


УДК 556.314
DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5270
Шифр специальности ВАК: 1.6.6
Научная статья



Новые изотопно-геохимические данные по минеральной подземной воде «Омега»

О.Е. Лепокурова^{1,2}, Н.А. Мухортина¹

¹ Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, г. Томск

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

 LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Аннотация. Актуальность. Несмотря на многолетние исследования воды из скважины Чулымской, до сих пор имеются противоречивые и неполные данные по растворенным органическим веществам и изотопному составу воды, к тому же накопились новые геохимические данные, которые ранее не были представлены. **Цель.** На основе накопленного за 30 лет материала и полученных новых данных доизучить геохимию природной минеральной воды «Омега» с упором на изотопный и органический состав, в том числе впервые представить данные по полициклическим ароматическим углеводородам. **Объект.** Подземная вода из скважины Чулымской, для сравнения также приводятся данные по другим подземным водам региона. **Методы.** Стандартные аналитические методы исследования химического, органического и изотопного составов вод. Изучение изменений состава воды на протяжении 20–30 лет и сравнение с другими подземными водами региона в схожих геологических условиях. **Результаты и выводы.** Собранные имеющие за 30 лет и получены новые данные по химическому составу минеральной воды, которые показали его стабильность во времени, однако не рекомендован отбор проб в летнее время. Представлена информация по всем имеющимся показателям растворенного органического вещества, не позволяющая отнести «Омегу» к группе вод с повышенным растворенным органическим веществом. Более того, концентрации растворенного органического вещества ниже, чем для других подземных вод региона. Впервые представлен состав полициклических ароматических углеводородов в данной воде, который показал преобладание высокомолекулярных над низкомолекулярными полициклическими ароматическими углеводородами, в частности превалирует дибенз(ah)антрацен (39 %). Изотопные исследования показали достаточно типичный состав самой воды (δD , $\delta^{18}O$) и очень переменчивый состав растворенного углерода $\delta^{13}C_{org}$ от $-30,3$ до $-10,7$ ‰. Авторы настаивают на его биогенном источнике, изменяющемся под действием различных биогеохимических процессов, в исследовании которых предстоит разобраться в дальнейшем.

Ключевые слова: минеральная вода «Омега», химический состав, растворенные органические вещества, полициклические ароматические углеводороды, стабильные изотопы воды и водорастворенного углерода, Томская область

Благодарности: Исследование выполнено за счет средств проекта РФФ № 24-27-00372. Авторы выражают благодарность Ольге Филипповне Зятевой за предоставление данных по составу вод в период 1994–2000 гг.

Для цитирования: Лепокурова О.Е., Мухортина Н.А. Новые изотопно-геохимические данные по минеральной подземной воде «Омега» // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2025. – Т. 336. – № 11. – С. 134–144. DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5270

UDC 556.314
DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5270
Scientific paper



New isotope-geochemical data on the mineral underground water Omega

O.E. Lepokurova^{1,2}✉, N.A. Mukhortina¹

¹ Tomsk Branch of the Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS, Tomsk, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉ LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Abstract. Relevance. Despite many years of research on water from the Chulymskaya well, there are still contradictory and incomplete data on dissolved organic matter and the isotopic composition of water, in addition, new geochemical data have accumulated that were not previously presented. **Aim.** Based on the material accumulated over 20 years and new data obtained, further study the geochemistry of natural mineral water Omega with an emphasis on the isotopic and organic composition, including the first presentation of data on polycyclic aromatic hydrocarbons. **Objects.** Groundwater from the Chulymskaya well; data on other groundwater in the region are also provided for comparison. **Methods.** Standard analytical methods for studying water chemical, organic and isotopic composition. Study of changes in water composition over 20–30 years and comparison with other groundwater in the region under similar geological conditions. **Results and conclusions.** The data on the chemical composition of mineral water have been collected for 30 years and new data were obtained, which shown its stability over time, however, sampling in summer is not recommended. Information on all available indicators of dissolved organic matter is presented, which does not allow classifying Omega as water with increased dissolved organic matter. Moreover, dissolved organic matter concentrations are lower than for other groundwater in the region. The polycyclic aromatic hydrocarbon composition in this water was presented. This showed the prevalence of high-molecular polycyclic aromatic hydrocarbons over low-molecular ones, in particular, dibenz(ah)anthracene prevails (39%). Isotope studies shown a fairly typical composition of the water itself (δD , $\delta^{18}O$) and a very variable composition of dissolved carbon $\delta^{13}C_{DIC}$ from –30.3 to –10.7‰. The authors insist on its biogenic source, changing under the effect of various biogeochemical processes, the study of which is to be understood in the future.

Keywords: Omega mineral water, chemical composition, dissolved organic substances, polycyclic aromatic hydrocarbons, stable isotopes of water and water-dissolved carbon, Tomsk region

Acknowledgements: The research was financially supported by the RSF no. 24-27-00372. The authors express their gratitude to Olga F. Zyateva for providing data on the composition of waters for 1994–2000.

