

## Содержание железа и марганца в водах объектов нецентрализованного водоснабжения Тюменской городской агломерации

А. Беляновская<sup>✉</sup>, Е. А. Солдатова, Е. В. Крестьянникова

Тюменский государственный университет, Российская Федерация  
(625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6)

**Аннотация.** Цель – сравнительный анализ содержания железа (Fe) и марганца (Mn) в воде нецентрализованного водоснабжения Тюменской городской агломерации и других субъектов РФ.

**Материалы и методы.** Методика включала анализ химического состава (концентрация Fe, Mn), pH, жесткости и перманганатной окисляемости 55 проб воды (Тюменская городская агломерация) и сравнение с опубликованными данными о составе вод других субъектов РФ.

**Результаты и обсуждение.** Установлено, что вода, используемая в целях хозяйствственно-питьевого водоснабжения в Тюменской городской агломерации, имеет pH, изменяющийся от 5–8; содержание органического вещества (по перманганатной окисляемости, РІ) во всех рассмотренных объектах находится в пределах нормы ( $\text{РІ} < 5 \text{ мг/л}$ ). Средняя жесткость воды не превышает допустимых значений ( $6^{\circ}\text{Ж}$ ), рассчитанные содержания  $\text{Ca}^{2+}$  –  $\text{Mg}^{2+}$  составляют 75 и 45 мг-экв/л, соответственно. Средние концентрации железа в воде Тюменской городской агломерации составляют 1,9 ПДК, марганца – 1,2 ПДК.

**Выходы.** Показано, что содержание Fe и Mn в Тюменской агломерации ниже, чем в регионах с высоким уровнем техногенного загрязнения, но выше, чем ПДК, и содержание этих элементов в регионах, где подобная аномалия не встречается.

**Ключевые слова:** Геохимическая аномалия, Тюменская область, Западная Сибирь, железо, марганец, воды, нецентрализованного водоснабжения.

**Источник финансирования:** Обзор и анализ литературных данных подготовлены в рамках реализации проекта Российского научного фонда № 23–77-01077.

**Для цитирования:** Беляновская А., Солдатова Е. А., Крестьянникова Е. В. Содержание железа и марганца в водах объектов нецентрализованного водоснабжения Тюменской городской агломерации // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология, 2025, № 1, с. 125-130. DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/125-130>

### ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение объектов питьевого водоснабжения железом (Fe) и марганцем (Mn) происходит из сточных вод, в результате эрозии и выноса металлов из поверхностного слоя загрязненных почв и отходов городских агломераций [2, 10]. В связи с необходимостью рационализации природопользования и достижения целей устойчивого развития активно изучается влияние промышленного загрязнения и урбанизации на качество окружающей среды. Однако, стоит учитывать, что естественные особенности среды обитания, такие как локальные геохимические аномалии напрямую влияют на элементный состав природных сред. Так, формирование химического состава природных вод обуславливается составом местных почв и горных пород, особенностями водного режима (время взаимодействия воды с горными породами, гидрологический режим и распространенность болотных экосистем), распространенностью многолетнемерзлых пород [11–12]. В естественных условиях обогащение природных вод Fe и Mn, которые находятся в фокусе данной работы, происходит путем

выщелачивания их из горных пород и накопления в результате комплексообразования с органическими лигандами, в частности в условиях болотных экосистем [3, 7].

В представленном исследовании оценка качества экосистем рассматривается через накопление потенциально токсичных химических элементов (в данном случае Fe и Mn) [6] в пресных природных водах зоны региональной железомарганцевой аномалии Западной Сибири на примере городской агломерации г. Тюмень. В Тюменской области высокое содержание железа и марганца в водопроводной воде является причиной проблем с фильтрацией и повышенным включением данных элементов в минеральный статус человека. Водопроводная вода системы централизованного водоснабжения в г. Тюмень соответствует требованиям СанПиН. Состав вод имеет большую степень санитарной надежности, является стабильным и не подвержен антропогенному воздействию [9]. Однако, мероприятия по очистке и реконструированию очистных сооружений не решают проблему повышенного содержания железа и марганца в воде, поскольку в черте города



Тюмень распространен частный сектор, для нужд которого используются нецентрализованные источники водоснабжения.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

*Отбор проб воды.* В работе проведен анализ химического состава 55 проб воды, отобранных из городской колодцев, скважин, водопроводов городской агломерации Тюмень согласно ГОСТ «31861-2012 Вода».

