

УДК 556.314:556.535.8

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ РОДНИКОВ КАК ИНДИКАТОР ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННОЙ ЭВОЛЮЦИИ ГОРОДСКОЙ ЭКОСИСТЕМЫ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ТОМСКА, ЮГО-ВОСТОК ЗАПАДНОЙ СИБИРИ)

Пасечник Елена Юрьевна¹,
paseyu@yandex.ru

Льготин Виктор Александрович²,
mail@sfo.geomonitoring.ru

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Чилингер Лилия Наримановна¹,
lilichilinger@gmail.com

Хвощевская Альбина Анатольевна¹,
hvashevskaya@tpu.ru

Чжоу Дань¹,
929177582@qq.com

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

² филиал «Сибирский региональный центр Государственного мониторинга состояния недр», «Гидроспецгеология»,
Россия, 634061, г. Томск, ул. Никитина, 99.

Актуальность исследования определяется необходимостью комплексного использования родников в городской среде и целесообразности их использования как индикатора изменений ее природно-техногенных изменений. Такие исследования актуальны для территории г. Томска в условиях ограниченности имеющихся наблюдательных и эксплуатационных скважин, но большого количества родников в разных участках города, отражающих состояние зон питания и транзита подземных вод, формирующихся в различных условиях антропогенной нагрузки.

Цель исследования заключается в выявлении природно-антропогенных изменений химического состава родниковых вод как индикатора соответствующих изменений городской среды.

Объекты: родники на территории г. Томска (Западная Сибирь).

Методы: современные методы определения химического состава подземных вод, статистические методы.

Результаты. Выполнен анализ эколого-геохимического состояния родниковых вод на территории г. Томска (Западная Сибирь) в 2020–2021 гг. Показано, что самые высокие содержания растворенных солей обнаружены в родниковых водах на участке ниже по течению от устья р. Ушайки и в ее долине в результате антропогенных факторов и разгрузки подземных вод с минерализацией более 1 г/дм³, в том числе, с большой вероятностью, из меловых отложений Обь-Томского междуречья. На основе анализа выявлено, что к оказывающим влияние антропогенным факторам эволюции водных экосистем относятся не только загрязнение поверхности на промышленных площадях или инфильтрация поверхностного стока, включая продукты растворения и трансформации песко-соляной смеси для улучшения условий эксплуатации городских дорог, но и изменение интенсивности и структуры подземного водообмена вследствие строительства и эксплуатации свайных фундаментов, систем водоотведения и водоснабжения. Сделаны выводы о необходимости создания и анализа математической модели формирования подземного стока в г. Томске и на прилегающих территориях для проектирования и повышения эффективности существующих систем ливневой канализации, канализации хозяйственно-бытовых стоков, водо- и теплоснабжения, а также нецелесообразности использования родников г. Томска в качестве альтернативных источников водоснабжения вследствие особенностей химического состава их вод и факторов их формирования.

Ключевые слова:

Химический состав, родники, город Томск, Западная Сибирь, природно-антропогенные изменения городской среды.

Введение

Согласно [1], родники относятся к поверхностным водным объектам, но, по сути, они являются своеобразными природными сооружениями выхода на поверхность подземных вод в области их разгрузки [2–9]. Поэтому их можно рассматривать как индикаторы различных процессов, протекающих в пределах экосистем различного порядка, а если эти экосистемы пространственно совпадают с городами, то и в городской среде.

При этом нельзя не отметить и важный ландшафтно-архитектурный аспект функционирования родников в городах – создание либо положительного, либо негативного фона при оценке городской среды. Все это определяет актуальность изучения городских родников в целом, в том числе, и в г. Томске – крупном научно-промышленном центре Сибири. Летопись г. Томска, именно как города, ведет исчисление с 1604 г., но фактическая история поселения в границах современного

Томска гораздо древнее [10], что в какой-то мере отразилось в топонимике города и пригородной территории (Тахтамышцево, Эушта, Киргизка и т. д.).

На протяжении всей истории поселения население (во всем его этническом разнообразии) весьма активно использовало родники. Однако определенные изменения химического состава родниковых вод наблюдаются из информации в первых опубликованных сведениях, например, в публикациях Томского императорского университета [11]. В XX в. и начале XXI в. исследованиями родников г. Томска и прилегающих территорий активно занимались сотрудники кафедры гидрогеологии и инженерной геологии (впоследствии кафедры гидрогеологии, инженерной геологии и гидрогеоэкологии) Томского политехнического института – ТПИ (впоследствии ТПУ). Прежде всего, это доцент, к.г.-м.н. А.Д. Назаров, приложивший максимум усилий не только к изучению, но и к обустройству родников г. Томска [12]. Значительный вклад в научные исследования родниковых и в целом подземных вод Томска также внесли Ю.Г. Копылова, Н.Г. Наливайко, К.И. Кузеванов, Н.А. Ермашова, Д.С. Покровский, Е.Ю. Пасечник, А.А. Хвасцевская, Е.М. Дутова, Н.М. Шварцева, Е.Г. Вертман, О.Е. Лепкурова и целый ряд других сотрудников, аспирантов и студентов ТПУ, а также Томского государственного (ТГУ) и архитектурно-строительного (ТГАСУ) университетов [13–19]. Исключительно важное значение в изучении химического состава и качества подземных вод района исследований имеют работы в составе государственного мониторинга геологической среды на территории Сибирского федерального округа, осуществляемого сотрудниками Сибирского регионального центра (СРЦ) ФГБУ «Гидроспецгеология», ранее – АО «Томскгеомониторинг», а еще ранее – Томской геолого-разведочной экспедиции (В.А. Лыготин, Ю.В. Макушин, Г.Л. Плевако, В.П. Шинкаренко, А.А. Балобаненко и многие другие) [20].

Благодаря такому вниманию получена общая картина изменения химического и микробиологического состава воды родников на территории Томска и пригорода, причем во многих случаях отмечена связь между повышенными значениями гидрогеохимических и микробиологических показателей и антропогенными факторами [15, 16, 18, 20]. Однако остается не совсем понятным характер пространственно-временных изменений по территории минерализации и химического состава родниковых вод, их сопряженности с потенциальными источниками загрязнения. Например, в районе ул. Дальне-Ключевской (северная часть г. Томска, пер. Тихий (точка 4а, рис. 1) и Островского (6а), ул. Чехова (5а) на относительно небольшой территории отмечаются заметные различия минерализации родниковых вод (более 300 мг/дм³), а значения сухого остатка более 1 г/дм³, по данным проф. Лемана [11], в пределах современных Октябрьского и Кировского районов г. Томска были отмечены еще в 1889 г.

С учетом этого авторами в 2021 г. принята попытка рассмотреть химический состав родниковых вод как индикатора не только антропогенных, но и природных процессов, а точнее – природно-антропогенных,

поскольку в настоящее время различия между ними в условиях крупного города минимальны.

Исходная информация и методика исследования

В соответствии с указанной выше целью были поставлены две основные задачи – выявление закономерностей и факторов пространственного изменения химического состава подземных вод территории г. Томска. Для их решения были собраны материалы о химическом составе подземных вод на территории г. Томска и прилегающих территорий [15, 16, 18–24], в 2020–2021 гг. отобраны пробы родниковых вод в пунктах, приведенных на рис. 1 (отбор проб выполняли Е.Ю. Пасечник, Л.Н. Чилингер), в аккредитованной гидрогеохимической лаборатории ТПУ проведено определение химического состава: рН – потенциометрический метод; перманганатная (РО) и бихроматная (ВО) окисляемость; содержания Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , CO_2 – титриметрический; SO_4^{2-} – турбидиметрический; NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , $\text{Fe}^{\text{общ}}$, Si – фотометрический, ионная хроматография; Na^+ , K^+ – пламенно-эмиссионный, ионная хроматография; нефтепродукты (НП) – флуориметрический. При отборе проб были учтены требования [6, 9, 25, 26]. Полученные данные сопоставлялись с дебитами (расходами) воды родников, измеренными объемным способом, проводился их статистический анализ и термодинамические расчеты.