For citation: Lepokurova O.E., Muchortina N.A. New isotope-geochemical data on the mineral underground water Omega. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2025, vol. 336, no. 11, pp. 134–144. DOI: 10.18799/24131830/2025/11/5270

Введение

Изучением геохимии минеральной воды из скважины Чулымской (1-Р), выпускающей под торговым названием «Омега», коллектив занимается около 20 лет: за это время рассмотрен химический, в том числе микрокомпонентный, изотопный и даже микробиологический состав, исследовано равновесие вод с породами, предложены механизмы формирования состава данных вод [1–5]. Основной научный интерес именно к этой воде связан с ее необычными свойствами: сильнощелочная и пресная (ближе к ультрапресной), распространенная в осадочных песчано-алевролитистых породах, а не в щелочных магматических, как это характерно для аналогичных вод [6–13]. Свои гипотезы по формированию состава данных вод были изложены в работах [3, 4], но остается ряд нерешенных во-

просов и появились новые геохимические данные, которые хотелось бы представить.

Одним из спорных моментов, который возникал при изучении данных вод и давно требовал внимания, – наличие/отсутствие в воде растворенных органических веществ (РОВ). Томским научно-исследовательским институтом курортологии и физиотерапии (Томский НИИКиФ) в 1968–2000 гг. периодически опробовалась вода скважины, и впоследствии дано заключение о качестве и бальнеологической ценности данной воды, в котором в том числе указываются высокие концентрации РОВ в количестве до 10 мг/дм³ по Сорг (при кондиции 5 мг/дм³) и предлагается отнести их к группе вод с повышенным содержанием РОВ. Однако наши исследования с начала 2000-х гг. не выявили повышенных количеств органических веществ. Более

того, схема формирования состава вод строилась на тезисе о низких концентрациях органики в породах, из-за чего рН вод не подкисляется и остается высоким [3, 4]. В настоящем исследовании мы решили собрать и детализировать имеющиеся данные по РОВ, в том числе впервые привели данные по полициклическим ароматическим углеводородам (ПАУ).

Кроме того, остается невыясненным вопрос очень легкого изотопного состава водорастворенного углерода, определенного нами еще в 2013 г. [3]. Поэтому снова была отобрана проба на изотопный состав как самой воды (δD , $\delta^{18}O$), так и водорастворенного углерода ($\delta^{13}C$).

Таким образом, целью работы было доизучить геохимию щелочной пресной подземной воды из скважины Чулымской с привлечением в том числе новой информации по изотопному и органическому составу вод, включая впервые данные по составу ПАУ.

Объект и методы исследования

Пресные сильнощелочные воды в Чулымском артезианском бассейне достоверно были обнаружены только в отложениях нижнего мела в двух опорных скважинах: в Чулымской (на глубине 1266–1271 м) и Касской (в интервалах глубин 640–710 и 1030–1040 м). Последняя скважина законсервирована, имеются лишь литературные данные по составу вод. Из-за недостаточной информации площадное их распространение определить трудно. В разрезе зона развития данных вод была представлена в работах [1, 3, 4]. Питание вод происходит с юго-востока, с Алтае-Саянского горного обрамления, где распространены пресные трещинно-жильные воды в гранитах и метаморфических породах. В Чулымском бассейне за счет подтока пресных вод, отсутствия выраженных водоупоров и мощных песчаных отложений граница зоны активного водообмена опускается на глубину до 2 км.

Опорная Чулымская скважина находится у с. Тегульдэт, пробурена Чулымской партией треста «Запсибнефтегеология» в 1956 г. глубиной около 3 км, самоизливающаяся. Водоносный горизонт вскрыт на глубинах ~1,3 км и представлен песчано-алевролитистыми породами илекской свиты нижнего мела. Первоначально дебит составлял 122,8 м³/сут, температура на изливе 22 °С; в период 1981–1982 гг. при обследовании Томской геологоразведочной экспедицией отмечены понижения дебита и температуры до 40 м³/сут и 16 °С соответственно; однако исследования Томского НИИКиФ в период 1968–1995 гг. показали стабильность температуры на изливе 21–23 °С, дебит был измерен разово в ноябре 1995 г. и составил 78 м³/сут. В заключении Томского НИИКиФ о качестве и бальнеологической ценности данной воды в начале

2000-х гг. указывается, что это природная слабо-минерализованная кремнистая гидрокарбонатная натриевая питьевая лечебно-столовая вода, которая рекомендуется при заболеваниях желудочно-кишечного тракта, эндокринной, костно-мышечной системы, сердечно-сосудистых и нервных заболеваниях [1].

