

УДК 556.31:550.42

Скударь Даниил Юрьевич, аспирант кафедры геологии месторождений нефти и газа, Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень

e-mail: yskydar@mail.ru

**СТАБИЛЬНЫЕ ИЗОТОПЫ КИСЛОРОДА И ВОДОРОДА КАК
ИНСТРУМЕНТ РЕШЕНИЯ АКТУАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ КАЧЕСТВА
ВОД ГОРОДА ТЮМЕНИ**

Аннотация

Рассмотрены актуальные проблемы качества подземных и поверхностных вод города Тюмени и юга Тюменской области, обусловленные сочетанием природных и техногенных факторов. Показано, что для региона характерны повышенные концентрации железа, марганца, азотсодержащих соединений, нефтепродуктов и поверхностно-активных веществ в водных объектах. Существенная доля проб питьевой воды, не соответствует гигиеническим требованиям по санитарно-химическим показателям. Обосновывается перспективность применения анализа стабильных изотопов кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода ($\delta^2\text{H}$) для решения задач идентификации источников загрязнения, оценки уязвимости водоносных горизонтов и оптимизации системы водоснабжения Тюмени. Предлагается концепция интеграции изотопного мониторинга в региональную систему контроля качества воды.

Annotation

The article discusses current problems with the quality of groundwater and surface water in the city of Tyumen and the southern part of the Tyumen region, caused by a combination of natural and man-made factors. It shows that the region is characterized by elevated concentrations of iron, manganese, nitrogen-containing compounds, petroleum products, and surface-active substances in water bodies. A significant proportion of drinking water samples do not meet hygienic requirements

for sanitary and chemical indicators. The prospect of using stable oxygen ($\delta^{18}\text{O}$) and hydrogen ($\delta^2\text{H}$) isotope analysis to identify sources of pollution, assess the vulnerability of aquifers, and optimize the water supply system in Tyumen is justified. A concept for integrating isotope monitoring into the regional water quality control system is proposed.

Ключевые слова: Тюмень, подземные воды, поверхностные воды, загрязнение, стабильные изотопы, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, качество питьевой воды

Keywords: Tyumen, groundwater, surface water, pollution, stable isotopes, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, drinking water quality

Введение

Город Тюмень и юг Тюменской области располагаются в пределах юго-западной части Западно-Сибирского артезианского мегабассейна, где основные запасы и ресурсы пресных и слабоминерализованных подземных вод связаны с олигоцен-четвертичным, неоген-палеогеновым и верхнеюрским водоносными комплексами. Разведанные и предварительно оцененные запасы пресных подземных вод на юге области составляют порядка 0,75–0,85 млн.м³/сут, а суммарные прогнозные эксплуатационные ресурсы олигоцен-четвертичного комплекса оцениваются примерно в 6,0 млн.м³/сут. При этом фактический отбор не превышает 0,17–0,25 млн.м³/сут, то есть используется 20–25 % разведанных запасов. Уже эти цифры показывают, что ключевая проблема региона связана не с количеством, а с качеством водных ресурсов [1, 2].

Согласно данным регионального Роспотребнадзора, в 2024 году доля проб воды из источников хозяйственно-питьевого водоснабжения Тюменской области, не соответствующих нормативам по санитарно-химическим показателям, достигла 43,8 %, а по микробиологическим показателям было забраковано около 3,9 % проб. Для подземных источников централизованного водоснабжения доля проб, не соответствующих гигиеническим нормативам по санитарно-химическим показателям, составила 48,4 % (в 2023 году – 45,9 %), что свидетельствует о нарастающей проблеме качества подземных вод,

используемых населением. При этом по данным органов власти 90–92 % жителей области обеспечены питьевой водой, формально отвечающей требованиям безопасности, но доля проб, не соответствующих санитарно-химическим показателям в распределительной сети, остается на уровне порядка 18 %, а по микробиологическим показателям – около 2 % [3].