Исследование качества питьевой воды проводилось методом количественного химического анализа (КХА) в Научно-исследовательском институте экологии и рационального использования природных ресурсов (г. Тюмень, Россия). Анализировались следующие показатели: железо общее (измерение массовой концентрации общего железа с сульфосалициловой кислотой), марганец (определение содержания марганца с использованием окисления до перманганат-ионов), перманганатная окисляемость (PI), водородный показатель, жесткость общая ( $^{\circ}\text{Ж}$ ). Всего было проанализировано 55 проб – концентрации Fe, Mn; 49 проб – жесткость общая, pH, перманганатная окисляемость. Также в анализ были включены данные из опубликованных материалов, 126 проб, включающих концентрации Fe, Mn в воде, отобранный в Тюменской области в 2003, 2014, 2020 годах и в других субъектах Российской Федерации с 2005 по 2023 годы.

*Анализ данных.* Выборка проверялась на нормальность распределения, выполнен описательный статистический анализ данных, включающий среднее геометрическое, минимальную и максимальную концентрации, стандартное отклонение. Для оценки взаимосвязей между исследуемыми показателями использовались непараметрический Коэффициент ранговой корреляции Спирмена, факторный анализ (без вращения). Для расчета коэффициента концентрации использовался СанПиН 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения» (формула 1):

$$CC = Ci \div MPC_i \quad (1)$$

где  $C_i$  – концентрация элемента  $i$  [ppm],  $MPC$  – ПДК элемента  $i$  [ppm]

Исходя из показателя общей жесткости воды были рассчитаны содержания  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ .  $1^{\circ}\text{Ж} = 1 \text{ мг-экв}_{\text{н}} / \text{мг-экв}_{\text{н}} = 20,04 \text{ мг } \text{Ca}^{2+}$  или  $12,16 \text{ мг } \text{Mg}^{2+}$  в литре воды (формула 2).

$$C_{\text{Ca}^{2+}} = DL * 20,04; C_{\text{Mg}^{2+}} = DL * 12,16, [5] \quad (2)$$

где  $DL$  – предел обнаружения (ПО).

#### РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты анализа данных представлены ниже (табл. 1). Общие статистические параметры распределения Fe, Mn в воде городской агломерации Тюмени показывают следующее: выборки являются относительно однородными по содержанию железа и марганца – для железа 87 % проб, для марганца 85 % находятся в пределах одного стандартного отклонения от среднего. Наибольшая дисперсия отмечается для железа и общей жесткости воды (35, 13,8 соответственно). Водородный показатель варьирует в пределах 5-8, однако преимущественно среда характеризуется как нейтральная (среднее значение pH 6, 9); содержание органического вещества (по перманганатной окисляемости) во всех рассмотренных объектах находится в пределах нормы (PI < 5 мг/л). Средняя жесткость воды не превышает допустимых значений ( $6^{\circ}\text{Ж}$ ), рассчитанные содержания  $\text{Ca}^{2+}$  –  $\text{Mg}^{2+}$  составляют 75 и 45 мг-экв/л, соответственно.