Опробование подземной воды сотрудниками Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики (ТФ ИНГГ) СО РАН проводилось в сентябре 2006 г., в августе 2010 г., в апреле 2011 г., в июле 2013 г. и в ноябре 2023 г. На месте (in situ) определялись параметры быстроизменяющихся компонентов, таких как Eh, рН, температура и пр.

Химический анализ воды до 2013 г. проводился стандартными методами в Томском политехническом университете, а также определялись некоторые показатели РОВ: органический углерод (Сорг) методом высокотемпературного каталитического окисления, перманганатная окисляемость (ПО), химическое потребление кислорода (ХПК), биохимическое потребление кислорода (БПК₅) методами титрования, определение фульвокислот и гуминовых кислот методом титрования по учету бихромата, расходуемого на окисление углерода фульвогуминовых кислот. В 2023–2024 гг. состав воды определялся в ТФ ИНГГ СО РАН; а также качественные и количественные измерения ПАУ методом высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ) на хроматографе Shimadzu LC-20 (Shimadzu, Япония) с диодно-матричным и флуоресцентным детектированием, на обращенно-фазовой колонке SupelcoSil LC-PAH с фазой C₁₈.

Определение изотопного состава кислорода и водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты (DIC – dissolved inorganic carbon) проводилось в двух организациях: в 2013 г. в Томском филиале Федерального Государственного унитарного предприятия «СНИИГТИМС» методом изотопного уравнивания с использованием универсальной системы подготовки и ввода проб газов GasBench II на масс-спектрометре DELTA V ADVANTAGE; в 2023 г. в Центре коллективного пользования многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск) с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II и FlashEA 1112. Все значения δD , $\delta^{18}O$ и $\delta^{13}C_{DIC}$ представлены в ‰ относительно международных стандартов VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water – Венский стандарт средней океанической воды) для кислорода и водорода, VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite – Венский стандарт Белемнита формации Пии Дии) – для углерода.

Результаты исследования и обсуждение

Основные характеристики и состав подземной воды на протяжении периода наблюдений – 2006–2023 гг., а также по данным Томского НИИКиФ за 1994–2000 гг. (более детально в работах [1, 4]), представлены в табл. 1. Вода теплая с температурой на устье 19–23 °С, пресная со значением общей минерализации 261–385 мг/дм³. Среда восстановительная с Eh от –279 до –44 мВ (первоначально фиксировался сероводород до 8,5 мг/дм³), сильно щелочная с рН от 9,1 до 10,1. По химическому составу вода гидрокарбонатно-карбонатная (НСО₃⁻ + СО₃²⁻ > 93 мг-экв %) натриевая (Na⁺ > 96 мг-экв %), т. е. содовая. Из специфических компонентов в воде отмечается метакремневая кислота в количестве 21–35 мг/дм³ (при кондиции отнесения к минеральным водам 50 мг/дм³). В составе водорастворимых газов превалирует азот [3, 4].

Как видно из табл. 1, изменения состава за почти 30-летний период незначительны, в пределах погрешности. Исключения составляют показатель Сорг (о нем речь будет ниже) и хлор-ион: их концентрации в разы меньше в 2006–2023 гг. по сравнению с данными 1994–2000 гг. В результате в формуле ионно-солевого состава ионы Cl⁻ и SO₄²⁻ меняются местами (табл. 1), хотя в общей сумме они и не превышают 10 мг-экв %. Причина, скорее всего, кроется в более точных методах современных анализов.

Что касается изменений состава воды в разные сезоны годы, то, хотя выборка и недостаточно представительная, отмечена небольшая тенденция

уменьшения рН, минерализации и даже Сорг в летний сезон. Если предположить причину в разбавлении вышезалегающими водами, то объяснимо только снижение рН. Соленость и выше, и ниже залегающих вод больше [3–4].

Перейдем к рассмотрению растворенной органики, наименее изученной в подземной воде. В основном при описании количественной характеристики РОВ в гидрогеологии оперируют показателем концентрации органического углерода Сорг, а также показателем ПО, ХПК, БПК₅ [14]. Из качественных характеристик состава РОВ можно отметить нефтепродукты (НП), фенолы, гуминовые вещества; иногда индивидуальные органические соединения, такие как уксусная, муравьиная кислоты, различные ароматические углеводороды (бензол, тулуол и др.). Однако определение их часто бывает невозможным из-за низких концентраций, особенно в пресных водах [15].

В основном исследования РОВ в водах связаны с экологическими задачами [16–20]. В зависимости от целей водопользования регламентируются показатели: ПО, ХПК, БПК, нефтепродукты, фенолы [21–23]. В последнее время большой интерес вызывают гумусовые вещества, во-первых, поскольку на них приходится наибольшее количество РОВ (50–90 % [15]), и, во-вторых, это связано с их характерной особенностью образовывать устойчивые комплексные соединения. Более детально про их составляющие – гуминовые кислоты (ГК) и фульвокислоты (ФК), написано в [14].