В водных объектах в пределах города Тюмени и прилегающих территорий фиксируется превышения по железу, марганцу, азоту аммонийному и нитритному, нитратам, нефтепродуктам, алюминию, ПАВ, а также по показателям ХПК и БПК₅. В нецентрализованных системах водоснабжения средние концентрации железа в ряде населенных пунктов достигают 1,9 ПДК, а марганца – около 1,2 ПДК, что делает именно эти элементы ведущими лимитирующими показателями качества воды. При таком сочетании высокой ресурсной обеспеченности и значимой доли «проблемных» проб возникает необходимость, не только совершенствования технологий очистки, но и более глубокого понимания происхождения вод, путей их миграции и миграции загрязняющих веществ, а также степени уязвимости водоносных горизонтов [4, 5, 6].

Традиционные гидрохимические исследования позволяют фиксировать факт загрязнения, но зачастую не дают информации о генезисе воды, источниках загрязнения и доле «быстро» и «медленно» обновляемых вод в системе водоснабжения. В этой связи все большую значимость для Тюмени приобретают изотопные методы, основанные на изучении стабильных изотопов, таких как изотопы кислорода ($\delta^{18}\text{O}$) и водорода ($\delta^2\text{H}$), успешно применяемые в мировой и отечественной практике для решения аналогичных задач [15, 16, 17, 18, 19].

Теоретические основы изотопного анализа воды

Изотопный состав кислорода и водорода в молекуле воды описывается значениями $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^2\text{H}$, выражаемыми в промилле (‰) относительно международного стандарта VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) по следующей формуле:

$$\delta X = (R_{\text{обр}}/R_{\text{ст}} - 1) \times 1000\text{‰}$$

где $R_{\text{обр}}$, $R_{\text{ст}}$ – соотношения изотопов ($^2\text{H}/^1\text{H}$ или $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) в исследуемой пробе по сравнению с эталонным образцом.

Для гидрогеологических задач ключевым ориентиром служит глобальная линия метеорных вод – ГЛМВ (Global Meteoric Water Line, GMWL) или линия Крейга, описываемая уравнением [7]:

$$\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10$$

В условиях умеренных и холодных широт, к которым относят юг Западной Сибири, изотопный состав атмосферных осадков варьирует в широком диапазоне: для средней полосы и северных регионов России характерны значения $\delta^{18}\text{O}$ от -14 ‰ до 0‰ и $\delta^2\text{H}$ от порядка -110 ‰ до -60 ‰. Такая высокая изменчивость связана с сезонностью, температурой, траекторией воздушных масс и долей снеговых и дождевых осадков. Подземные воды, формирующиеся за счет инфильтрации осадков, наследуют эти значения с той или иной модификацией, связанной с испарением и взаимодействием «вода-порода». Более древние воды могут демонстрировать смещение относительно ГЛМВ вследствие долгосрочных процессов изотопного обмена и климатических условий в периоды их формирования [8, 9].

Для Тюмени и юга Тюменской области сочетание современных инфильтрационных вод, связанных с текущей климатической обстановкой, и более древних вод, заключенных в мезозойско-кайнозойском осадочном чехле, создает благоприятные условия для применения изотопных методов в задачах идентификации источников питания и оценки уязвимости водоносных горизонтов.

Актуальные проблемы качества вод Тюмени

Город Тюмень расположен на берегах реки Туры и ее притоков, в зоне развития аллювиальных и покровных отложений, в которых формируются неглубокие подземные воды, активно взаимодействующие с техногенными источниками. Региональный мониторинг показывает, что в ряде участков

городской черты и прилегающих территорий фиксируются устойчивые превышения по железу, марганцу, азоту аммонийному и нитритному, нитратам, нефтепродуктам, алюминию, ПАВ, а также по показателям ХПК и БПК₅. Для нецентрализованного водоснабжения характерны средние концентрации железа и марганца порядка 1,9 ПДК и 1,2 ПДК, соответственно, что сопровождается жалобами населения на органолептические свойства воды и повышенные риски для здоровья при длительном употреблении [2, 4, 5, 6].