Средние концентрации железа в воде Тюменской городской агломерации составляют 1,9 ПДК, марганца – 1,2 ПДК (см. табл. 1). Содержания Fe в точках отбора проб в 50 % выборки превышают ПДК (от 1 до 90 раз), содержание Mn в 50 % выборки превышают ПДК (от 1,1 до 73 раз). Отмечается корреляция между величиной общей жесткости воды и содержаниями Fe и Mn. Уровень жесткости воды коррелирует со всеми исследуемыми показателями (Spearman rank correlation coefficient  $p_{0,05} > 0,33$  для всех показателей). Накопление Fe связано с количеством органического вещества в воде (Spearman rank correlation coefficient  $p_{0,05} = 0,63$ ). Факторный анализ показывает, что величина ПО, Fe, Mn – определяются одним фактором, а значения pH – другим. Возможно, накопление в воде Fe и Mn обусловлено содержанием органического вещества. Параметр pH, вероятно, обусловлен степенью и временем взаимодействия воды с вмещающими породами [13]. В отдельных пробах встречаются высокие показатели жесткости воды и водородного показателя.

Диаграмма распределения значений концентрации Fe, Mn позволяет проследить эколого-геохимические особенности вод, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения Тюменской городской агломерации в сравнении с другими субъектами Российской Федерации. Были проанализированы данные из следующих регионов (ссылки на литературные источники загружены в

Табл. 1. Статистические параметры распределения значений в выборке  
[Table 1. Statistical parameters of the distribution of values in the sample]

|   | Fe                      | Mn                       | HW                    | pH                     | PI                     |
|---|-------------------------|--------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| Среднее геометрическое<br>(минимум... максимум) | 0,23-6,3<br>(0,05...27) | 0,11-0,6<br>(0,01...3,2) | 2,6-4,4<br>(0,1...20) | 6,8-0,6<br>(5,1...7,9) | 2,7-3,2<br>(0,13...17) |

\*Примечание: среднее геометрическое, минимум, максимум, PI – перманганатная окисляемость, HW – жесткость воды.  
[Note: geometric mean, min, max, PI - permanganate index, HW – hardness of water].

репозиторий данных и доступны по ссылке [1]): Тюмень (текущее исследование) и Тюменская область, Республика Саха, Города Нягань, Нефтеюганск, Томская область, Челябинская область Республика Башкортостан, Архангельская область, Пермская область, Иркутская область, Братское водохранилище, Иркутская область, исток реки Ангара, Челябинская область, река Сак-Элга, Республика Коми, река Печора, Мурманская область, река Кола, Мур-

манская область, Новосибирская область, Новосибирское водохранилище, Иркутская область, река Ангара, Иркутская область, озеро Байкал, Город Санкт-Петербург, Стандарт качества воды Байкала, Республика Карелия. По результатам опробования вод Тюменской городской агломерации и литературным данным о составе воды Тюменской области и других субъектов РФ отмечается региональная специфика содержания Fe/Mn (рис. 1).