Таблица 1. Химический состав минеральной воды в скважине Чулымской

Table 1. Chemical composition of mineral water in the Chulymskaya well

| Дата отбора пробы Date of sampling | | 1994–2000* | 09.2006 | 08.2010 | 04.2011 | 08.2013 | 11.2023 |
|---|----------------------------|--|-----------|---------|---------|---------|---------|
| T, °C | | 21–23 | 20 | 21 | 19 | 20 | 21 |
| Eh, мВ/mV | | – | – | –86 | –44 | – | –279 |
| pH | | 9,1–10,3 | 9,6 | 9,3 | 10,1 | 9,1 | 9,4 |
| Σ TDS | мг/дм ³ mg/L | 261–385 | 309 | 316 | 301 | 318 | 359 |
| HCO ₃ ⁻ | | 91–220 | 162 | 159 | 129 | 180 | 188 |
| CO ₃ ²⁻ | | 8–67 | 36 | 60 | 61 | 30 | 30 |
| SO ₄ ²⁻ | | 0,1–20,4 | 9,6 | 8,4 | 9,7 | 11,4 | 10,3 |
| Cl ⁻ | | 4,2–10,6 | 1,5 | 1,8 | 1,4 | 1,9 | 0,8 |
| Ca ²⁺ | | 0,1–4,0 | 0,4 | 1,2 | 0,6 | 3,1 | 0,9 |
| Mg ²⁺ | | 0,1–2,0 | 0,1 | 0,5 | 0,2 | 0,1 | 0,1 |
| Na ⁺ | | 85–96 | 94 | 85 | 100 | 91 | 98 |
| K ⁺ | | | 0,1 | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 0,2 |
| H ₂ SiO ₃ | | | 26,8–34,6 | 20,9 | 28,8 | 31,3 | 30,8 |
| C _{орг} /DOC | | 4,1–9,8 | – | 1,1 | 1,9 | 1,3 | – |
| Формула ионно-солевого состава/Ion-salt formula | | | | | | | |
| 1994–2000** | M 0,26–0,38 | НСО ₃ 38–76 СО ₃ 14–34 Cl 2–7 SO ₄ 0–6 T 21–23 pH 9,1–10,3 Na+K 85–96 Ca 0–5 Mg 0–4 | | | | | |
| 2006–2023 | M 0,30–0,36 | НСО ₃ 48–71 СО ₃ 23–46 SO ₄ 4–5 Cl 0–1 T 19–21 pH 9,1–10,1 Na 85–100 Ca 0,5–3,7 Mg 0–1 | | | | | |

Примечание: *данные Томского НИИКиФ, 8 проб; Σ – сумма ионов, минерализация вод; прочерк – нет данных.

Note: *data from the Tomsk Research Institute of Balneology and Physiotherapy, 8 water samples; TDS – total dissolved solids, dash – no data.

Таблица 2. РОВ в минеральной воде из скважины Чулымской

Table 2. Dissolved organic matter (DOM) in mineral water from the Chulymskaya well

| Дата отбора пробы Date of sampling | Сорг DOM | ПО OD | ХПК COD | БПК ₅ BOD | ФК FA | ГК HA | НП HOI | Фенолы Phenols |
|--|----------------------------|----------------|------------|--|----------------------------|----------|-----------|-------------------|
| | мг/дм ³ mg/L | мгО/л mgO/L | | мгО ₂ /дм ³ mgO ₂ /L | мг/дм ³ mg/L | | | |
| 1994–2000* | 4,1–9,8 | – | – | – | – | – | – | нпо/mdl – 0,003 |
| 08.2010 | 1,06 | 0,36 | нпо/mdl | – | 1,89 | 0,34 | 2,39 | – |
| 04.2011 | 1,92 | 0,68 | | – | 3,96 | 0,34 | 0,03 | нпо/mdl |
| 07.2013 | 1,34 | – | | 2,26 | нпо/mdl | нпо/mdl | – | – |
| воды из неглубоких скважин в с. Тегульдэт water from shallow wells in the village of Teguldet | | | | | | | | |
| 08.2010 | 2,88 | 1,56 | – | – | 6,34 | нпо/mdl | 0,93 | – |
| 07.2013 | 3,85 | – | 5,74 | 2,62 | 6,25 | 0,33 | – | – |

Примечание: *данные Томского НИИКуФ, 4 пробы; прочерк – нет данных; нпо – ниже пределов обнаружения.

Note: *data from the Tomsk Research Institute of Balneology and Physiotherapy, 4 water samples; dash – no data; mdl – below detection limits; OD – oxygen demand; COD – chemical oxygen demand; BOD – biochemical oxygen demand; FA – fulvic acid; HA – humic acid; HOI – hydrocarbon oil index.