Согласно открытым данным Роспотребнадзора и средств массовой информации, в 2024–2025 гг. в ряде муниципалитетов Тюменской области доля проб питьевой воды, не соответствующих нормативам по санитарно-химическим и микробиологическим показателям, превышала 50 %, при этом отмечается тенденция к росту доли забракованных проб по сравнению с 2022–2023 гг. Это указывает не только на наличие локальных проблем, но и на системный характер ухудшения качества водной среды на фоне природных особенностей и антропогенной нагрузки [3].

В пределах городской застройки Тюмени на качество вод влияют коммунально-бытовая инфраструктура, промышленные площадки, автодорожная сеть, объекты хранения и распределения топлива и другие факторы. Многие загрязняющие компоненты имеют как природное, так и техногенное происхождение, что при использовании только традиционных гидрохимических показателей затрудняет однозначную идентификацию источников загрязнения. Кроме того, значительная часть загрязняющих веществ носит диффузный характер (атмосферные выпадения, поверхностный сток, просачивание через почву), что еще больше усложняет задачу выделения основных путей миграции.

Информация о генезисе подземных вод и скорости их обновления для большинства эксплуатационных горизонтов остается фрагментарной, а возрастная структура ресурсов часто оценивается лишь косвенно. Отсутствие детализированной возрастной и изотопной информации создает риск

недооценки уязвимости неглубоких горизонтов, особенно в условиях роста техногенной нагрузки.

Возможности применения изотопного анализа в условиях Тюмени

Изотопный состав $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ позволяет надежно различать воды, формирующиеся за счет атмосферных осадков и более древние подземные воды. Для Тюмени это дает возможность количественно оценить долю «быстро обновляемых» инфильтрационных вод в составе запасов, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, и выделить участки, где эксплуатационные горизонты наиболее уязвимы к проникновению загрязняющих веществ [9, 10].

Сопоставление изотопных характеристик воды р. Туры и малых водотоков с данными по подземным водам позволяет выявлять участки активного гидродинамического взаимодействия поверхностных и подземных вод. В таких зонах следует принимать особые меры при проектировании и эксплуатации водозаборов, поскольку риск быстрого переноса загрязняющих веществ из русла и прибрежной зоны в водоносные горизонты повышен.

Сам по себе изотопный состав воды не отражает концентрации загрязнителей, однако он позволяет разделить потоки воды различного происхождения и увязать выявленные аномалии со сценариями миграции.

При добавлении данных по изотопному составу растворенных компонентов (например, нитратов и неорганического углерода) становится возможным более четко различать вклад сельскохозяйственных, коммунально-бытовых и промышленных источников загрязнения. Это важно для точечного планирования мероприятий по снижению загрязнения и оптимизации землепользования [10].

Для юга Западной Сибири изменение режима атмосферных осадков, температуры могут приводить к трансформации структуры питания подземных вод, изменению доли снегового и дождевого стока и величины испарительных потерь. Мониторинг $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ в осадках и подземных водах позволяет проследить эти изменения во времени и своевременно

скорректировать стратегии управления водными ресурсами. В условиях прогнозируемого изменения климата такая информация становится необходимой составляющей долгосрочного планирования.

Заключение

На основе имеющихся проблем включение изотопного анализа стабильных изотопов кислорода и водорода в систему регионального экологического мониторинга позволит:

- уточнить схемы питания и разгрузки подземных вод в пределах городской агломерации Тюмени и юга области

- обосновать перевод части населенных пунктов и водозаборов на более защищенные горизонты с меньшей долей «молодой» уязвимой воды

- приоритизировать мероприятия по очистке участков, где инфильтрация техногенно-нагруженных поверхностных вод наиболее интенсивна, особенно там, где доля забракованных проб превышает 40–50 %

- повысить эффективность взаимодействия природоохранных органов, водоканала и муниципальных структур при планировании и реализации инфраструктурных проектов, влияющих на водный баланс и качество вод