Статистический анализ включал расчет статистических параметров и погрешностей их определения, включая погрешности определения среднего арифметического (1) и коэффициентов корреляции (2), а также выявление регрессионных зависимостей. Корреляционные связи считались значимыми (с уровнем значимости 5 %) при выполнении условия (3), а регрессионные зависимости – при одновременном выполнении условий (4) и $R^2 > 0,36$ (R – корреляционное отношение, связанное с критерием Росгидромета:

$R^2 = 1 - \left(\frac{SS}{\sigma}\right)^2$, где SS – среднее квадратическое отклонение вычисленных значений от измеренных; σ – среднее квадратическое отклонение):

$$\delta_A \approx \frac{\sigma}{\sqrt{N}}, \quad (1)$$

$$\delta_r \approx \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}}, \quad (2)$$

$$|r| \geq 2 \cdot \delta_r, \quad (3)$$

$$|k_{r,j}| \geq 2 \cdot \delta_{k,j}, \quad (4)$$

где δ_A , δ_r и $\delta_{k,j}$ – погрешности определения среднего арифметического A , коэффициента корреляции r и коэффициента регрессии $k_{r,j}$; N – объем выборки; σ – среднее квадратическое отклонение.

Термодинамические расчеты заключались в расчете индексов насыщения SI родниковых вод относительно ряда минералов (5) методом констант с использованием уравнения Дэвиса для определения коэффициентов активности частиц согласно [28]:

$$SI = \lg \text{ПА} - \lg K_{\text{neq}}, \quad (5)$$

где ПА – произведение активностей группы веществ; K_{neq} – константа неустойчивости.

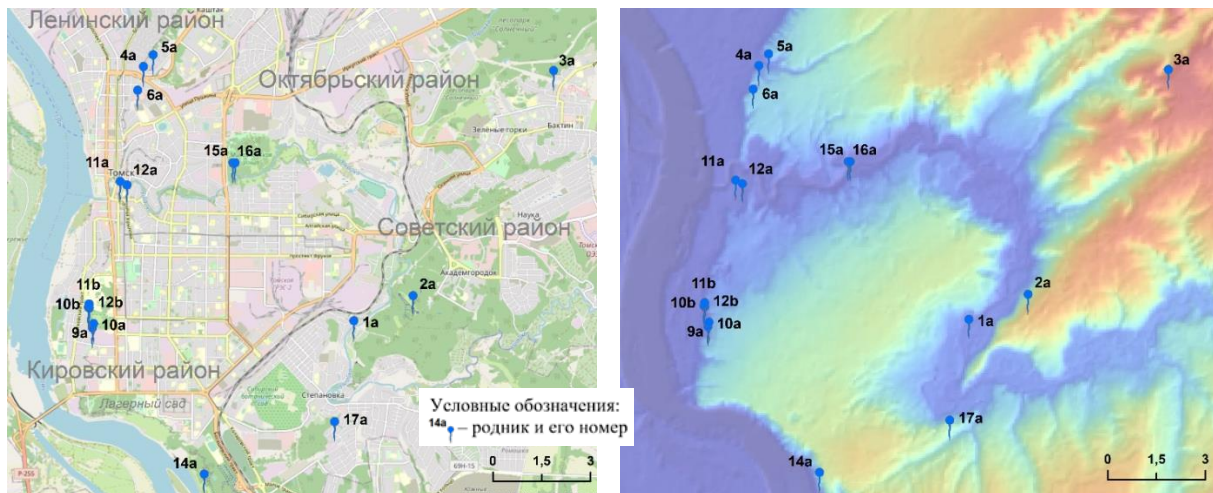


Рис. 1. Схема размещения пунктов отбора проб родников г. Томска (номера пунктов приведены в табл. 1); использован градостроительный атлас города Томска [27]

Fig. 1. Layout of sampling points of springs in Tomsk (numbers of points are given in Table 1); urban atlas of the city of Tomsk is used [27]

Результаты исследования и их обсуждение

Рассматриваемая территория расположена на границе гидрогеологических структур I порядка – Западно-Сибирского артезианского бассейна (ЗСАБ) и Алтае-Саянской гидрогеологической складчатой области (АСГСО), причем в общих чертах эта граница соответствует долине р. Томи. Гидрогеологические условия в пределах обеих структур характеризуются наличием двух гидрогеологических этажей. В границах г. Томска верхний этаж в обоих случаях представляет собой толщу отложений четвертичного, неогенового, палеогенового и мелового возраста, к которым приурочены безнапорные и напорные подземные воды. На левом берегу р. Томи (со стороны ЗСАБ) в основании этой толщи расположен региональный водоупор верхнемелового-палеогенового возраста, на правом – палеозойские образования.

Рассмотренные авторами родники на территории г. Томска расположены на правом берегу р. Томи. Родники 1а, 2а, 11а, 12а, 15а, 16а, 17а приурочены к долине р. Ушайки, родник 3а – к долине притока р. Ушайки, что позволяет их сгруппировать в комплекс № 1 (табл. 1). Прочие родники – в долине р. Томи, в том числе: 14а – на участке от р. Басандайки до территории Лагерного сада, к которому приурочен выход палеозойских (карбонатных) образований на поверхность в русле и пойме р. Томи (мыс «Боец»), выше по течению от противооползневых сооружений (комплекс № 2); 9а, 10а, 11а, 10б, 11б, 12б – на участке от Лагерного сада до устья р. Ушайки, вблизи озера Университетского (комплекс № 3); 4а, 5а, 6а – на участке от устья р. Ушайки до устья р. Киргизки (комплекс № 4). На двух последних участках (комплексы № 3, 4) ряд водоемов и водотоков были на протяжении XX в. засыпаны грунтом (например, водоток в районе Томского государственного университета или водотоки и водоемы в районе родников 4а, 5а, 6а).

По минерализации и химическому составу (согласно [29]) воды комплекса родников № 1 по состо-

янию на 2020–2021 гг. солоноватые и пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые первого, второго и третьего типов, по pH (согласно [30]) – нейтральные; воды комплекса № 2 без явного загрязнения – пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые I типа, нейтральные; воды комплекса № 3 – солоноватые и пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые II и III типов, нейтральные и слабощелочные; воды комплекса № 4 – солоноватые, гидрокарбонатные кальциевые III типа, нейтральные. Все изученные родниковые воды способны растворять альбит и анортит, но близки к равновесию или пересыщены относительно кварца, кальцита, доломита и ряда глинистых минералов (рис. 2).

В сравнении с подземными водами прилегающих территорий изученные родники в составе комплекса № 4 ближе всего по составу к водам верхнемеловых отложений Обь-Томского междуречья (с учетом значений общей минерализации более 1,0–1,5 г/дм³ [20, 21, 23]). В прочих случаях имеет место смешение верховодки, грунтовых вод четвертичных отложений, подземных вод в отложениях палеогена и зоны трещиноватости в палеозойских образованиях (табл. 1, 2). Загрязнение подземных вод, с учетом данных [20, 21], проявляется в повышении значений перманганатной и бихроматной окисляемости, суммы главных ионов и концентраций SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , фосфатов (табл. 1). По сочетанию этих признаков (например, концентраций $\text{NO}_3^- > 40$ мг/дм³, $\text{BO} > 5$ мгО/дм³, $\text{SO}_4^{2-} > 60$ мг/дм³ и др.) к явно загрязненным можно отнести родники комплекса № 4 в северной части г. Томска (4а, 5а, 6а) и часть родников комплекса № 1 в долине р. Ушайки (11а, 12а, 1а).