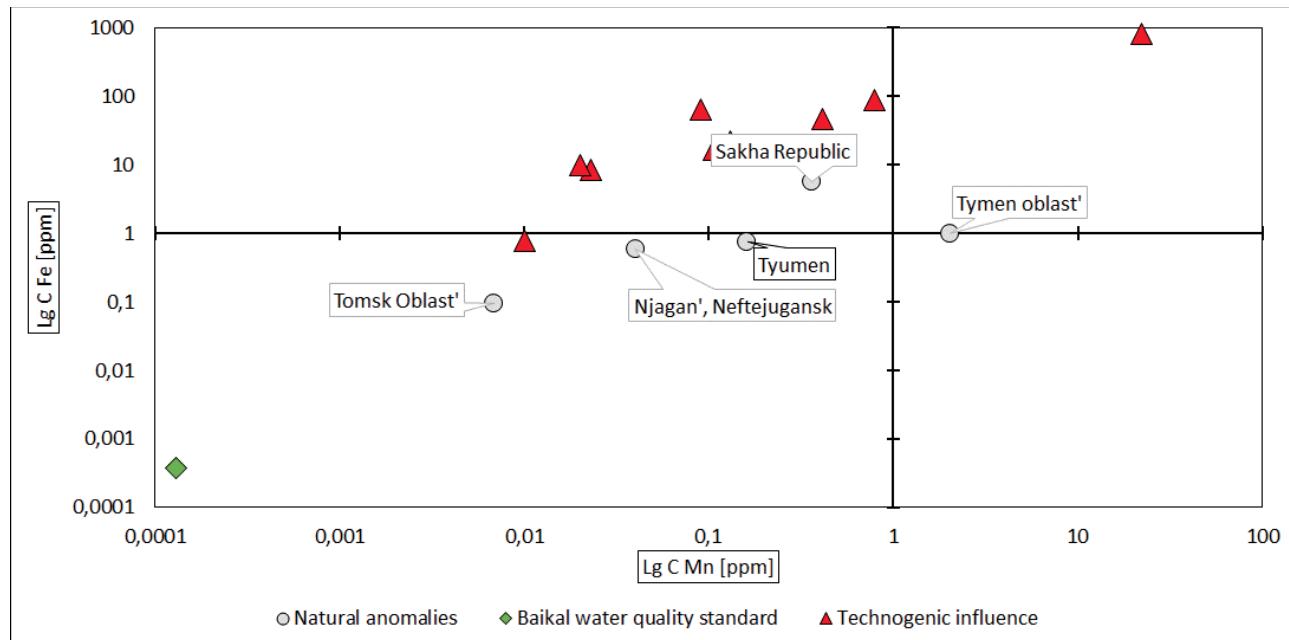


Рис. 1. Распределение Fe/Mn в воде, по регионам Российской Федерации и в воде озера Байкал, ppm  
[Fig. 1. Fe/Mn distribution in water in regions of Russian Federation and in Baikal Lake water, ppm]

Общим трендом для всех рассмотренных водных объектов является корреляция концентраций Fe и Mn. Содержания марганца и железа в воде всех рассмотренных территорий значительно превышают стандарт Байкальской воды (Baikal water, quality standard) [2]. Данные не имеют строгого разделения на антропогенные и природные аномалии. Важно отметить, что концентрации Fe, Mn в воде регионов, где распространена железомарганцевая геохимическая аномалия, сопоставимы с их концентрациями в водах регионов с повышенной антропогенной нагрузкой на водные объекты. Несмотря на отсутствие высокого уровня антропогенной нагрузки, содержание Fe, Mn в воде Тюмени превышает ПДК, и содержание этих элементов в регионах, где подобная геохимическая аномалия не встречается (Иркутская, Челябинская, Пермская области), но присутствует специфическая антропогенная нагрузка (сельское хозяйство, урбанизация). В то же время содержания Fe и Mn в воде Тюмени ниже, чем, например, концентрации Mn в воде реки Иртыш в Тобольском районе Тюменской области (24 ПДК Mn) или концентрация Fe в воде месторождения Выон в Республике Саха (19 ПДК Fe). Также, рассмотренные водные объекты Тюмени характеризуются меньшими содержаниями Fe и Mn, чем вода в регионах с высоким уровнем техногенного загрязнения, например, Иркутской городской агломерации, Кольского полуострова.

Повышенное накопление Fe и Mn в воде, используемой для хозяйственно-питьевых нужд, создает неблагоприятные условия для экосистемы и риски для здоровья населения. Данные элементы вносят наибольший вклад в формирование дополнительных случаев заболеваемости, ассоциированной с неудовлетворительным качеством воды, используемой для хозяйственно-питьевого водоснабжения. Согласно данным исследований, Fe, Mn относятся к приоритетным для мониторинга веществам 3-го класса опасности [15]. Высокие концентрации железа и марганца в воде Тюменской области, согласно ранее проведенным исследованиям обусловлены их поступлением из почвы и горной породы [14].

