЙСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ (2004-2023 гг.)

Щучинов Л.В.¹, Кац В.Е.², Ролдугин В.В.², Новикова И.И.¹

¹ФБУН «Новосибирский НИИ гигиены», Новосибирск, Россия

²АО «Алтай-Гео», Республика Алтай, Горно-Алтайск, Россия

В 2003 г. на южной окраине Республики Алтай произошло крупное землетрясение магнитудой 7,3, названное Алтайским или Чуйским. Оно было отмечено как крупнейшее мировое сейсмическое событие этого года. При землетрясении имело место не только сотрясение геологической среды, но и случаи значительного повышения температуры подземных вод. Наиболее ярким примером такого влияния явилось потепление воды в трубчатом колодце по улице Северной в городе Горно-Алтайске с 5-7°С до 30-48°С. С июня 2004 г. на этом наблюдательном пункте, названном НП «Северный», в рамках федеральной программы начаты ежемесячные мониторинговые наблюдения за температурой и качеством вод, продолжающиеся по настоящее время. Актуальность исследования влияния землетрясений на температуру подземных вод обусловлена поиском прогностических параметров в сейсмоактивных регионах, к которым относится Республика Алтай.

Цель исследования – изучение взаимосвязи температурного режима воды НП «Северный» в Горно-Алтайске с сейсмическими событиями в Алтае-Саянском регионе.

Материалы и методы. Анализ проводили по данным мониторинга подземных вод НП «Северный» в г. Горно-Алтайске за 2004–2023 гг. Сведения о сейсмической активности изучали по оперативным данным Федерального исследовательского центра Единой геофизической службы РАН Алтае-Саянского филиала. Для выявления взаимосвязи температурного режима на НП «Северный» с энергией сейсмических событий проводился статистический анализ с применением пакета Statistica 10.0 и программы Excel. Использовались параметрические методы, а также методы корреляционного и регрессионного анализов. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$.

Результаты. Многолетний мониторинг (2004-2023 гг.) показал, что колебания температуры воды в НП «Северный» коррелируют с энергией сейсмических

событий, зарегистрированных в афтершоковый период в Республике Алтай и в Алтае-Саянском регионе в целом. Аномальные изменения температурного режима подземных вод могут служить индикаторами сейсмической активизации региона.

Ключевые слова: подземные воды, температурный режим, сейсмическая активность, Чуйское землетрясение, мониторинг, афтершоковый период, предвестники землетрясений, Республика Алтай.

Для цитирования: Щучинов Л.В., Кац В.Е., Ролдугин В.В., Новикова И.И. Исследование косейсмических геотермических реакций подземных вод Горно-Алтайска в афтершоковый период Чуйского землетрясения (2004-2023 гг.) Медицина труда и экология человека. 2024; 3: 132-146.

Для корреспонденции: Щучинов Леонид Васильевич, к.м.н., ведущий научный сотрудник ФБУН «Новосибирский научно-исследовательский институт гигиены» Роспотребнадзора.

Финансирование: исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10308>

STUDY OF COSEISMIC GEOTHERMAL REACTIONS OF GROUNDWATERS IN THE TOWN OF GORNO-ALTAISK DURING THE AFTERSHOCK PERIOD OF THE CHUYE EARTHQUAKE (2004-2023)

Shchuchinov L.V.¹, Kats V.E.², Roldugin V.V.², Novikova I.I.¹

¹Novosibirsk Research Institute of Hygiene, Novosibirsk, Russia

²JSC "Altai-Geo", Gorno-Altai, Russia

In 2003, a large earthquake with a magnitude of 7.3, called the Altai or Chui earthquake, occurred on the southern outskirts of the Altai Republic. It was marked as the world's largest seismic event of the year. During the earthquake, not only shaking of the geological environment was observed, but also cases of a significant increase in the temperature of groundwater. The most striking example of this influence was the increase in water temperature in a tube well on Severnaya Street in the town of Gorno-Altai from 5-7°C to 30-48°C. Since June 2004, at this observation point, called NP "Severny", monthly monitoring observations of temperature and water quality began as

part of the federal program. The relevance of the work is related to the search for earthquake indicators in seismically active regions, which include the Altai Republic.

The aim of the study is to investigate the relationship between the temperature regime of groundwater of the NP "Severny" in the town of Gorno-Altaysk and seismic events in the Altai-Sayan region.

Materials and methods. The analysis was based on the data of groundwater monitoring at the NP "Severny" for the period of 2004 and 2023. Information on seismic activity was studied using operational data of the Altai-Sayan Branch of Federal State Budgetary Institution of Science of the Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences. The statistical analysis was performed in Statistica 10.0 system and Microsoft Excel using parametric methods, correlation and regression analyses. Differences were considered statistically significant at $p < 0.05$.

Results. Long-term monitoring has revealed a connection between the temperature of groundwater in the NP "Severny" tubular well and the energy of seismic events during the period of aftershocks of the Chuya earthquake (2004-2023). Anomalous changes in the temperature regime of groundwater can serve as indicators of seismic activation in the region.