Согласно [19, 20, 24, 31] и с учетом указанных выше особенностей химического состава вод г. Томска и прилегающих территорий, все изученные родники могут соответствовать зонам разгрузки техногенной верховодки, безнапорных и слабонапорных грунтовых вод из отложений неоген-четвертичного

возраста, напорных вод палеогеновых отложений и подземных вод зоны трещиноватости. Кроме того, судя по опубликованным геологическим и гидрогеологическим разрезам [14, 31], в районе размещения комплекса родников № 4, где наблюдается заметное расширение правобережной части поймы р. Томи, предположительно, возможна разгрузка напорных вод из палеогеновых и верхнемеловых отложений с областью питания, в том числе, на левом берегу р. Томи. Области питания подземных вод в родниках комплексов № 1–3 находятся на правом берегу р. Томи, причем их границы с определенной вероятностью выходят за пределы административных границ г. Томска.

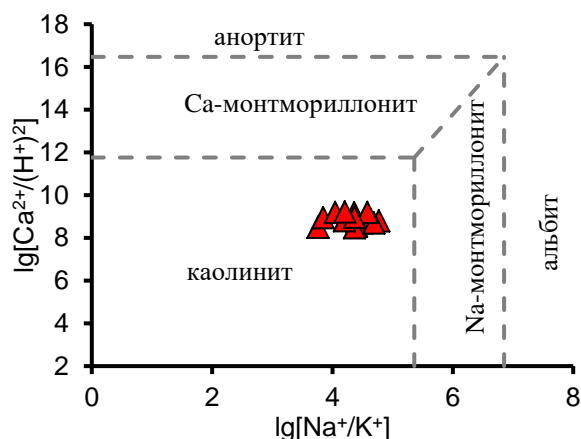


Рис. 2. Система $HCl-H_2O-Al_2O_3-CO_2-CaO-SiO_2-Na_2O$ при $25^\circ C$, $lg[H_4SiO_4] = -3,5$ и $P_{CO_2}=101,5$ Па с нанесением данных по составу вод (табл. 1)

Fig. 2. System $HCl-H_2O-Al_2O_3-CO_2-CaO-SiO_2-Na_2O$ at $25^\circ C$, $lg[H_4SiO_4] = -3,5$ and $P_{CO_2}=101,5$ Pa with drawing data of waters (Table 1)

Особо следует отметить комплекс на участке от устья р. Басандайки до территории Лагерного сада, где общий расход источников и дренажных сооружений противооползневого комплекса, по данным АО «Томскгеомониторинг», в 2004 г. составлял в среднем за апрель–октябрь 9,2 л/с при максимальном среднемесячном расходе 11,7 л/с в мае. Если предположить, что в марте расход воды исчезающе мал (приравнен к нулю), то средний годовой расход может быть оценен в размере 6,4 л/с. По данным [32], среднепогодное значение подземной составляющей водного стока р. Басандайки составляет 0,6 м³/с, или 1,49 л/(с·км²). Если предположить (с учетом высотных отметок и ливневой канализации), что водосбор дренажных сооружений в районе Лагерного сада ограничен ул. Нахимова и площадью Южной, то тогда его площадь составляет примерно 1,2 км². Но при модуле подземного стока 1,49 л/(с·км²) это соответствует расходу 1,8 л/с, а не 6,4 л/с. Если использовать данные по р. Ушайке (модуль подземного стока 0,95 л/(с·км²) [32]), то разница будет еще больше – 5,2 л/с.

Следовательно, либо на данной территории (в Кировском районе г. Томска) расположен дополнительный источник питания подземных вод (около 400 м³/сут), либо фактическая площадь области питания составляет более 4 км², а ее границы достигают поселка Зональная

станция, расположенного на юго-востоке от представленной на рис. 1 территории, либо имеют место оба варианта (дополнительное водное питание менее 400 м³/сут при площади более 1,2 км²). Поскольку измеренный общий сток в Лагерном Саду (от 11,7 л/с в июле до 5,9 л/с в октябре) имеет ярко выраженное сезонное изменение, связанное, скорее, не с утечками из водоводов, а с таянием сезонных снегов, и вряд ли существует переток из Томи (с учетом геологического строения и рельефа), то более вероятной представляется гипотеза о подземном водосборе (сочетании области питания и распространения), вытянутом вдоль р. Томи до пос. Зональная станция, возможно, до пос. Предтеченск. Хотя, безусловно, нельзя исключать и влияние потерь при водоснабжении и водоотведении [33].

Безусловно, оптимальным способом достижения поставленной выше цели и сопряженных с ней задач было бы составление и анализ гидрогеологической модели г. Томска. К сожалению, имеющаяся гидрогеологическая информация, ввиду сложного геологического строения городской территории и специфики ее застройки, сопровождавшейся перестраиванием гидрографической сети, пока не позволяет построить такую модель в целом и достоверно количественно оценить границы областей питания подземных вод в частности. С учетом этого авторами (принимая во внимание требования [34]) предпринята попытка определить площади хотя бы поверхностных водосборов родников (табл. 1) и сопоставить их с наблюдаемыми значениями гидрогеохимических показателей.

Полученные при этом результаты анализа многолетних данных по составу вод в целом позволяют говорить о статистически значимом увеличении суммарного содержания растворенных солей, бихроматной окисляемости и нитратов в родниковых водах при росте площади поверхностного водосбора А (табл. 3). С большой вероятностью, в условиях северо-западной части АСГСО это указывает на увеличение дренируемости территории при увеличении величины А в случае суммы главных ионов, концентраций Ca^{2+} , Mg^{2+} , а в случае Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , BO^- – предположительно, на вынос с городской территории песко-соляной смеси, органических остатков и продуктов их трансформации после дождей и в период снеготаяния.

Менее очевидна связь гидрогеохимических показателей с дебитами родников, хотя, согласно [22, 29, 35, 36], обычно наблюдается обратная связь вследствие увеличения времени взаимодействия горных пород с водой и, как следствие, роста минерализации вод при снижении интенсивности водообмена. Тем не менее отмеченный выше факт имеет вполне понятные объяснения, приведенные в [37], в соответствии с которыми изменение концентрации C в зависимости от расхода воды Q описывается следующим образом в формулах (6), (7):

$$\frac{dC}{dQ} = k_Q \cdot \frac{C}{Q}, \quad (6)$$

$$k_Q = k_0 + k_1 \cdot \left(\frac{Q}{Q_0}\right)^{k_2}, \quad (7)$$

$$Y = X^{k_0} \cdot \exp\left(\frac{k_1}{k_2} \cdot (X^{k_2} - 1)\right), \quad (8)$$

где k_Q , k_0 , k_1 , k_2 – эмпирические коэффициенты; $Y=C/C_0$ и $X=Q/Q_0$ – модульные коэффициенты концентрации и расхода воды; C_0 и Q_0 – математическое ожидание концентрации вещества и расхода воды.