Железо и марганец поступают в поверхностные и подземные воды в результате химического выветривания горных пород и накапливаются путем комплексообразования с органическими лигандами [7]. Железо в составе фульво- и гуминовых кислот поступает в поверхностные воды в результате болотного питания рек. Повышенное содержание Fe и Mn в почвах региона, высокая подвижность, биодоступность обуславливают их накопление в экосистеме. Результаты факторного и корреляционного анализов, демонстрируют, что накопление Fe и Mn связано с содержанием в воде органического вещества. Под воздействием локального ге-

охимического фона накопление Fe и Mn в природных водах объектов, не подверженных прямым источникам загрязнения, достигает 1,6 и 8 ПДК соответственно [4]. Накопление Fe, Mn в водопроводной воде в концентрациях превышающих ПДК вызывает неблагоприятные эффекты для органов пищеварения, мочеполовой системы, кожных покровов и слизистых оболочек, эндокринной системы, являются потенциальными возбудителями заболеваний полости рта [8].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Характерные для Западной Сибири природные факторы (процессы химического выветривания горных пород и комплексообразование с органическим веществом), обуславливающие железомарганцевую геохимическую аномалию Тюменской области, потенциально могут оказывать негативное воздействие на качество экосистем и здоровье населения. Пресноводные объекты региона, используемые для хозяйственно-питьевого водоснабжения, по уровню накопления Fe, Mn выходят на один уровень с антропогенно-преобразованными территориями. О потенциальных рисках свидетельствует и факт многократного превышения ПДК. Несмотря на отсутствие высокого уровня антропогенной нагрузки в районе Тюменской городской агломерации, текущее содержание Fe, Mn в воде предполагает выработку профилактических мер по снижению потенциального негативного воздействия на пресноводные экосистемы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляновская А. Список литературы для статьи Беляновская и др., 2025 «Содержание Fe, Mn в воде нецентрализованного водоснабжения Тюменской городской агломерации» // Figshare. – URL: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28254989.v1> (дата обращения: 22.01.2025). – Текст: электронный.
2. Ветров В. А., Кузнецова А. И., Склярова О. А. Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал // География и природные ресурсы, 2013 № 3, с. 41-51.
3. Иванова И. С. Железосодержащие подземные воды верхней гидродинамической зоны центральной части Западно-Сибирского артезианского бассейна // Водные ресурсы, 2014, № 2 (41), с. 164-179.
4. Кремлева Т. А. Геохимические особенности природных вод Западной Сибири: микроэлементный состав // Вестник Тюменского государственного университета, 2012, с. 80-89.
5. Межгосударственный стандарт ГОСТ 31865-2012 «Вода. Единица жёсткости». – URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=173108&pageK=7D1DB064-9424-47BF-80D2-CF5759F149B2> (дата обращения: 13.02.2024). – Текст: электронный.
6. Huang Z. Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China // Environmental Sciences Europe, 2020, no. 1 (32), pp. 23.
7. Ivanova I. S., Lepokurova O. E. Features of trace elements in the groundwater of the Bakchar iron ore deposit (Tomsk oblast) // Bulletin of Tomsk State University, 2015, no. 398, pp. 224-232.
8. Kleyn S. V., Vekovshinina S. A. Priority risk factors related to drinking water from centralized water supply system that create negative trends in population health // Health Risk Analysis, 2020, no. 3, pp. 49-60.
9. Lapshin A. P., Ignatyeva L. P. Features of a chemical composition of drinking water of Tyumen // Siberian Medical Journal (Irkutsk), 2014, no. 8, pp. 79-82.
10. Nokhrin D. Y. The structure of the variability of the hydrochemical composition of water in lake-type reservoir // Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry, 2021, no. 2 (7 (73)), pp. 117-133.
11. Savichev O. G., Heng Y., Dan Z. Hydrogeodynamic and hydrogeochemical conditions of self-clearance of the Obskoe fen water (western Siberia) // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering, 2022, no. 4 (333), pp. 115-125.
12. Shvartsev S. Evolution of the groundwater chemical composition in the Poyang Lake catchment, China // Environmental Earth Sciences, 2016, no. 18 (75), pp. 1239.
13. Shvartsev S. L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth // Geochemistry International, 2008, no. 13 (46), c. 1285-1398.
14. Tairova A. R., Mukhamedyarova L. G., Kozjar Y. V. Assessing the environmental status of the river Tours in the conditions of anthropogenic impact // Bulletin of the National Library of Railways, 2015, no. 26 (4), pp. 138-141.
15. Zaitseva N. V. Drinking water quality: health risk factors and efficiency of control and surveillance activities by Rospotrebnadzor // Health Risk Analysis, 2019, no. 2, pp. 44-55.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию: 27.02.2024