Key words: groundwater, temperature regime, seismic activity, Chuya earthquake, monitoring, aftershock period, earthquake indicators, the Altai Republic

For citation: Shchuchinov L.V., Kats V.E., Roldugin V.V., Novikova I.I. Study of coseismic geothermal reactions of groundwaters in the town of Gorno-Altaysk during the aftershock period of the Chuye earthquake (2004-2023). Occupational health and human ecology. 2024;3: 132-146.

Correspondence: Leonid V. Shchuchinov, Cand.Sc., Leading Researcher, the Federal Budgetary Institution "Novosibirsk Research Institute of Hygiene" of Rospotrebnadzor

Funding: the study did not have sponsorship.

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

DOI: <http://dx.doi.org/10.24412/2411-3794-2024-10308>

Республика Алтай (РА) расположена в границах Алтае-Саянской складчатой области, где с 2003 г. по настоящее время наблюдается активизация сейсмической деятельности, значимым проявлением которого явилось Алтайское (Чуйское) землетрясение, зарегистрированное 27 сентября 2003 г. в Чуйско-

Курайской зоне с магнитудой 7,3 ($M=7,3$) [1-3]. Интенсивность этого землетрясения по MSK-64 составила 10 баллов. Сейсмические события привели не только к многочисленным разрывам и трещинам земной коры с обвалами и оползнями, но и вызвали сильные разрушения в населенных пунктах Кош-Агачского района, особенно вблизи эпицентра – в селах Бельтир (8 баллов), Чаган-Узун, Ортолык, Курай, Акташ (6-7 баллов). Визуальными признаками влияния землетрясения на гидрогеологический режим подземных вод явились грифоны – многочисленные водно-грязевые фонтаны (в долине реки Чаган, селах Бельтир, Ортолык, Курай, Кош-Агач, Чаган-Узун, Джазатор), высота которых порой достигала 2-5 м. В долине р. Талтура и на стадионе с. Бельтир за счет грифонов образовались грязевые озера площадью 6-10 тыс. м², которые, по словам очевидцев, в первые дни были теплыми (до 40°C) [4].

Исследования показывают, что после крупных землетрясений наблюдается длительный афтершоковый процесс [3, 5], что подтверждается в Республике Алтай, где на протяжении 20 лет после Чуйского землетрясения ежегодно регистрируется до 239 сейсмических событий, а в целом в Алтае-Саянском регионе (АСР) – от 34 до 1594, в то время как в 2002 г. их было соответственно 7 (РА) и 84 (АСР).

Город Горно-Алтайск удален от эпицентра Чуйского землетрясения на 269 км. В геологическом плане он находится в зоне глубинного разлома, связанного с тектоническими структурами эпицентральной зоны землетрясения [6]. В связи с последним после 2003 г. в Горно-Алтайске также повысилась сейсмическая активность. В частности, 18 и 26 февраля 2004 г. в городе были зарегистрированы два подземных события с магнитудой 3,4 и 3,1, после которых в ряде индивидуальных водозаборных колонок на улицах Северная и Осипенко отмечен подъем температуры воды. Наиболее показательным объектом в этом плане был трубчатый колодец по ул. Северной глубиной 10 м, владелица которого заявила о повышении температуры воды в колодце до 39°C, тогда как в предыдущие 48 лет вода в нем была постоянно холодной (по отчетам АО «Алтай-Гео» она не превышала 5-7°C). С июня 2004 г. на этом объекте, названном наблюдательным пунктом (НП) «Северный», ведется мониторинг температурного режима и химического состава воды с кратностью замеров и отбора проб 1-3 раза в месяц.

Цель исследования – изучение взаимосвязи температурного режима воды НП «Северный» в Горно-Алтайске с сейсмическими событиями в Алтае-Саянском регионе.

Материалы и методы. Объект исследования – вода трубчатого колодца НП «Северный» в городе Горно-Алтайске. Эта территория находится в зоне герцинских глубинных разломов с амплитудой перемещений до 500 м. С июня 2004 г. замеры температуры и отборы проб воды из колодца осуществляли 1-3 раза в месяц. Измерения уровня воды проводили уровнемером KL 010 (Германия) или УСК ТЭ 100 с точностью 1 см. Температуру воды измеряли электронным термометром (Щуп) с точностью измерения $0,5^{\circ}\text{C}$; за период 2004-2023 гг. было сделано 659 замеров температуры воды. Определение химического состава воды и объемной активности радона в воде выполнялось в Испытательном лабораторном центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Республике Алтай». Всего за 2004-2023 гг. было исследовано 590 проб воды. Более ранние исследования (1956-2003 гг.) анализировали по отчетам АО «Алтай-Гео» (ТЦ «Алтайгеомониторинг»), осуществлявшего государственный мониторинг состояния подземных вод (ГМПВ) до 2018 г. С 2018 г. мониторинг проводится Горно-Алтайским отделением Сибирского регионального центра Государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидроспецгеология» (ФГБУ «Гидроспецгеология»). Сведения о сейсмической активности анализировали по оперативным данным Федерального исследовательского центра Единой Геофизической службы РАН Алтае-Саянского филиала. Расчет энергии сейсмической активности осуществлялся по методике Гутенберга-Рихтера. Для выявления взаимосвязи температурного режима на НП «Северный» с энергией сейсмических событий использовали статистические методы с применением пакета Statistica 10.0 и системы электронных таблиц Microsoft Excel. Использовались параметрические методы, а также методы корреляционного и регрессионного анализов. Статистически значимыми применяли различия при $p < 0,05$.