Таблица 1. Площади поверхностных водосборов (A), дебиты родников (q), pH и химический состав родниковых вод в г. Томске 01.10.2020 г. (10b, 11b, 12b) и 23.06.2021 г. (1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 6a, 11a, 12a, 9a, 10a, 14a, 15a, 16a, 17a)

Table 1. Surface catchment areas (A), flow rates of springs (q), pH and chemical composition of spring waters in Tomsk 01.10. 2020 (10b, 11b, 12b) and 23.06.2021 (1a, 2a, 3a, 4a, 5a, 6a, 11a, 12a, 9a, 10a, 14a, 15a, 16a, 17a)

Комплекс/Complex	Номер (рис. 1) Number (Fig. 1)	Наименование родника, привязка Spring name, binding	A, км ² /km ²	q, л/с/l/s	pH, ед. pH/un. pH	CO ₂	S(mi)	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Фосфаты Phosphates	Si	Fe	НП	ПО	БО	Классификация* Classification*
						мг/дм ³ mg/dm ³									мгО/дм ³ mgO/dm ³		
1	1a	Без названия, ул. Михаила Сычева, 40 Untitled, st. Mikhail Sychev, 40	0,90	0,39	7,36	15,8	887,4	81,0	29,0	37,00	0,03	8,13	0,015	0,007	0,84	8,43	C-Ca-III
1	2a	Родник Ближний, Академгородок Spring Blizhny, Akademgorodok	0,10	0,05	7,20	7,0	350,7	14,0	1,7	0,84	0,03	6,40	0,058	0,003	0,54	1,73	C-Ca-I
1	3a	Без названия, ул. Ивановского Untitled, st. Ivanovsky	0,50	0,14	7,27	10,6	594,3	7,2	43,0	39,20	0,23	7,84	0,010	0,004	0,72	3,01	C-Ca-III
1	17a	Родник «Весенний» Spring «Vesenny»	0,17	нд	7,43	8,8	630,3	5,1	5,3	0,20	0,12	7,55	0,045	0,002	0,94	2,99	C-Ca-II
1	15a	Родник Ключевской, Михайловская роща 1 Spring «Klyuchevskoy», Mikhailovskaya Roscha 1	0,52	0,06	7,12	31,7	981,3	56,0	74,7	40,90	0,06	10,16	1,810	0,004	0,88	2,10	C-Ca-II
1	16a	Родник Ключевской, Михайловская роща 2 Spring «Klyuchevskoy», Mikhailovskaya Roscha 2	0,52	0,09	7,22	17,6	922,1	67,0	53,0	56,00	0,03	9,88	0,040	0,004	0,72	2,39	C-Ca-III C
1	11a	Родник «Магистратский» Spring «Magistratsky»	0,87	0,11	7,12	35,0	1250,4	68,0	121,0	132,00	0,20	10,30	0,130	0,008	2,36	8,33	C-Ca-III
1	12a	Родник «Святой ключ» Spring «Svyatoy klyuch»	0,87	0,15	7,09	31,7	1205,2	91,0	73,0	167,00	0,05	9,02	0,021	0,003	1,68	5,38	C-Ca-III
2	14a	Родник «Людмилин ключ», Буревестник Spring «Lyudmilin Klyuch», Burevestnik	0,10	нд	7,47	7,0	501,1	5,1	21,8	27,30	0,26	8,43	0,330	0,003	0,38	1,45	C-Ca-I
3	9a	Родник «Университетский» Spring «Universitetsky»	0,15	0,72	7,06	14,0	750,0	62,0	35,0	39,00	0,33	10,10	0,120	0,022	1,14	1,52	C-Ca-II
3	10a	Родник «Ренкуль», Ботанический Spring «Renkul», Botanical	0,14	нд	7,38	17,6	796,2	68,0	40,0	25,50	0,50	9,87	0,260	0,004	0,82	1,68	C-Ca-II
3	10b	Родник «Флоринский» Spring «Florinsky»	0,12	нд	8,10	1,5	743,9	59,0	45,0	5,20	нд	нд	0,550	нд	3,28	нд	C-Ca-III
3	11b	Родник «Святой Анны» Spring «St. Anna»	0,20	нд	7,95	5,3	764,3	56,0	60,0	9,30	нд	нд	0,170	нд	1,42	нд	C-Ca-III
3	12b	Родник «Дионисия» Spring «Dionisiya»	0,07	нд	7,50	40,1	674,0	53,0	23,0	22,80	нд	нд	0,210	нд	1,88	нд	C-Ca-III
4	4a	Родник «Дальний ключ», пер. Тихий Spring «Dalny Klyuch», Lane Tikhii	2,00	1,15	7,04	19,4	1533,7	130,0	95,0	59,50	0,09	9,38	0,035	0,005	1,92	12,40	C-Ca-III
4	5a	Без названия, пер. Чехова Untitled, Chekhov Lane	0,40	1,18	7,09	22,9	1192,3	77,0	179,0	82,00	0,07	11,06	0,068	0,004	0,82	1,04	C-Ca-III
4	6a	Божья роса, пер. Островского God's dew, Ostrovsky lane	0,20	0,28	7,02	22,9	1066,1	69,0	60,0	94,60	0,13	10,10	0,081	0,003	1,18	7,85	C-Ca-III

Примечание: S(mi) – сумма главных ионов (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻); ПО и БО – перманганатная и бихроматная окисляемость; НП – нефтепродукты; «нд» – отсутствие данных; * классификация по О.А. Алекину [29].
Note: S(mi) – sum of the main ions (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, HCO₃⁻, CO₃²⁻, SO₄²⁻, Cl⁻); PO and BO – permanganate and bi-chromate oxidizability; NP – petroleum products; «nd» – no data; * classification by O.A. Alekin [29].

Таблица 2. Средние арифметические значения (A) концентраций главных ионов, Fe и погрешности их определения (δ_A) в подземных водах АСГСО и прилегающих районов ЗСАБ, мг/дм³

Table 2. Arithmetic mean values (A) of the concentrations of the main ions, Fe and the errors of their determination (A) in the groundwater of the Altai-Sayan hydrogeological fold region and adjacent regions of the West Siberian artesian basin, mg / dm³

Возраст Age	Показатель Indicator	$S(mi)$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$Na^{+}+K^{+}$	HCO_3^{-}	Cl^{-}	SO_4^{2-}	Fe
Бассейн Верхней Оби/Upper Ob basin [24]									
Q	A δ_A	371,3 37,7	59,1 6,7	19,4 4,9	22,3 5,0	247,4 23,0	13,7 3,5	20,9 7,0	1,666 0,384
P	A δ_A	555,4 46,4	79,4 9,6	20,8 2,9	32,8 11,0	365,9 25,1	19,5 5,2	38,3 16,9	0,830 0,297
K	A δ_A	410,7 49,8	58,0 13,1	8,1 1,6	42,0 5,9	301,3 31,4	5,7 1,7	7,2 2,2	– –
C	A δ_A	477,7 38,9	77,7 5,4	20,2 4,4	11,0 2,4	350,8 26,5	3,7 0,7	10,2 2,6	0,293 0,108
D	A δ_A	398,0 94,4	64,9 12,5	15,7 4,1	28,0 10,8	242,1 38,9	15,1 7,6	64,4 37,9	0,588 0,230
Водосбор р. Томи/Catchment of the Tom river [19]									
верховодка top water	A δ_A	60,3 12,5	7,3 1,5	2,3 0,4	4,1 0,5	42,4 12,4	0,5 0,02	3,7 0,3	0,155 0,038
аллювиальные воды alluvial waters	A δ_A	149,0 30,1	19,8 6,0	5,3 0,9	9,2 2,4	92,4 28,5	10,1 4,7	12,2 5,6	0,542 0,170
Q	A δ_A	266,0 34,7	44,8 10,1	5,1 1,0	19,9 7,3	173,2 32,0	12,4 3,6	10,6 3,7	1,194 0,475
зона трещиноватости fractured zone	A δ_A	733,9 22,0	56,6 6,0	11,5 1,0	19,4 2,6	318,5 20,3	318,5 4,9	9,4 1,8	0,593 0,197
Томское месторождение пресных подземных вод/Tomsk fresh groundwater deposit [23]									
верховодка top water	A	371,2	63,3	9,4	29,8	244,2	19,5	5,0	2,200
N+Q	A	397,6	69,0	10,2	9,4	304,8	3,8	0,4	4,200
P	A	457,1	75,8	14,5	15,6	345,0	6,2	nd	4,400
K (без аномально высоких значений) K (no abnormally high values)	A	725,7	50,1	28,8	138,9	302,9	205,0	0,0	4,800

Таблица 3. Значимые коэффициенты корреляции между площадью поверхностных водосборов и гидрогеохимическими показателями родников и погрешности их определения

Table 3. Significant coefficients of correlation between the area of surface watersheds and hydrogeochemical indicators of springs and errors in their determination

Показатель Index	Коэффициент корреляции r Correlation coefficient r	Погрешность определения коэффициента корреляции δ_r Correlation coefficient determination error δ_r
EC	0,65	0,15
$S(mi)$	0,77	0,10
Ca^{2+}	0,74	0,11
Mg^{2+}	0,62	0,16
Na^{+}	0,50	0,19
HCO_3^{-}	0,82	0,08
SO_4^{2-}	0,69	0,13
Cl^{-}	0,43	0,20
NO_3^{-}	0,45	0,20
БО*/ВО*	0,81	0,09

Примечание: $S(mi)$ – сумма главных ионов; EC – удельная электропроводность; БО* – бихроматная окисляемость в 14 пробах в 2021 г.; для прочих показателей использовались данные 17 измерений в 2020 и 2021 гг.