Были собраны имеющиеся показатели по РОВ в минеральной воде, они оказались в основном за период 2010–2013 гг. (табл. 2). Для сравнения приведены значения по подземным водам верхних горизонтов из неглубоких скважин в с. Тегульдэт. Как видно, концентрации органических веществ низкие почти по всем параметрам, кроме единожды появившегося превышения по НП в августе 2010 г. Показатель Сорг не достигает кондиции в 5 мг/дм³ для отнесения к группе вод с повышенным РОВ, находится в пределах всего 1–2 мг/дм³, что в среднем в три раза ниже вышележающих подземных вод. Значения ПО, ХПК, БПК₅, фенолов ниже предельно допустимых концентраций (ПДК) для различных целей водопользования и аналогичных показателей для пресных вод верхних горизонтов. Достаточно низкие концентрации ГК (2,2–4,3 мг/дм³) по сравнению с фоном для региона [14, 24–26], но при этом соотношение ФК/ГК типично и составляет примерно 5–10. Высокий показатель НП пока трудно объяснить, можно только отметить отбор этой пробы в летний сезон, и что для нее также характерны и некоторые отклонения в значениях общей минерализации и рН.

Для детализации состава растворенной органики, в том числе объяснения возможной причины высоких концентраций НП в пробе 2010 г., нами впервые в данной воде изучены ПАУ – органические соединения, для которых характерно наличие в химической структуре двух и более конденсированных бензольных колец. В настоящее время они активно изучаются во всем мире в экологических целях в поверхностных водах и донных осадках [27–30], поскольку являются чрезвычайно токсичными. Опосредованно изучаются и в грунтовых водах для прослеживания органического загрязнения вод, но в меньшем количестве [31, 32]. Из-за их способности к сохранению в природных объектах в течение длительного времени даже в низких кон-

центрациях могут выступать и индикаторами различных геохимических процессов, что и представляло интерес.

Результаты, полученные по пробе воды 2023 г., представлены в табл. 3. Общая сумма концентрации ПАУ в воде – 224 нг/дм³, что соответствует минимальным значениям для речных вод [27] и по некоторым неопубликованным данным для подземных вод региона. В составе ПАУ принято выделять две группы: низкомолекулярные ПАУ (НМ ПАУ) с 2–3 конденсированными ароматическими кольцами в структуре и высокомолекулярные ПАУ (ВМ ПАУ) – от 5 и более колец.

Таблица 3. ПАУ в минеральной воде из скважины Чулымской в ноябре 2023 г.

Table 3. Polyaromatic hydrocarbons (PANs) in mineral water from the Chulymskaya well in November 2023

| ПАУ/РАН | | мкг/дм ³ /μg/L | %о |
|--|----------------------|---------------------------|--------|
| Нафталин/Naphthalene | НМ ПАУ LMW PAN | 0,0260 | 11,62 |
| 2-метилнафталин 2-methylnaphthalene | | 0,0405 | 18,06 |
| Флуорен/Fluorene | | нпо/mdl | |
| Фенантрен/Phenanthrene | | 0,0179 | 7,99 |
| Антрацен/Anthracene | | нпо/mdl | |
| ΣНМ ПАУ/ΣLMW PAN | | 0,0844 | 37,67 |
| Флуорантен/Fluoranthene | ВМ ПАУ HMW PAN | 0,0138 | 6,18 |
| Пирен/Piropen | | 0,0003 | 0,15 |
| Бенз(а)антрацен Benz[a]anthracene | | 0,0226 | 10,07 |
| Хризен/Chrysene | | нпо/mdl | |
| Бенз(б)флуорантен Benz[b]fluoranthene | | 0,0036 | 1,60 |
| Бенз(к)флуорантен Benz[k]fluoranthene | | 0,0011 | 0,50 |
| Бенз[а]липен/Benz[a]pyrene | | 0,0099 | 4,41 |
| Дибенз(аh)антрацен Dibenz[ah]anthracene | 0,0883 | 39,41 | |
| ΣВМ ПАУ/ΣHMW PAN | | 0,1397 | 62,32 |
| ΣПАУ/ΣPAN | | 0,2241 | 100,00 |

Основные их различия, кроме количества колец, – НМ ПАУ более растворимы (больше находятся в растворенной форме), легче разлагаются, в том числе и поэтому ВМ ПАУ более канцерогенны и токсичны и в основном сорбируются на взвешенных частицах. Однако в подземной минеральной воде оказалось больше ВМ ПАУ (62 %), чем НМ ПАУ (38 %). При этом среди ВМ соединений выделяются: дибенз(ah)антрацен (39 %), бенз(a)антрацен (10 %), флуорантен (6 %) и бенз[a]пирен (4 %), остальных – единицы и доли %. Среди НМ ПАУ обнаружены только: 2-метилнафталин (18 %), нафталин (11 %) и фенантрен (8 %).