Принята к публикации: 20.02.2025

## Iron and Manganese Content in Water of Non-Centralised Water Supply Facilities of the Tyumen Urban Agglomeration

A. Belyanovskaya , E.A. Soldatova, E.V. Krestyannikova

*University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation  
(6, Volodarsky Str, Tyumen, 625003)*

**Abstract.** The purpose is to compare the iron (Fe) and manganese (Mn) content in the water of non-centralised water supply systems in the Tyumen urban agglomeration and other regions of the Russian Federation.

**Materials and methods.** The methodology included the analysis of the chemical composition (Fe, Mn concentration), pH, hardness and permanganate index of 55 water samples (Tyumen urban agglomeration) and a comparison with published data on the water composition of other regions of the Russian Federation.

**Results and discussion.** Water used for domestic and drinking water supply in the Tyumen urban agglomeration is found to have a pH varying from 5 to 8; the content of organic matter (permanganate index, PI) in all considered objects is within the norm ( $PI < 5 \text{ mg/l}$ ). The average water hardness does not exceed the permissible values (6 ppm); the calculated  $\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+}$  contents are 75 and 45 mg-eq/l, respectively. Average iron concentrations in water of the Tyumen urban agglomeration are 1.9 MPC, manganese – 1.2 MPC.

**Conclusions.** It is shown that the content of Fe and Mn in the Tyumen agglomeration is lower than in regions with a high level of anthropogenic pollution, but higher than the MPC and the content of these elements in regions where such an anomaly does not occur.

**Key words:** geochemical anomaly, Tyumen Region, Western Siberia, iron, manganese, waters, non-centralised water supply.

**Funding:** The review and analysis of literature data were prepared within the framework of the Russian Science Foundation Project No. 23-77-01077.

**For citation:** Belyanovskaya A., Soldatova E.A., Krestyannikova E. V. Iron and Manganese Content in Water of Non-Centralised Water Supply Facilities of the Tyumen Urban Agglomeration. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seria: Geografia. Geoekologiya*, 2025, no. 1, pp. 125-130 (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.17308/geo/1609-0683/2025/1/125-130>