Note: $S(mi)$ is the sum of the main ions; EC – electrical conductivity; BO* – dichromate oxidizability in 14 samples in 2021; for other indicators, data from 17 measurements in 2020 and 2021 were used.

Общий смысл зависимости (8) заключается в том, что наиболее значительные изменения химического

состава речных вод приурочены к очень малым значениям модулей водного стока, характерным для начальных стадий формирования склонового, подповерхностного и подземного стока. В частности, для родников г. Томска этот диапазон ограничен значениями дебитов до 0,10–0,15 л/с, свыше которых связь с суммой главных ионов приобретает достаточно привычный характер обратной степенной зависимости (рис. 3).

Некоторое исключение при этом составляют только два родника из комплекса № 4, данные по которым, тем не менее, укладываются в общую зависимость увеличения с ростом площади поверхностного водосбора (рис. 3). Наиболее очевидное объяснение указанных выше фактов заключается в увязке повышением содержания растворенных солей с загрязнением подземных вод, особенно с учетом данных [11] за 1889 г. о сухом остатке родника «Дальний» (родник 4а на пер. Тихом, рис. 1, табл. 1) в 511 и 514 мг/дм³ (21.01.1889 и 25.06.1889 гг. по старому стилю). Сумма главных ионов $S(mi)$ связана с величиной сухого остатка CO регрессионной зависимостью $S(mi)=1,44 \cdot CO-21,52$ (корреляционное отношение $R^2=0,79$), что соответствует значениям $S(mi)$, равным 714,3 и 718,6 мг/дм³, соответственно. Но все это означает, что за последние 132 года (при условии неизменного дебита 1,15 л/с) ионный сток увеличился более чем на 29 тыс. т, а при равномерном увеличении выноса – на 224 т ежегодно. В водосбор родника № 4а возможно поступление сточных вод ливневой кана-

лизации и ряда предприятий, но на территории г. Томска не зафиксированы источники загрязнения подобной интенсивности. Обычно среднегодовая ми-

нерализация сточных вод, поступающих в водные объекты в бассейне р. Томи, не превышает 800 мг/дм^3 [38].

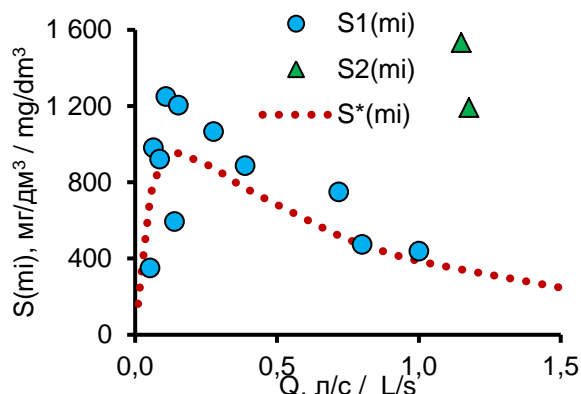


Рис. 3. Изменение суммы главных ионов $S(mi)$ в пробах родниковых вод в зависимости от дебита родников Q : $S2$ – пробы из родников 4а и 5а; $S1$ – пробы из прочих родников; $S^*(mi)$ – расчет по модели (8) с параметрами: $C_0=811,0 \text{ мг/дм}^3$; $Q_0=0,34 \text{ л/с}$; $k_0=7,515$; $k_1=-7,922$; $k_2=0,066$; $R^2=0,46$

Fig. 3. Change in the sum of the main ions $S(mi)$ in samples of spring waters depending on the flow rate of springs Q : $S2$ – samples from springs 4a and 5a; $S1$ – samples from other springs; $S^*(mi)$ – calculation according to model (8) with parameters: $C_0=811,0 \text{ мг/дм}^3$; $Q_0=0,34 \text{ л/с}$; $k_0=7,515$; $k_1=-7,922$; $k_2=0,066$; $R^2=0,46$

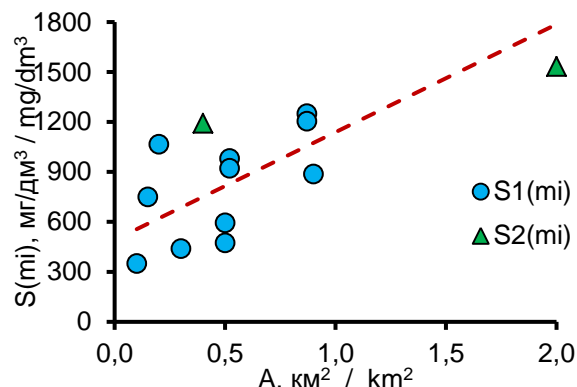


Рис. 4. Изменение суммы главных ионов $S(mi)$ в пробах родниковых вод в зависимости от площади поверхностного водосбора A : $S2$ – пробы из родников 4а и 5а; $S1$ – пробы из прочих родников; пунктиром показано уравнение регрессии: $S(mi)=(491,54\pm 161,56)+(647,11\pm 285,32)\cdot A$; $R^2=0,36$; $N=11$ (без родников 4а и 5а); с родниками 4а и 5а ($N=13$): $S(mi)=(595,70\pm 121,11)+(498,42\pm 157,50)\cdot A$; $R^2=0,48$

Fig. 4. Change in the sum of the main ions $S(mi)$ in the samples of spring waters depending on the area of the surface catchment A : $S2$ – samples from springs 4a and 5a; $S1$ – samples from other springs; the dotted line shows the regression equation: $S(mi)=(491,54\pm 161,56)+(647,11\pm 285,32)\cdot A$; $R^2=0,36$; $N=11$ (without springs 4a and 5a); with springs 4a and 5a ($N=13$): $S(mi)=(595,70\pm 121,11)+(498,42\pm 157,50)\cdot A$; $R^2=0,48$

Более обоснованной, на наш взгляд, является гипотеза о перераспределении поверхностных и подземных потоков при строительстве и эксплуатации свайных фундаментов, дорожной сети, систем водоотведения и водоснабжения, в результате чего существующий родник стал местом разгрузки подземных вод с большей территории и более глубоких горизонтов с соленоватыми подземными водами. Прямых доказательств нет, но еще в 1889 г. в родниках и колодцах в долине рек Томи и Ушайки отмечены значения сухого остатка $1267,0$ и $1792,5 \text{ мг/дм}^3$. При этом окисляемость воды в первом случае составила $10,8 \text{ мгО/дм}^3$, а во втором – «следы» [11]. В качестве косвенного доказательства можно указать на точку с суммой главных ионов $1533,7 \text{ мг/дм}^3$, соответствующую на рис. 4 роднику 4а. Также следует добавить, что в долине р. Ушайки обнаружены выходы радона и ряд других достаточно важных геохимических показателей [14, 39], свидетельствующих о возможности антропогенного изменения системы подземного водообмена на фоне, безусловно, имеющего место загрязнения подземных вод [40, 41].