Из ПАУ в водах регламентируются [21] бенз[a]пирен ($<0,01$ мкг/дм³) и нафталин (<10 мкг/дм³). В данном случае их концентрации значительно ниже.

Пока трудно интерпретировать полученные данные, не накоплена база данных для подземных вод для их сравнения и использования [32]. Сомнительно, что в данных условиях имеется техногенный источник накопления ПАУ, о чем говорят и их низкие концентрации. Скорее всего, такой состав – это природные особенности накопления органических веществ в водоносном горизонте. Информации о естественных источниках поступления в подземные воды ПАУ мало [33, 34], в основном указывают на высокотемпературные (свыше 100 °С) процессы разложения захороненной органики [35] и abiогенный синтез (при температурах свыше 400 °С), например, вулканическую деятельность. Имеются исследования [34], подтверждающие достаточную распространенность ПАУ именно в осадочных породах в виде захороненной биоты. В скважине Чулымской в водоносном пласте на глубине ~1,3 км температура составляет ~40 °С. При низкотемпературном преобразовании органики активно включаются микроорганизмы [36, 37]. Действительно, наши исследования [5] зафиксировали достаточно активную микробиологическую деятельность (200 тыс. клеток в 1 мл воды), несмотря на бедность питательной среды (низкие концентрации минеральных и органических веществ).

Перейдем к рассмотрению изотопного состава воды и водорастворенного углерода. В табл. 4 приведены результаты по двум пробам 2011 и 2023 гг., кроме того, для сравнения представлены имеющиеся данные по подземным водам региона. Также были рассчитаны величина дейтериевого эксцесса (d_{exc}), т. е. отклонение значений δD от его количества в равновесном состоянии с кислородом, и кислородный сдвиг (КС) – отклонение значений $\delta^{18}O$ от глобальной линии метеорных вод (Global Meteoric Water Line – GMWL).

Фигуративные точки по изотопному составу минеральной воды и некоторых других подземных вод региона нанесены на диаграмму δD – $\delta^{18}O$ для наглядного сравнения с GMWL [38], которая на данном отрезке почти совпадает с локальной линией метеорных вод (Local Meteoric Water Line – LMWL) [39] (рисунок, а).

Значения δD и $\delta^{18}O$ для исследуемой «Омеги» в 2011 и 2023 гг. идентичны в пределах погрешности и ложатся на линию метеорных вод с небольшим кислородным сдвигом 0,5–0,8 ‰, дейтериевый эксцесс <10 (3,6–6,2), что говорит о неравновесных условиях формирования изотопного состава воды. Все показатели укладываются в диапазоны значений, характерных для подземных вод мел-палеогеновых отложений Томской области (табл. 4, рисунок, а). В то время как для подземных вод палеоген-четвертичных отложений ЯНАО отмечается небольшое облегчение изотопного состава и отрицательный КС в связи с более холодными условиями их питания [40]. Воды нефтяных отложений региона имеют тяжелый изотопный состав, преимущественно с положительным КС, что говорит о большем времени взаимодействия системы «вода–порода», высоких температурах в пласте и возможном смешении с седиментационными водами.

Наибольший интерес вызывал изотопный состав растворенного углерода $\delta^{13}C_{DIC}$, значение которого в 2011 г. было сверхлегкое $-30,3$ ‰, а уже в 2023 г. получено достаточно тяжелое $-10,7$ ‰, т. е. разница составила ~20 ‰.

Таблица 4. Изотопный состав минеральной воды в скважине Чулымской

Table 4. Isotopic composition of mineral water in the Chulymskaya well

| Дата отбора Date of sampling | δD | $\delta^{18}O$ | КС/OS | d_{exc} | $\delta^{13}C_{DIC}$ |
|---|-----------------|----------------|------------|-------------|----------------------|
| | | | ‰ | | |
| 04.2011 | -130,8 | -16,8 | 0,8 | 3,6 | -30,3 |
| 11.2023 | -128,9 | -16,9 | 0,5 | 6,2 | -10,7 |
| Другие подземные воды региона/Other groundwater in the region | | | | | |
| 04.2011* | -135,7...-111,4 | -17,4...-14,9 | 0,1...1,1 | 0,9...9,3 | -18,7...-26,2 |
| 2022–2023** | -135,2...-117,2 | -19,6...-15,9 | -1,4...0,7 | 4,3...21,5 | -30,4...-4,1 |
| 2022–2024*** | -128,9...-60,3 | -16,9...-6,5 | -0,2...2,3 | -8,1...11,7 | -9,7...23,6 |

Примечание: *воды мел-палеогеновых отложений Томской области (ТО), 6 проб; **воды палеоген-четвертичных отложений Ямало-Ненецкой автономной области (ЯНАО), 18 проб; ***воды нефтяных отложений ЯНАО, Ханты-мансийской автономной области (ХМАО) и ТО, 9 проб; КС – кислородный сдвиг; d_{exc} – дейтериевый эксцесс.