Результаты. В Республике Алтай ввиду высокой сейсмичности региона отслеживаются не только физические и химические параметры подземных вод, но и влияние на них многочисленных землетрясений, число которых в афтершоковый период Чуйского землетрясения остается высоким: в 2002–2023 гг. в РА было зарегистрировано 840 сейсмических событий (из 12182 в АСР) (табл. 1).

Как видно из таблицы 1, сейсмическая активность в Республике Алтай и в целом в Алтае-Саянском регионе неоднозначная: с 2004 по 2010 гг. количество землетрясений постепенно уменьшалось, затем вновь начало расти практически до настоящего времени.

Таблица 1. Сейсмическая активность территории Республики Алтай в форшоковый и афтершоковый периоды Чуйского землетрясения

Table 1. Seismic activity in the Altai Republic during the foreshock and aftershock period of the Chuya earthquake

Год	Количество сейсмических событий	
	Алтае-Саянский регион	Республика Алтай
2002	84	7
2003	345	239
2004	191	92
2005	79	20
2006	56	14
2007	34	15
2008	65	12
2009	53	16
2010	39	1
2011	118	21
2012	168	50
2013	599	33
2014	874	34
2015	894	46
2016	1089	26
2017	1062	43
2018	974	34
2019	1070	56
2020	814	35
2021	1594	16
2022	1198	14
2023	782	16
Всего	12182	840

Мониторинг воды НП «Северный» показал, что температура подземных вод в начале афтершокового периода во время сейсмических событий увеличивалась до 37,0°C (11.06.2004 г.) и даже до 48°C (01.10.2004 г.) [4]. Повышалась также температура почвы на приусадебном участке НП «Северный» и воздуха в подполье дома: так, 25.09.2004, когда температура воздуха была 7°C, температура почвы на участке на глубине 40 см составляла 23-25°C, а в феврале, несмотря на сильные морозы, температура воздуха в подполье дома достигала 20°C [6]. В дальнейшем

(с 2005 по 2010 гг.) происходило постепенное снижение температуры воды НП «Северный», а затем ее повышение (с 2011 по 2023 гг.), что совпадало с сейсмической активностью в регионе. Корреляционный анализ по Пирсону выявил, что между среднемесячной температурой воды в колодце и энергией сейсмических событий в АСР (с эпицентрами на территориях, находящихся рядом с границами РА) наблюдается статистически значимая положительная связь средней силы ($r=0,58$, $p<0,05$). В частности, на графике (рис. 1) всплески энергии сейсмических событий в 2011 г. и 2012 г. и одновременный рост температуры подземных вод НП «Северный» обусловлены 2 крупными землетрясениями в соседней республике Тыва – 27.12.2011 ($M=6,7$) и 26.02.2012 ($M=6,8$).