Заключение

Самые высокие содержания растворенных солей обнаружены в родниковых водах на участке ниже по течению от устья р. Ушайки и, собственно, в долине

р. Ушайки в результате совместного влияния антропогенных факторов и разгрузки подземных вод с минерализацией более 1 г/дм^3 , в том числе, с большой вероятностью, – из меловых отложений Обь-Томского междуречья. Антропогенные факторы эволюции водных экосистем – не только загрязнение поверхности на промышленных площадях или инфильтрация поверхностного стока, включая продукты растворения и трансформации песко-соляной смеси для улучшения условий эксплуатации городских дорог, но и изменение интенсивности и структуры подземного водообмена вследствие строительства и эксплуатации свайных фундаментов, систем водоотведения и водоснабжения. В частности, судя по полученным данным, в XX в. произошло вовлечение в разгрузку подземных вод в северной части г. Томска в районе ул. Дальне-Ключевской с большей площади и из более глубоких горизонтов. В долине р. Ушайки всегда существовали выходы подземных вод с повышенным содержанием ряда химических элементов, но за последние 100–150 лет очевидно поступление в подземные водоносные горизонты органических и биогенных веществ с коммунально-бытовыми стоками. Весьма неоднозначная ситуация выявлена в районе Лагерного сада, где функционирует система противоползневых сооружений. Представляется, что на

склоне Лагерного Сада вероятно разгрузка большого объема стока с водосбора, границы которого могут достигать поселка Предтеченск, а также потерь из систем водоснабжения и водоотведения.

Для предотвращения и снижения негативного антропогенного воздействия на подземные воды на территории г. Томска необходимо создание и анализ математической модели [42, 43] формирования подземного стока самого города и прилегающих территорий, соответствующих областям питания водоносных горизонтов. Такая модель поможет при проектировании и повышении эффективности существующих систем

ливневой канализации, канализации хозяйственно-бытовых стоков, водо- и теплоснабжения. Использование родников для питьевого водоснабжения, вследствие особенностей химического состава их вод и факторов их формирования, невозможно. Целесообразно, вполне логично и эффективно для решения культурно-бытовых задач города [12] применять решения с включением родников в проекты благоустройства территории.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-55-80015.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водный кодекс Российской Федерации: федеральный закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ. С изменениями на 02.07.2021 г. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (дата обращения 15.01.2022).
2. Шварцев С.Л. Общая гидрогеология. – М.: Альянс, 2012. – 600 с.
3. Hölting B., Coldewey W.G. Hydrogeology. – Berlin, Germany: Springer, 2019. – 357 p.
4. Hiscock K.M., Bense V.F. Hydrogeology: principles and practice. – New York City: John Wiley & Sons, 2021. – 768 p.
5. Handbook of vadose zone characterization & monitoring / L. Gray Wilson, Lorne G. Everett, Stephen J. Cullen. – Oxfordshire: Routledge, 2018. – 752 p.
6. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
7. Hendriks M.R. Introduction to physical hydrology. – Oxford, New York: Oxford University Press, 2010. – 331 p.
8. Szymkiewicz A. Modelling water flow in unsaturated porous media accounting for nonlinear permeability and material heterogeneity. – Heidelberg, New York, Dordrecht, London: Springer (Heidelberg), 2013. – 254 p. DOI: 10.1007/978-3-642-23559-7
9. Coldewey W.G., Gobel P. Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden. – Berlin: Springer Spektrum, 2015. – 221 p. DOI: 10.1007/978-3-8274-2728-1.
10. Томск: история города в иллюстрациях. 1604–2004 / под ред. Э.И. Черняк. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2004. – 600 с.
11. Леман Э.А. Химический анализ воды, употребляемой в г. Томск для питья и различных хозяйственных надобностей // Томский университетский вестник. – 1889. – С. 125–136.
12. Назаров А.Д. Родники г. Томска – распространение, состав, возможности использования и аквапаркового обустройства // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 8. – С. 236–256.
13. Кузеванов К.И. Гидрогеологическая основа экологических исследований города Томска // Обской вестник. – 1999. – № 1–2. – С. 53–58.
14. Мананков А.В., Парначев В.П. Геоэкологические аспекты состояния поверхностных и подземных вод города Томска // Обской вестник. – 1999. – № 1–2. – С. 105–116.
15. Наливайко Н.Г. Микрофлора подземных вод города Томска как критерий их экологического состояния: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 21 с.
16. Наливайко Н.Г., Кузеванов К.И., Копылова Ю.Г. Атлас бактериальных пейзажей родников г. Томска. – Томск: SST, 2002. – 52 с.
17. Hydrogeological conditions changes of Tomsk, Russia / V.D. Pokrovsky, E.M. Dutova, K.I. Kuzevanov, D.S. Pokrovsky, N.G. Nalivaiko // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2015. – № 27 (1). – P. 012031.
18. Пасечник Е.Ю. Эколого-геохимическое состояние природных вод территории города Томска (правобережной части р. Томь): автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2010. – 22 с.
19. Shvartsev S.L., Rasskazov N.M., Savichev O.G. Contents and migration forms of elements in natural waters of the mid-Tom' basin // Geologiya i Geofizika. – 1997. – V. 38. – № 12. – P. 1955–1961.
20. Состояние геологической среды (недр) на территории Томской области в 2000 г. Вып. 6 / под ред. В.А. Лыгина. – Томск: Территориальный центр «Томскгеомониторинг», 2001. – 180 с.
21. Ермашова Н.А. Геохимия подземных вод зоны активного водообмена Томской области в связи с решением вопросов водоснабжения и охраны: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 1998. – 44 с.
22. Шварцев С.Л., Савичев О.Г. Базовые пункты гидрогеохимических наблюдений – новая методическая основа для решения водно-экологических проблем (на примере бассейна верхней и Средней Оби) // Обской вестник. – 1999. – № 3–4. – С. 27–32.
23. Колоколова О.В. Геохимия подземных вод района Томского водозабора: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Томск, 2003. – 21 с.
24. Микроэлементный состав подземных вод верхней гидрогеодинамической зоны в бассейне Верхней Оби как фактор формирования их эколого-геохимического состояния / Е.Ю. Пасечник, Н.В. Гусева, О.Г. Савичев, В.А. Лыгин, А.А. Болобаненко, В.А. Домаренко, О.Н. Владимирова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 54–63. DOI: 10.18799/24131830/2020/4/2593.
25. Manual on stream gauging. V. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
26. Manual on stream gauging. Vol. II. Computation of Discharge. WMO. No. 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 198 p.
27. Градостроительный атлас г. Томска // Департамент архитектуры и градостроительства администрации Города Томска. URL: <https://map.admtomsk.ru> (дата обращения 15.01.2022).
28. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // Геоэкология. – 2003. – № 2. – С. 108–119.
29. Алексин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 444 с.
30. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / Я.П. Молчанова, Е.А. Заика, Э.И. Бабкина, В.А. Сурнин / под ред. Т.В. Гусевой. – М.: ФОРУМ, ИНФРА-М, 2007. – 192 с.
31. Гидрогеология СССР. Т. 16. Западно-Сибирская равнина (Тюменская, Омская, Новосибирская и Томская области) / под ред. В.А. Нуднера. – М.: Недра, 1970. – 368 с.
32. Владимирова О.Н., Савичев О.Г. Взаимосвязи между речными и подземными водами в нижнем течении реки Томь (Томская область, Российская федерация) // Геоэкология. Инженерная геология, гидрогеология, геоэкология. – 2021. – № 4. – С. 41–52. DOI: 10.31857/S0869780921040111.
33. Рогов Г.М., Попов В.К., Осипова Е.Ю. Проблемы использования природных вод бассейна реки Томи для хозяйственно-питьевого водоснабжения. – Томск: Изд-во ТГСАУ, 2003. – 218 с.
34. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
35. Kresic N. Types and classifications of springs // Groundwater hydrology of springs. – Amsterdam: Elsevier Inc, 2010. – С. 31–85.