Note: *water of the Cretaceous-Paleogene deposits of the Tomsk region (TR), 6 samples; **water of the Paleogene-Quaternary deposits of the Yamalo-Nenets Autonomous Region (YaNAR), 18 samples; ***water of oil deposits (YaNAO, KhMAR and TR), 9 samples; OS – oxygen shift; d_{exc} – deuterium excess; DIC – dissolved inorganic carbon.

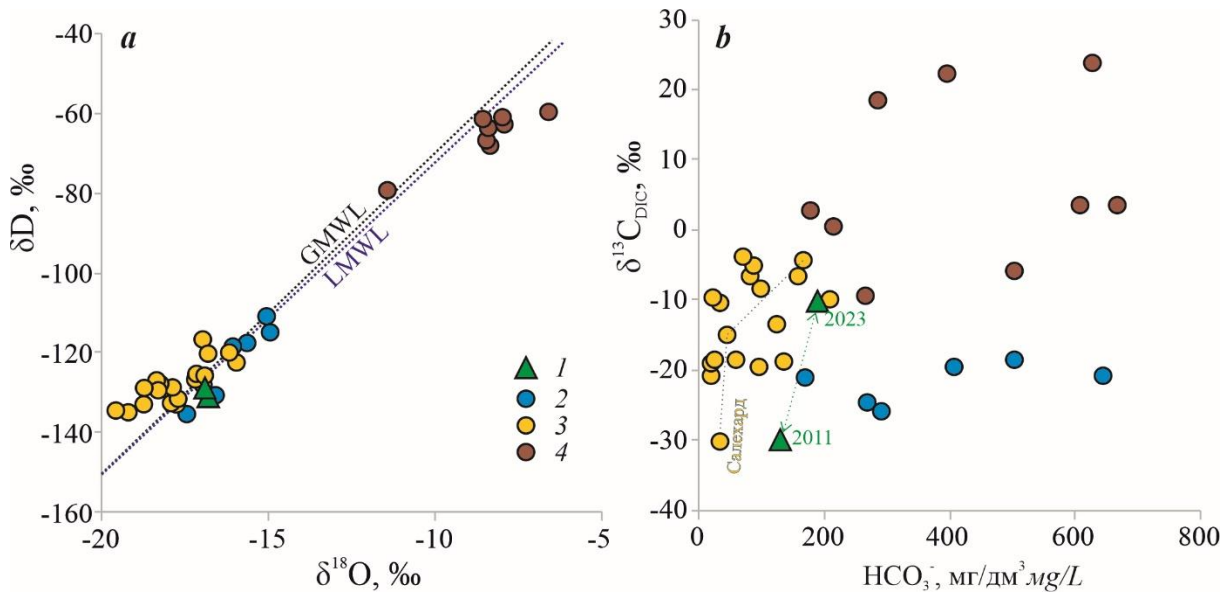


Рисунок. Диаграмма δD – $\delta^{18}O$ (a) и зависимость изотопного состава растворенного углерода $\delta^{13}C_{DIC}$ от концентрации гидрокарбонат-иона (b) с нанесением данных по изотопному составу вод: 1 – минеральная вода «Омега»; 2 – воды мел-палеогеновых отложений ТО; 3 – воды палеоген-четвертичных отложений ЯНАО, ХМАО и ТО

Figure. Diagram δD – $\delta^{18}O$ (a) and carbon isotopic composition $\delta^{13}C_{DIC}$ versus concentration of DIC (b) with data on the isotopic composition of waters: 1 – Omega mineral water; 2 – water of the Cretaceous-Paleogene deposits (TR); 3 – waters of Paleogene-Quaternary deposits (YaNAR); 4 – waters of oil deposits (YaNAO, KhMAR and TR)

Несмотря на то, что анализ проводился в разных лабораториях, ошибку мы исключили, поскольку предыдущие наши исследования показали хорошую сходимость результатов этих двух лабораторий. Попробуем разобраться, в чем причина такого большого разброса.

На рисунке представлена зависимость значений $\delta^{13}C_{DIC}$ от концентрации собственно HCO_3^- (b). Можно увидеть, что фигуративные точки «Омеги» находятся между точками подземных вод ТО и ЯНАО по содержанию гидрокарбонат иона. По разбросу значений $\delta^{13}C_{DIC}$ минеральные воды попадают в область пресных подземных вод северных районов Западной Сибири, для которых характерен еще больший разброс от $-30,4$ до $-4,1$ ‰. Причем вариации значений $\delta^{13}C_{DIC}$, например, у проб из трех рядом расположенных скважин в г. Салехарде на глубинах 23, 41, 80 м составляют $-15,3$, $-30,4$ и $-4,7$ ‰ соответственно (рисунок, b) в одинаковых по химическому составу водах аналогичных отложений.