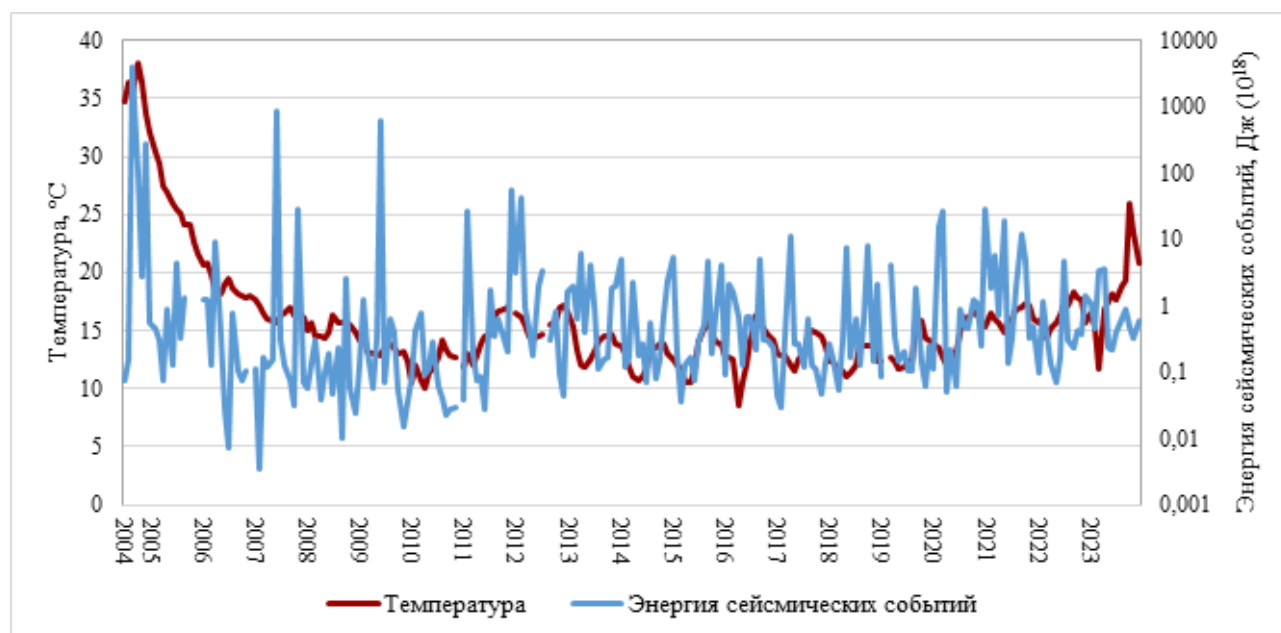


Рис. 1. Взаимосвязь среднемесячной температуры подземных вод в НП «Северный» в г. Горно-Алтайске с энергией сейсмических событий в АСР в 2004-2023 гг.

Fig 1. The relationship between the average monthly temperature of groundwater in the Severny National Park in Gorno-Altaiisk and the energy of seismic events in the ASR in 2004-2023

Анализ гидрогеологических условий по г. Горно-Алтайску показывает, что НП «Северный» – не единичное проявление термальных изменений. В результате сейсмической деятельности повышение температуры воды после землетрясений 18 и 26 февраля 2004 г. до 16-24°C отмечалось также в колонках по ул. Осипенко,

расположенных в 1,5 км западнее НП «Северный». Кроме того, после второго Тувинского землетрясения зимой 2012 г. на некоторых участках летного поля ОАО «Аэропорт Горно-Алтайск» (в кюветах патрульной дороги, в канавах в центральной части летного поля, под железобетонным ограждением и под фундаментом павильона метеослужбы) были выявлены подземные выделения пара: при температуре окружающего воздуха минус 30°C в этих «парящих» местах температура составляла плюс 4-5°C.

Таблица 2. Результаты мониторинга температурного режима воды в НП «Северный» в 2004-2023 гг.

Table 2. Results of monitoring the temperature regime of water in the NP "Severny" in 2004-2023

Год	Число замеров температуры	Температура воды НП «Северный» (в °C)		
		Среднегодовая	Минимальная	Максимальная
2004	18	26,0	10,6	32
2005	25	26,0	20,0	32
2006	36	18,9	17,6	21
2007	35	17	16	18
2008	35	15	14	16
2009	34	13	12	15
2010	32	12	10	13
2011	29	14,4	10,3	17,2
2012	35	15,4	13,6	17,7
2013	36	13,9	11,2	17,3
2014	36	12,6	9,5	14,6
2015	36	13,07	9,8	15,8
2016	36	13,3	7,7	17,0
2017	35	13,4	11,3	14,9
2018	34	12,5	9,5	15,3
2019	33	13,4	11,1	16,3
2020	35	14,5	11,9	16,9
2021	31	16,2	14,3	17,9
2022	34	16,5	13,5	19,1
2023	34	19	13,9	28,7
Всего	659	16,2	12,4	18,7

В целом мониторинговые исследования выявили, что колебания температуры подземных вод в трубчатом колодце НП «Северный» варьировали от 7,7°C (в 2016 г.) до 32°C (в 2004 г.), динамично реагируя на сотрясения почвы, что хорошо демонстрирует график температурного режима и энергии сейсмических событий, зарегистрированных в ближайшей зоне – в Республике Алтай за 2023 г. (рис. 2). Корреляционный анализ по Пирсону показал наличие между этими показателями статистически значимой сильной положительной связи ($r=0,71$, $p<0,05$).