36. Stevens L.E., Jenness J., Ledbetter J.D. Springs and springs-dependent taxa of the Colorado River basin, southwestern North America: geography, ecology and human impacts // *Water (Switzerland)*. – 2020. – № 12 (5). – P. 1501. DOI: 10.3390/w12051501
37. Savichev O.G., Zemtsov V.A., Pasechnik E.Y. Hydrologic conditions for chemical composition of the Siberian river waters // *Aktru: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. – 2019. – № 232. – P. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/232/1/012012.
38. Лыготин В.А., Савичев О.Г., Нигороженко В.Я. Состояние поверхностных водных объектов, водохозяйственных систем и сооружений на территории Томской области в 2000-2005 гг. – Томск: ОАО «Томскгеомониторинг», 2006. – 88 с.
39. Исследование и охрана радоновых источников в окрестностях г. Томска / Н.М. Семенова, А.Д. Назаров, Н.Г. Сидорина, П.А. Тишин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2016. – Т. 327. – № 7. – С. 22–34.
40. Natural groundwater quality / Eds. W.M. Edmunds, P. Shand. – Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons, 2009. – 488 p.
41. Appelo C.A.J., Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution. – London: CRC press, 2004. – 672 p.
42. McLean M.I. et al. Statistical modelling of groundwater contamination monitoring data: a comparison of spatial and spatiotemporal methods // *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 652. – P. 1339–1346.
43. Kresic N. Hydrogeology and groundwater modeling. – Bosa Roca, United States: CRC press, 2006. – 828 p.

Поступила 02.02.2022 г.

Информация об авторах

Пасечник Е.Ю., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Лыготин В.А., кандидат геолого-минералогических наук, директор филиала «Сибирский региональный центр Государственного мониторинга состояния недр» Федерального государственного бюджетного учреждения «Гидроспецгеология».

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чилингер Л.Н., кандидат технических наук, старший преподаватель отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хвощевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Чжоу Дань, аспирант отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314:556.535.8

CHEMICAL COMPOSITION OF SPRINGS AS AN INDICATOR OF NATURAL-TECHNOGENIC EVOLUTION OF THE URBAN ECOSYSTEM (ON THE EXAMPLE OF TOMSK CITY, SOUTH-EAST OF WESTERN SIBERIA)

Elena Yu. Pasechnik¹,
paseyu@yandex.ru

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Victor A. Lgotin²,
tgm@tgm.ru

Liliya N. Chilinger¹,
lilichilinger@gmail.com

Albina A. Khvashchevskaya¹,
hvashevskaya@tpu.ru

Zhou Dan¹,
929177582@qq.com

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

² Hydrospeitsgeologiya, branch of the Siberian Regional Center of the GMNS,
99, Nikitin street, Tomsk, 634061, Russia.

The relevance of the study is determined by the need for the integrated use of springs in the urban environment and the expediency of their use as an indicator of changes in its natural and man-made changes. Such studies are relevant for the territory of Tomsk in the context of the limited availability of observation and production wells, but a large number of springs in different parts of the city, reflecting the state of the feeding and transit zones of groundwater formed under various conditions of anthropogenic load.

The main aim is to identify natural and anthropogenic changes in the chemical composition of spring waters as an indicator of the corresponding changes in the urban environment.

Objects: springs on the territory of Tomsk (Western Siberia).

Methods: modern methods for determining the chemical composition of groundwater, statistical methods.

Results. The analysis of the ecological and geochemical state of spring waters on the territory of Tomsk (Western Siberia) in 2020–2021 has been carried out. It was shown that the highest concentrations of dissolved salts were found in spring waters in the area downstream of the mouth of the river Ushaika and in its valley as a result of anthropogenic factors and unloading of groundwater with a salinity of more than 1 g/dm³, including, most likely, from the Cretaceous deposits of the Ob-Tomsk interfluvium. Based on the analysis, it was revealed that the anthropogenic influencing factors include not only surface pollution in industrial areas or infiltration of surface runoff, including the products of dissolution and transformation of the sand-salt mixture to improve the operating conditions of urban roads, but also changes in the intensity and structure of underground water exchange due to construction and operation of pile foundations, drainage and water supply systems. Conclusions are drawn about the need to create and analyze a mathematical model for the formation of underground runoff in the city of Tomsk and in the adjacent territories to design and improve the efficiency of existing storm sewage systems, sewage of household wastewater, water and heat supply, as well as the inexpediency of using the springs of the city of Tomsk as alternative sources of water supply due to the peculiarities of the chemical composition of their waters and the factors of their formation.

Key words:

Chemical composition, springs, the city of Tomsk, Western Siberia, natural and anthropogenic changes in the urban environment.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 18-55-80015.

REFERENCES

1. Vodny kodeks Rossiyskoy Federatsii Federalny zakon ot 03.06.2006 № 74-FZ. S izmeneniyami na 02.07.2021 g. [Water Code of the Russian Federation. Federal law dated 03.06.2006. no. 74-FZ]. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_60683/ (accessed 15 January 2022).
2. Shvarcev S.L. *Obshchaya gidrogeologiya* [General hydrogeology]. Moscow, Alyans Publ., 2012. 600 p.
3. Hölting B., Coldewey W.G. *Hydrogeology*. Berlin, Germany, Springer, 2019. 357 p.
4. Hiscock K.M., Bense V.F. *Hydrogeology: principles and practice*. New York City, John Wiley & Sons, 2021. 768 p.
5. *Handbook of vadose zone characterization & monitoring*. L. Gray Wilson, Lorne G. Everett, Stephen J. Cullen. Routledge, 2018. 752 p.
6. Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
7. Hendriks M.R. *Introduction to physical hydrology*. Oxford, New York, Oxford University Press, 2010. 331 p.
8. Szymkiewicz A. *Modelling water flow in unsaturated porous media accounting for nonlinear permeability and material heterogeneity*.