### REFERENCES

1. Belyanovskaya A. References for the article Belyanovskaya et al., 2025 «The content of Fe, Mn in the water of the non-centralized water supply of the Tyumen urban agglomeration» // *Figshare*. – URL: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.28254989>. v1 (accessed 22.01.2025). – Text: electronic. (In Russ.)
2. Vetrov V.A., Kuznecova A.I., Sklyarova O.A. Bazovye urovni khimicheskikh elementov v vode ozero Bajkal [Basic levels of chemical elements in the water of Lake Baikal]. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2013 no. 3, pp. 41-51. (In Russ.)
3. Ivanova I. S. Zhelezosoderzhashchie podzemnye vody verkhnej gidrodinamicheskoy zony central'noj chasti Zapadno-Sibirskogo artezianskogo bassejna [Iron-containing groundwater of the upper hydrodynamic zone of the central part of the West Siberian Artesian basin]. *Vodnye resursy*, 2014, no. 2 (41), pp. 164-179. (In Russ.)
4. Kremleva T.A. Geokhimicheskie osobennosti prirodnnykh vod Zapadnoj Sibiri: mikroelementnyj sostav [Geochemical features of natural waters of Western Siberia: trace element composition]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, pp. 80-89. (In Russ.)
5. Interstate standard GOST 31865-2012 «Water. The unit of rigidity». – URL: <https://protect.gost.ru/v.aspx?control=8&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=173108&pageK=7D1DB064-9424-47BF-80D2-CF5759F149B2> (data obrashcheniya: 13.02.2024). (In Russ.)
6. Huang Z. Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China. *Environmental Sciences Europe*, 2020, no. 1 (32), pp. 23.
7. Ivanova I. S., Lepokurova O. E. Features of trace elements in the groundwater of the Bakchar iron ore deposit (Tomsk oblast). *Bulletin of Tomsk State University*, 2015, no. 398, pp. 224-232.
8. Kleyn S. V., Vekovshinina S. A. Priority risk factors related to drinking water from centralized water supply system that create negative trends in population health. *Health Risk Analysis*, 2020, no. 3, pp. 49-60.
9. Lapshin A. P., Ignatyeva L. P. Features of a chemical composition of drinking water of Tyumen. *Siberian Medical Journal (Irkutsk)*, 2014, no. 8, pp. 79-82.
10. Nokhrin D. Y. The structure of the variability of the hydrochemical composition of water in lake-type reservoir. *Scientific Notes of V.I. Vernadsky Crimean Federal University. Biology. Chemistry*, 2021, no. 2 (7 (73)), pp. 117-133.
11. Savichev O. G., Heng Y., Dan Z. Hydrogeodynamic and hydrogeochemical conditions of self-clearance of the Obskoe fen water (western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 2022, no. 4 (333), pp. 115-125.
12. Shvartsev S. Evolution of the groundwater chemical composition in the Poyang Lake catchment, China. *Environmental Earth Sciences*, 2016, no. 18 (75), pp. 1239.
13. Shvartsev S. L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, no. 13 (46), c. 1285-1398.

© Belyanovskaya A., Soldatova E.A., Krestyannikova E. V., 2025

✉ Alexandra Belyanovskaya, e-mail: alexandra.belyanovskaya@outlook.com



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

14. Tairova A. R., Mukhamedyarova L. G., Kozjar Y. V. Assessing the environmental status of the river Tours in the conditions of anthropogenic impact. *Bulletin of the National Library of Railways*, 2015, no. 26 (4), pp. 138-141.

15. Zaitseva N. V. Drinking water quality: health risk factors and efficiency of control and surveillance activities by Rosпотребнадзор. *Health Risk Analysis*, 2019, no. 2, pp. 44-55.

Беляновская Александра

Старший научный сотрудник научно-исследовательского института экологии и рационального использования природных ресурсов Тюменского государственного университета, г. Тюмень, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-4320-7637, e-mail: alexandra.belyanovskaya@outlook.com

Солдатова Евгения Александровна

Старший научный сотрудник центра изотопной биогеохимии Тюменского государственного университета, г. Тюмень, Российская Федерация, ORCID: 0000-0003-3967-4822, e-mail: 2a61@mail.ru

Крестьянникова Елизавета Вячеславовна

Лаборант-исследователь научно-исследовательского института экологии и рационального использования природных ресурсов Тюменского государственного университета, г. Тюмень, Российская Федерация, ORCID: 0000-0001-5512-1465, e-mail: li3452@yandex.ru

**Conflict of interests:** The authors declare no information of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

Received: 27.02.2024

Accepted: 20.02.2025

Alexandra Belyanovskaya

Senior Researcher at the Research Institute for Ecology and Rational Use of Natural Resources, Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-4320-7637, e-mail: alexandra.belyanovskaya@outlook.com

Evgeniya A. Soldatova

Senior Researcher at the Centre for Isotope Biogeochemistry, Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation, ORCID: 0000-0003-3967-4822, e-mail: 2a61@mail.ru

Elizaveta V. Krestyannikova

Research assistant at the Research Institute for Ecology and Rational Use of Natural Resources, Tyumen State University, Tyumen, Russian Federation, ORCID: 0000-0001-5512-1465, e-mail: li3452@yandex.ru