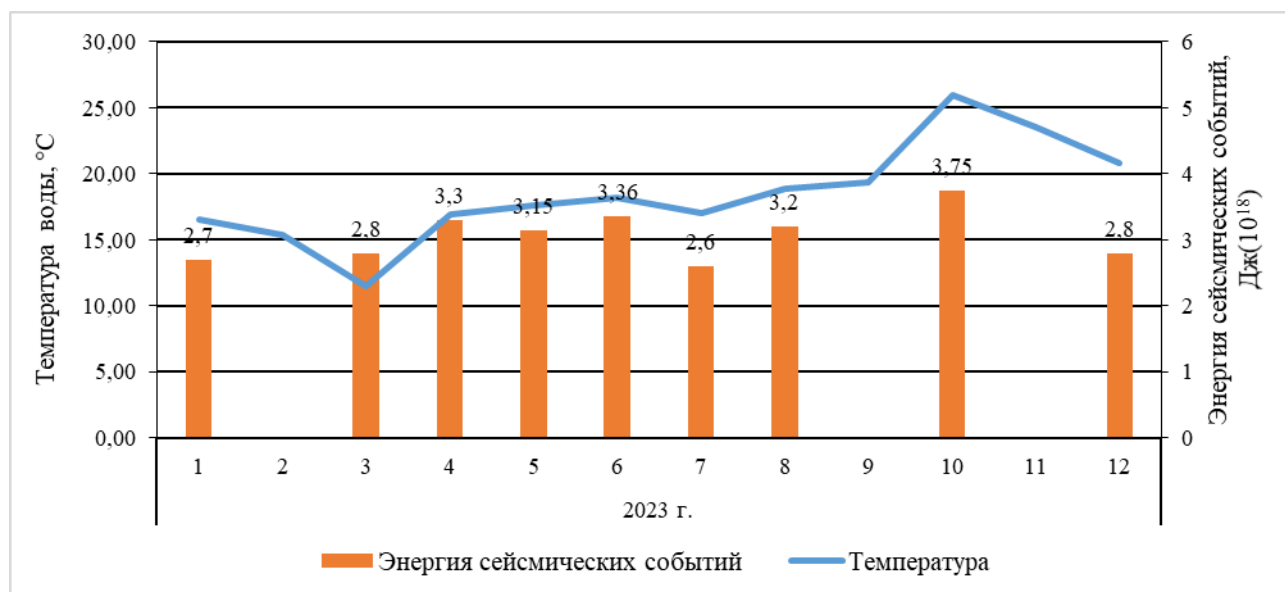


Рис. 2. Динамика температурного режима в трубчатом колодце НП «Северный» в г. Горно-Алтайске и его связь с энергией сейсмических событий в Республике Алтай в 2023 г.

Fig. 2. Dynamics of the temperature regime in the tube well of the Severny NP in Gorno-Altai and its connection with the energy of seismic events in the Altai Republic in 2023

На фоне возросшей сейсмической активности температура воды НП «Северный» в 2023 г. поднялась до 19°C, что значительно выше среднегодовой температуры 2022 г. – 16,5°C. Интересным представляется факт не только изменения термального режима, но и одновременного существенного роста мутности воды НП «Северный». Если в начале наблюдений мутность была чуть выше ПДК для питьевой воды (0,5-2,4-3,5 мг/дм³), то в 2023 г. регистрировались запредельные показатели мутности (до 412 мг/дм³), что также свидетельствует о нарастании сейсмической активности в регионе.

Мониторингом также установлено косейсмичное изменение гидрохимических показателей НП «Северный»: увеличение объемной активности радона за 7-8 дней до сейсмических толчков и в течение 10-16 дней после них (от 0,3 до 575 Бк/л) и

рост рН воды в период сейсмических событий (от 7,1 до 8,8). Также выявлено варьирование концентраций азотистых соединений (от 0,3 до 25,1 мг/дм³), фтора (от 0,08 до 0,33 мг/дм³), магния (от 10,7 до 30 мг/дм³), окиси кремния (от 6,2 до 17 мг/дм³), железа (от 0,055 до 1,63 мг/дм³), меди (от 0,001 до 0,013 мг/дм³), алюминия (от 0,075 до 1,82 мг/дм³), кадмия (от 0,002 до 0,07 мг/дм³), мышьяка (от 0,0004 до 0,0009 мг/дм³), марганца (0,005 до 0,034 мг/дм³), лития (0,009 до 0,012 мг/дм³), рост которых согласовывался с малоамплитудными афтершоками [6].

Обсуждение. За рубежом научные исследования изменений температуры подземных вод в результате землетрясений были начаты в конце XX века [7, 8], но лишь в последние годы, когда появились датчики непрерывного наблюдения за температурным режимом водоисточников, эти исследования стали более многочисленными и детальными [9]. Особого внимания заслуживают статьи, написанные после крупных землетрясений в Юго-Восточной Азии: в Китае (Вэньчуань) в 2008 году (M=7,9), в Японии (Кумамото) в 2016 году (M=7,0), в Южной Корее (Кенджу) в 2016 году (M=5,8), где были представлены результаты наблюдений за температурой в подземных скважинах. Анализ работ китайских [10, 11], корейских [12], японских ученых [13-15] показывает, что существует 4 варианта развития температурного режима в подземных водоисточниках: устойчивое повышение температуры после землетрясения (более 10 дней), устойчивое понижение температуры после землетрясения (более 10 дней), кратковременное косейсмическое падение, за которым вскоре следует восстановление исходных параметров, и кратковременное косейсмическое повышение, после которого происходит снижение температуры [9, 11]. Результаты термальных изменений подземных вод интерпретируются как показатели открытия закупоренных трещин и разломов, которые увеличивают проницаемость и поток между резервуарами с разными температурами [16, 17]. А дальнейшее постепенное снижение температуры объясняется уменьшением количества геотермальной воды в источнике вследствие продолжающегося осаднения препятствий в подземных переходах, которые медленно блокируют приток геотермальной воды [18]. В целом исследования влияния сейсмической активности на температурный режим подземных вод содержат интересную информацию о гидрогеологических процессах, так как датчики непрерывного слежения устанавливались на разных глубинах – 50 м, 100 м, 200 м и 300 м. В частности, в исследованиях было отмечено, что на глубине 100 м и ниже температура воды растет. Анализ литературы показывает, что высокоточные датчики, регистрируя колебания температуры даже в пределах 1°С, позволяют фиксировать изменения, вызванные

сотрясениями земной коры на расстоянии до 600 км [7, 8, 18, 19], причем эти изменения порой происходят за несколько месяцев до сейсмического события. Авторы предлагают сделать программу отслеживания температурных данных в скважинах обязательной, так как изменения температуры воды могут быть прогностическим признаком грядущего землетрясения [9]. Следует отметить, что за последние 20 лет количество природных катаклизмов в мире удвоилось, в том числе участились крупномасштабные бедствия, последствия от которых могут сказываться спустя десятилетия [20].