- neity. Heidelberg, New York, Dordrecht, London, Springer (Heidelberg), 2013. 254 p. DOI: 10.1007/978-3-642-23559-7
9. Coldewey W.G., Gobel P. *Hydrogeologische Gelände- und Kartiermethoden*. Berlin, Springer Spektrum, 2015. 221 p. DOI: 10.1007/978-3-8274-2728-1.
10. *Tomsk: istoriya goroda v illyustratsiyakh. 1604–2004* [Tomsk: the history of the city in illustrations. 1604–2004]. Ed. by E.I. Chernyak, Tomsk, Tomsk University Publ. House, 2004. 600 p.
11. Leman E.A. Khimicheskiy analiz vody, upotrebyaemoy v g. Tomsk dlya pitiya i razlichnykh khozyaystvennykh nadobnostey [Chemical analysis of water used in Tomsk for drinking and various household needs]. *Tomsk University Bulletin*, 1889, pp. 125–136.
12. Nazarov A.D. Springs of the city of Tomsk – distribution, composition, possibilities of use and water park arrangement. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2002, vol. 305, no. 8, pp. 236–256.
13. Kuzevanov K.I. Hidrogeologicheskaya osnova ekologicheskikh issledovaniy goroda Tomsk [Hydrogeological basis of ecological research of the city of Tomsk]. *Obshchyy vestnik*, 1999, no. 1–2, pp. 53–58.
14. Manankov A.V., Parnachev V.P. Geoekologicheskie aspekty sostoyaniya poverkhnostnykh i podzemnykh vod goroda Tomsk [Geoeological aspects of the state of surface and underground waters of the city of Tomsk]. *Obshchyy vestnik*, 1999, no. 1–2, pp. 105–116.
15. Nalivayko N.G. *Mikroflora podzemnykh vod goroda Tomsk kak kritery ikh ekologicheskogo sostoyaniya*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Microflora of underground waters of the city of Tomsk as a criterion for their ecological state. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2003. 21 p.
16. Nalivayko N.G., Kuzevanov K.I., Kopylova Yu.G. *Atlas bakteri-alnykh peyzazhey rodnikov g. Tomsk* [Atlas of bacterial landscapes of springs in Tomsk]. Tomsk, SST Publ., 2002. 52 p.
17. Pokrovsky V.D., Dutova E.M., Kuzevanov K.I., Pokrovsky D.S., Nalivaiko N.G. Hydrogeological conditions changes of Tomsk, Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2015, no. 27 (1), pp. 012031.
18. Pasechnik E.Yu. *Ekologo-geokhimicheskoe sostoyanie prirodnykh vod territorii goroda Tomsk (pravoberezhnoy chasti r. Tom*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Ecological and geochemical state of natural waters in the territory of the city of Tomsk (right-bank part of the Tom River)]. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 2010. 22 p.
19. Shvartsev S.L., Rasskazov N.M., Savichev O.G. Contents and migration forms of elements in natural waters of the mid-Tom' basin. *Geologiya i Geofizika*, 1997, vol. 38, no. 12, pp. 1955–1961.
20. *Sostoyanie geologicheskoy sredy (nedr) na territorii Tomskoy oblasti v 2000 g.* [The state of the geological environment (subsoil) on the territory of the Tomsk region in 2000]. Ed. by V.A. Lgotin. Tomsk, Tomskgeomonitring Publ., 2001. No. 6, 180 p.
21. Ermashova N.A. *Geokhimiya podzemnykh vod zony aktivnogo vodobmena Tomskoy oblasti v svyazi s resheniem voprosov vodosnabzheniya i okhrany*. Avtoreferat Dis. kand. nauk [Geochemistry of groundwater in the zone of active water exchange in the Tomsk region in connection with the solution of issues of water supply and protection. Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, 1998. 44 p.
22. Shvartsev S.L., Savichev O.G. Bazovyye punkty gidrogeokhimicheskikh nablyudeniya – novaya metodicheskaya osnova dlya resheniya vodno-ekologicheskikh problem (na primere basseyna verkhney i Sredney Obi) [Basic points of hydrogeochemical observations – a new methodological basis for solving water and environmental problems (on the example of the Upper and Middle Ob basin)]. *Obshchyy vestnik*, 1999, no. 3–4, pp. 27–32.
23. Kolokolova O.V. *Geokhimiya podzemnykh vod rayona Tomskogo vodozabora*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Geochemistry of groundwater in the Tomsk water intake area Cand. Diss. Abstract]. Tomsk, TF IGNG SO RAN Publ., 2003. 21 p.
24. Pasechnik E.Yu., Guseva N.V., Savichev O.G., Domarenko V.A., Vladimirova O.N. Trace elements composition of underground waters of the upper hydrogeodynamic zone in the basin of upper ob as a factor of formation of their ecological-geochemical condition. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 4, pp. 54–63. In Rus. DOI:10.18799/24131830/2020/4/2593
25. *Manual on Stream Gauging*. Vol. I. Fieldwork. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
26. *Manual on Stream Gauging*. Vol. II. Computation of Discharge. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 198 p.
27. *Gradostroitelny atlas g. Tomsk* [Urban atlas of Tomsk]. *Departament arkhitektury i gradostroitelstva administratsii goroda Tomsk* [Department of Architecture and Urban Planning of Tomsk City Administration]. Available at: <https://map.admtomsk.ru> (accessed 15 January 2022).
28. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Sostav i ravnovesie donnykh otlozheniy r. Tom s rechnymi vodami [Composition and balance of bottom sediments of the river. Tom with river waters]. *Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119.
29. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Fundamentals of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
30. Molchanova Ya.P., Zaika E.A., Babkina E.I., Surnin V.A. *Gidrokhimicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Hydrochemical indicators of the state of the environment]. Ed. by T.V. Guseva. Moscow, FORUM, INFRA-M Publ., 2007. 192 p.
31. *Gidrogeologiya SSSR. T. 16. Zapadno-Sibirskaya ravnina (Tyumenskaya, Omskaya, Novosibirskaya i Tomskaya oblasti)* [Hydrogeology of the USSR. T. 16. West Siberian Plain (Tyumen, Omsk, Novosibirsk and Tomsk regions)]. Ed. by V.A. Nudner. Moscow, Nedra Publ., 1970. 368 p.
32. Vladimirova O.N., Savichev O.G. Interrelation between river and groundwater in the lower reaches of the Tom river (Tomsk oblast, the Russian Federation). *Environmental Geoscience*, 2021, no. 4, pp. 41–52. In Rus.
33. Rogov G.M., Popov V.K., Osipova E.Yu. *Problemy ispolzovaniya prirodnykh vod basseyna reki Tomi dlya khozyaystvenno-pitevogo vodosnabzheniya* [Problems of using natural waters of the Tom river basin for domestic and drinking water supply]. Tomsk, TGSAU Publ. House, 2003. 218 p.
34. SP 33-101-2003. *Svod pravil po proyektirovaniyu i stroitelstvu. Opredelenie osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
35. Kresic N. Types and classifications of springs. *Groundwater hydrology of springs*. Amsterdam, Elsevier Inc, 2010. pp. 31–85.
36. Stevens L.E., Jenness J., Ledbetter J.D. Springs and springs-dependent taxa of the Colorado River basin, southwestern North America: geography, ecology and human impacts. *Water (Switzerland)*, 2020, no. 12 (5), pp. 1501. DOI: 10.3390/w12051501.
37. Savichev O.G., Zemtsov V.A., Pasechnik E.Y. Hydrologic conditions for chemical composition of the Siberian river waters. *Aktru: IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2019, no. 232, pp. 1–6. DOI: 10.1088/1755-1315/232/1/012012.
38. Lgotin V.A., Savichev O.G., Nigorozenko V.Ya. *Sostoyanie poverkhnostnykh vodnykh obektov, vodokhozyaystvennykh sistem i sooruzheniy na territorii Tomskoy oblasti v 2000–2005 gg.* [The state of surface water bodies, water management systems and structures in the territory of the Tomsk region in 2000–2005]. Tomsk, Tomskgeomonitring Publ., 2006. 88 p.
39. Semenova N.M., Nazarov A.D., Loyko S.V., Sidorina N.G., Tishin P.A. Status and prospects of using the health improvement area klyuchi (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2017, vol. 328, no. 9, pp. 127–139. In Rus.
40. *Natural groundwater quality*. Eds. W.M. Edmunds, P. Shand. Chichester, United Kingdom, John Wiley & Sons, 2009. 488 p.
41. Appelo C.A.J., Postma D. *Geochemistry, groundwater and pollution*. London, CRC press, 2004. 672 p.
42. McLean M.I. Statistical modelling of groundwater contamination monitoring data: A comparison of spatial and spatiotemporal methods. *Science of the Total Environment*, 2019, vol. 652, pp. 1339–1346.
43. Kresic N. *Hydrogeology and groundwater modeling*. Bosa Roca, United States, CRC press, 2006. 828 p.

Received: 2 February 2022.

Information about the authors

Elena Yu. Pasechnik, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Victor A. Lgotin, Cand. Sc., associate professor, Hydrospeitsgeologiya, branch of the Siberian Regional Center of the State monitoring of the state of the subsoil.

Liliya N. Chilingir, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Albina A. Khvashchevskaya, Cand. Sc., associate professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Zhou Dan, graduate student, National Research Tomsk Polytechnic University.