Стабильные изотопы кислорода и водорода таким образом выступают не только исследовательским инструментом, но и практическим ресурсом для решения ключевых водных проблем Тюмени, способствуя повышению безопасности питьевого водоснабжения и устойчивости городской среды в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1. Тюменский филиал ФБУ «ТФГИ по Уральскому ФО». Пресные подземные воды юга Тюменской области (справочная записка). Тюмень, 2016. 32с.
2. Состояние и использование минерально-сырьевой базы Тюменской области. Информационный бюллетень. М.: Роснедра, 2020. 112 с.

3. Роспотребнадзор. О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения Тюменской области в 2024 году: государственный доклад. Тюмень, 2025. 212 с.
4. Содержание загрязняющих веществ в водных объектах Тюменской области в 2023 году. Официальный доклад. Тюмень: Департамент недропользования и экологии Тюменской области, 2024, 68 с.
5. Лапенко А.А., и др. Гигиеническая оценка содержания железа в водопроводной воде административных центров севера Тюменской области // Здоровье населения и среда обитания. 2022. №4. с. 32–38.
6. Содержание железа и марганца в водах объектов питьевого водоснабжения: приморские и северные регионы России // География и природные ресурсы. 2025. Т. 46, №1. с. 80–95.
7. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. Vol. 133. P. 1702-1703.
8. Новиков Д.А., и др. Эволюция состава стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода в водах нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2023. Т. 25, №4. с. 219–232.
9. О роли изотопного состава кислорода и водорода подземных вод в оценке условий формирования водоносных горизонтов Западной Сибири // Материалы конф. «ГеоСибирь-2024». Новосибирск, 2024. Т. 2-1. с. 131–136.
10. Лепокурова О.Е., Иванова И.С., Пыряев А.Н. Использование стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода при интерпретации условий формирования поверхностных водных объектов Ямало-Ненецкого автономного округа // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334, №6. с. 7–19.

References

1. Tyumen Branch of the Federal Budgetary Institution “TFGI for the Ural Federal District.” Fresh groundwater in the south of the Tyumen Region (reference note). Tyumen, 2016. 32 p.
2. The state and use of mineral resources in the Tyumen Region. Information bulletin. M.: Rosnedra, 2020. 112 p.
3. Rospotrebnadzor. On the state of sanitary and epidemiological well-being of the population of the Tyumen Region in 2024: state report. Tyumen, 2025. 212 p.
4. Contents of pollutants in water bodies of the Tyumen Region in 2023. Official report. Tyumen: Department of Subsurface Use and Ecology of the Tyumen Region, 2024, 68 p.
5. Lapenko A.A., et al. Hygienic assessment of iron content in tap water in administrative centers in the north of the Tyumen Region // Public Health and Environment. 2022. No. 4. pp. 32–38.
6. Iron and manganese content in drinking water supply facilities: coastal and northern regions of Russia // Geography and Natural Resources. 2025. Vol. 46, No. 1. pp. 80–95.
7. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. 1961. Vol. 133. P. 1702-1703.
8. Novikov D.A., et al. Evolution of the composition of stable isotopes of hydrogen, oxygen, and carbon in the waters of oil and gas deposits in the northern regions of Western Siberia // News of Higher Educational Institutions. Geology and Exploration. 2023. Vol. 25, No. 4. pp. 219–232.
9. On the role of the isotopic composition of oxygen and hydrogen in groundwater in assessing the conditions for the formation of aquifers in Western Siberia // Proceedings of the GeoSibir-2024 conference. Novosibirsk, 2024. Vol. 2-1. pp. 131-136.
10. Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyryaev A.N. The use of stable isotopes of hydrogen, oxygen, and carbon in interpreting the conditions for the formation of surface water bodies in the Yamalo-Nenets Autonomous Okrug // News of

Tomsk Polytechnic University. Georesource Engineering. 2023. Vol. 334, No. 6. pp. 7-19.