В Российской Федерации к зонам повышенной сейсмической активности относится около 40% территории, где проживает более 20 млн человек. Землетрясения наносят населению огромный урон. В частности, экономический ущерб от Чуйского землетрясения, несмотря на отсутствие людских потерь, составил более двух миллиардов рублей [21], поэтому очень важно выявлять предвестники землетрясений, к которым относятся уже упомянутые изменения физико-химических свойств подземных вод, а также аномальные изменения температуры подземных водоисточников. Это подтверждают недавние ежесуточные исследования, проведенные по инициативе специалистов Национального исследовательского Томского политехнического университета с 14.01.2021 по 24.03.2021 на НП «Северный», когда в зоне АСР произошло 5 сейсмических событий. Так, при непрерывных измерениях температуры воды и химических параметров было установлено, что за 6-7 дней до землетрясения повышаются температура и общая минерализация, за 3-4 дня до первых толчков эти параметры понижаются, а за 1-2 дня до сейсмического события опять повышаются, после землетрясения данные показатели снижаются и только на 4-5 день опять повышаются [22]. Замечено, что при сильных землетрясениях ($M > 7$) насыщенность подземных вод вторичными минералами увеличивается [23]. Кроме того, в подземных водах Республики Алтай в афтершоковый период установлено увеличение содержания гелия [21], который, по мнению отечественных и зарубежных исследователей, является индикатором зон разрывных нарушений [24-25]. Перечисленные факты подтверждают гипотезу подъема глубинных термальных вод во время сейсмических событий. Таким образом, подземные воды наблюдательного пункта чутко реагируют на изменения в земной коре еще в период подготовки землетрясения, а не только во время сейсмических событий или сразу после них.

Хотя в масштабах планеты косейсмические геотермальные изменения подземных вод – распространенное явление, в границах Республики Алтай описанные

примеры (НП «Северный», колонки по улице Осипенко, галечник с паром на территории ОАО «Аэропорт Горно-Алтайск») – уникальны. В целом описанный подъем температуры в колодце НП «Северный» в 2003 г. на 20-40°C и последующий длительный мониторинг за температурным режимом воды и химическим составом колодца (в течение 20 лет) показал важность подобных наблюдений для понимания гидрогеологических процессов при землетрясениях и прогнозирования активизации сейсмической деятельности в регионе.

Заключение. Исследование выявило косейсмические изменения температуры воды в трубчатом колодце НП «Северный» в г. Горно-Алтайске, связанные с энергией сейсмических событий в афтершоковый период Чуйского землетрясения (2004-2023 гг.). При корреляционном анализе по Пирсону между этими параметрами установлена статистически значимая сильная положительная связь при землетрясениях, зарегистрированных на территории Республики Алтай ($r=0,71$, $p<0,05$), и статистически значимая корреляционная положительная связь средней силы при землетрясениях с эпицентрами, находящимися на сопредельных территориях Алтае-Саянского региона ($r=0,58$, $p<0,05$). Аномальные изменения температурного режима подземных вод (наряду с мутностью, объемной активностью радона, химическим составом) могут служить индикаторами сейсмической активизации территории.

Учитывая опыт зарубежных ученых, пункты наблюдения в сейсмически активных регионах следует оснастить температурными датчиками непрерывного слежения, измеряющими данные на разных глубинах, а также усовершенствовать методику гидротермического мониторинга.

Список литературы:

1. Гольдин С.В., Селезнев В.С., Еманов А.Ф., Филина А.Г., Колесников Ю.И., Фатеев А.В., Лескова Е.В., Ярыгина М.А. Чуйское землетрясение и его афтершоки. Доклады Академии наук (Геофизика). 2004; Т. 395; 4: 61–67.
2. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В. Чуйское землетрясение и его афтершоковый процесс в структуре сейсмичности Алтае-Саянской горной области. Труды VI Российской национальной конференции по сейсмостойкому строительству и сейсмическому районированию. Сочи, 2005: 49–64.
3. Еманов А.Ф., Еманов А.А., Фатеев А.В., Соловьев В.М., Шевкунова Е.В., Гладышев Е.А. и др. Сейсмологические исследования на территории Алтае-Саянской горной области. Российский сейсмологический журнал. 2021; 3(2): 20–51. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02>
4. Кац В.Е., Шитов А.В., Драчев С.С. О механизмах изменения химического состава и температуры подземных вод в районе Горно-Алтайска. Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2010; 3: 207–212.

5. Киссин И.Г. Землетрясение и подземные воды. М.: Наука, 1982. 176 с.
6. Шитов А.В., Кац В.Е., Дутова Е.М., Молоков В.А., Покровский В.Д. Изменение химического состава подземных вод республики Алтай при землетрясениях. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). 2016; 327 (1): 19–29. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/8993>
7. Wang C.Y., Manga M. Earthquakes and Water. Lecture notes in earth sciences. 2010; 114: 218.
8. Ma Z., Fu Z., Zhang Y. et al. Earthquake prediction: nine major earthquakes in China (1966–1976). Seismological Press. Beijing, 1990: 332.
9. Wang C.Y., Manga, M. Groundwater Temperature. In: Water and Earthquakes. Lecture Notes in Earth System Sciences. Springer, Cham. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64308-9_8
10. He A., Singh R.P. Groundwater level response to the Wenchuan earthquake of May 2008. Geomatics. Nat Hazards Risk. 2019; 10: 336–352. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1523236>
11. He A., Singh R.P. Coseismic groundwater temperature response associated with the Wenchuan earthquake. Pure Appl. Geophys. 2020; 177: 109–120. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02097-4>
12. Lee S.H., Lee J.M., Yoon H. et al. Groundwater impacts from the M 5.8 earthquake in Korea as determined by integrated monitoring systems. Groundwater 2020. <https://doi.org/10.1111/gwat.12993>
13. Hosono T., Yamada C., Shibata T. et al. Coseismic groundwater drawdown along crustal ruptures during the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake. Water Resour Res. 2019; 55: 5891–5903. <https://doi.org/10.1029/2019WR024871>
14. Koizumi N., Minote S., Tanaka T. et al. Hydrological changes after the 2016 Kumamoto earthquake, Japan. Earth Planet Space. 2019; 71: 128. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1110-y>
15. Miyakoshi A., Taniguchi M., Ide K. et al. Identification of changes in subsurface temperature and groundwater flow after the 2016 Kumamoto earthquake using long-term well temperature-depth profiles. J Hydrol 2020; 582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124530>
16. Johnson H.P., Baross J.A., Bjorklund T.A. On sampling the upper crustal reservoir of the NE Pacific Ocean. Geofluid. 2006; 6:251–271.
17. Dziak R.P., Chadwick W.W., Fox C.G. et al. Hydrothermal temperature changes at the southern Juan de Fuca Ridge associated with M-w 6.2 Blanc transform earthquake. Geology. 2003; 31:119–122.
18. Mogi K., Mochizuki H., Kurokawa Y. Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes. Tectonophysics 1989; 159: 95–108.
19. Liu, Y., Zhang, F., Zhang, H., Xie, X., & Li, S. (2024). Characteristics of coseismic responses of groundwater level in Jiayi well, China. Geomatics, Natural Hazards and Risk 2024; 15 (1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2331018>
20. Kurt D. The financial effects of a natural disaster. Larger disasters have wreaked tens of billions of dollars in damage. Investopedia. N.Y., 2020 – 17.04. URL: <https://www.investopedia.com/financial-edge/0311/the-financial-effects-of-a-natural-disaster.aspx> (дата обращения: 14.10.2020).
21. 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): 651–663. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0497>
22. 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: 38–46. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/10/3784>
23. Копылова Г.Н., Гусева Н.В., Копылова Ю.Г., Болдина С.В. Химический состав подземных вод режимных водопроявлений Петропавловского геодинамического полигона, Камчатка:

типизация и эффекты сильных землетрясений. Вулканология и сейсмология. 2018; 4: 43–62. <https://doi.org/10.1134/S0203030618040041>

24. Семенов Р.М., Имаев В.С., Смекалин О.П., Чипизубов А.В., Оргильянов А.И. Гелий в глубинной воде Байкала – предвестник землетрясений. Доклады РАН. 2010; 432 (4): 533–536.
25. Sano Y., Takahata N., Kagoshima T., Shibata T., Onoue T., Zhao D. Groundwater Helium Anomaly Reflects Strain Change during the 2016 Kumamoto Earthquake in Southwest Japan. Scientific Reports 2016; 6: 37939. <https://doi.org/10.1038/srep37939>.

References:

1. Gol'din S.V., Seleznev V.S., Emanov A.F., Filina A.G., Kolesnikov Yu.I., Fateev A.V., Leskova E.V., Yarygina M.A. Chuy earthquake and its aftershocks. Doklady akademii nauk (Geofizika). 2004; 395 (4): 61–67. (In Russ).
2. Emanov A.F., Emanov A.A., Filina A.G., Leskova E.V. Chuya earthquake and its aftershock process within the structure of seismicity of the Altai-Sayan mountains. Trudy VI Rossiyskoy natsionalnoy konferentsii po seymostoykomu stroitelstvu i seymicheskomu rayoni rovaniyu [Proc. 6th Rus. Nat. Conf. on Earthquake Engin. And Seismic Zonation]. Sochi, 2005: 49–64. (In Russ).
3. Emanov A.F., Emanov A.A., Fateev A.V., Solovyev V.M., ShHevkunova E.V., Gladyshev E.A. et al. Seismological research in the Altai-Sayan mountain region. Rossijskij seismologicheskij zhurnal 2021; 3(2): 20–51. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.2.02> (In Russ).
4. Kats B.E., Shitov A.V., Drachev S.S. On the mechanisms of change in the chemical composition and temperature of groundwater in the Gorno-Altai region. Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya, gidrogeologiya, geokriologiya 2010; 3: 207-212. (In Russ).
5. Kissin I.G. The Earthquake and the Underground Water. Nauka, Moscow, 1982. 176 p. (in Russ)
6. Shitov A.V., Kats V.E., Dutova E.M., Molokov V.Y., Pokrovskiy V.D. Changes of Chemical Groundwater Composition in the Republic of Altai due to the Earthquakes. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering 2016; 327 (1): 19–29. URL: <http://earchive.tpu.ru/handle/11683/8993> (In Russ).
7. Wang C-Y., Manga M. Earthquakes and Water. Lecture notes in earth sciences, 2010; 114: 218.
8. Ma Z., Fu Z., Zhang Y. et al. Earthquake prediction: nine major earthquakes in China (1966–1976). Seismological Press. Beijing, 1990: 332.
9. Wang C.Y., Manga M. Groundwater Temperature. In: Water and Earthquakes. – Lecture Notes in Earth System Sciences. Springer, Cham. 2021. https://doi.org/10.1007/978-3-030-64308-9_8
10. He A., Singh R.P. Groundwater level response to the Wenchuan earthquake of May 2008. Geomatics. Nat Hazards Risk. 2019; 10: 336–352. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1523236>
11. He A., Singh R.P. Coseismic groundwater temperature response associated with the Wenchuan earthquake. Pure Appl. Geophys. 2020; 177:109–120. <https://doi.org/10.1007/s00024-019-02097-4>
12. Lee S.H., Lee J.M., Yoon H. et al. Groundwater impacts from the M 5.8 earthquake in Korea as determined by integrated monitoring systems. Groundwater 2020. <https://doi.org/10.1111/gwat.12993>

13. Hosono T., Yamada C., Shibata T. et al. Coseismic groundwater drawdown along crustal ruptures during the 2016 Mw 7.0 Kumamoto earthquake. *Water Resour. Res.* 2019; 55: 5891–5903. <https://doi.org/10.1029/2019WR024871>
14. Koizumi N., Minote S., Tanaka T. et al. Hydrological changes after the 2016 Kumamoto earthquake, Japan. *Earth Planet Space.* 2019; 71: 128. <https://doi.org/10.1186/s40623-019-1110-y>
15. Miyakoshi A., Taniguchi M., Ide K. et al. Identification of changes in subsurface temperature and groundwater flow after the 2016 Kumamoto earthquake using long-term well temperature-depth profiles. *J Hydrol.* 2020; 582. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124530>
16. Johnson H.P., Baross J.A., Bjorklund T.A. On sampling the upper crustal reservoir of the NE Pacific Ocean. *Geofluid.* 2006; 6: 251–271.
17. Dziak R.P., Chadwick W.W., Fox C.G. et al. Hydrothermal temperature changes at the southern Juan de Fuca Ridge associated with M-w 6.2 Blanc transform earthquake. *Geology.* 2003; 31:119–122.
18. Mogi K., Mochizuki H., Kurokawa Y. Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes. *Tectonophysics.* 1989; 159: 95–108.
19. Liu, Y., Zhang, F., Zhang, H., Xie, X., & Li, S. (2024). Characteristics of coseismic responses of groundwater level in Jiaji well, China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2024; 15 (1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2331018>
20. Kurt D. The financial effects of a natural disaster. Larger disasters have wreaked tens of billions of dollars in damage. *Investopedia.* N.Y., 2020 – 17.04. URL: <https://www.investopedia.com/financial-edge/0311/the-financial-effects-of-a-natural-disaster.aspx>
21. Dutova E.M., Kats V.E., Shitov A.V., Surnin A.I., Molokov V.A. Helium in groundwaters of the Altai Republic. *Geodynamics & Tectonophysics.* 2020; 11(3): 651-663. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-3-0497> (In Russ.)
22. Dutova E.M., Kac V.E., SHitov A.V., Surnin A.I., Drachev S.S. Results of short-term monitoring of helium content and generalized indicators in groundwater of the Altai Mountains. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesurov.* 2022; T. 333: 38–46. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/10/3784>
23. Kopylova G.N., Guseva N.V., Kopylova YU.G., Boldina S.V. Chemical composition of groundwater of regime water manifestations of the Petropavlovsk geodynamic test site, Kamchatka: typification and effects of strong earthquakes. *Vulkanologiya i seismologiya.* 2018; 4: 43–62. (<https://doi.org/10.1134/S0203030618040041>) (In Russ.)
24. Semenov R.M., Imaev V.S., Smekalin O.P., Chipizubov A.V., Orgilyanov A.I. Helium in the deep waters of Lake Baikal is a harbinger of earthquakes. *Doklady RAN.* 2010; 432 (4): 533-536. (In Russ).
25. Sano Y., Takahata N., Kagoshima T., Shibata T., Onoue T., Zhao D. Groundwater Helium Anomaly Reflects Strain Change during the 2016 Kumamoto Earthquake in Southwest Japan. *Scientific Reports* - 2016. 6, 37939. <https://doi.org/10.1038/srep37939>.

Поступила/Received: 25.07.2024

Принята в печать/Accepted: 10.09.2024