Возможные причины этого мы уже попытались представить в работе [40], отклоняя любой другой источник кроме биогенного CO_2 в данных геологических условиях, а широкий интервал значений при этом, в частности обогащение вод ^{13}C , объяснялся различными геохимическими процессами в водоносном пласте, в том числе происходящими при участии микрофлоры. К ним можно добавить низкие концентрации гидрокарбонат-иона (<200 мг/дм³), как и в случае с подземными водами

ЯНАО, низкие концентрации органических веществ ($<0,5$ мг/дм³) [41]. Имеются данные по большому разбросу $\delta^{13}C_{DIC}$ от 10 до 21‰ в водах экстремальных сред (термальных и нефтяных отложений), который объясняется не аналитическими ошибками лабораторий, а конкретными характеристиками образцов или вторичными эффектами при хранении и обработке образцов [42].

Таким образом, вопрос о причинах вариаций значений $\delta^{13}C_{DIC}$ в минеральной воде «Омега» остается открытым, но такое явление зафиксировано во многих других подземных водах и подлежит дальнейшему исследованию.

Выводы

В результате обобщающих исследований и появившихся новых изотопно-геохимических данных по минеральной воде «Омега» освещены некоторые вопросы, которые ранее не рассматривались:

1. Основной ионный состав минеральной воды, а также значения температуры и pH вод стабильны за почти 30-летний период наблюдений. Некоторые вариации ионов хлора и сульфата объясняются погрешностями в точности разных анализов. Наибольшее изменение состава (по значениям минерализации, pH, Сорг и НП) отмечено для проб вод летнего периода. В причинах этого (есть ли смешение с другими водами?) необходимо разбираться. Все регламентирующие показатели состава воды не превышены.

- Для подземной воды характерны низкие, относительно других пресных подземных вод региона, концентрации РОВ по разным параметрам: Сорг, ПО, ХПК, БПК₅, фенолам, ГК, ΣПАУ. Они не могут быть отнесены к группе вод с повышенным РОВ, поскольку Сорг не достигают кондиции в 5 мг/дм³.
- Впервые исследованные ПАУ показали, что, несмотря на их низкие концентрации (ΣПАУ=224 нг/дм³), в составе преобладают ВМ ПАУ (более канцерогенные и менее растворимые) над НМ ПАУ. В составе присутствуют: дибенз(аh)антрацен (39 %), 2-метилнафталин (18 %), нафталин (11 %), бенз(а)антрацен (10 %), фенантрен (8 %), флуорантен (6 %) и бенз[а]пирен (4 %). Интерпретация состава затрудняется из-за малочисленных данных как по составу ПАУ в подземных водах, так и по природным источникам его поступления, кроме высокотемпературных процессов.
- Изотопный состав самой воды (δD , $\delta^{18}O$) стабилен и хорошо ложится на линию метеорных вод, и в целом характерен для подземных вод мелпалеогеновых отложений юго-востока Западной Сибири. Изотопный состав водорастворенного углерода ($\delta^{13}C_{DIC}$) сильно меняется: от $-30,3$ до $-10,7\%$. Причины этого пока не раскрыты, но имеются данные с широким разбросом $\delta^{13}C$ и по другим подземным водам региона, где присутствует только биогенный углерод, а его изменения в изотопном составе связаны, видимо, с биогеохимическими процессами в пласте.
- Таким образом, несмотря на малую изученность ПАУ в подземных водах и причин изменений в воде значений $\delta^{13}C_{DIC}$, по-видимому, и те и другие выступают хорошими индикаторами различных биогеохимических процессов в водоносном горизонте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лепокурова О.Е., Зятева О.Ф. Химический состав минеральной воды «Омега» (Томская область) // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 1. – С. 172–177.
- Лепокурова О.Е. Микрокомпонентный состав сильно щелочных вод в скважине Чулымской («Омега», Томская область) // Вестник Томского государственного университета. – 2014. – № 385. – С. 181–185.
- Шварцев С.Л., Лепокурова О.Е. Уникальные щелочные воды в Чулымском бассейне (Западная Сибирь) // Доклады академии наук. – 2014. – Т. 459. – № 3. – С. 357–362. DOI: 10.7868/S0869565214330226.
- Лепокурова О.Е., Шварцев С.Л. Геохимические особенности содовых вод Чулымо-Енисейского артезианского бассейна (Западная Сибирь) // Геология и геофизика. – 2019. – Т. 60. – № 5. – С. 718–731. DOI: 10.15372/GiG2019044.
- Лепокурова О.Е., Наливайко Н.Г., Иванова И.С. Микробиологический состав уникальных щелочных подземных вод в скважине Чулымской («Омега», Томская область) // Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России. – Якутск: Изд-во Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, 2015. – С. 298–302.
- Corrigendum to “Isotopic fractionation accompanying CO₂ hydroxylation and carbonate precipitation from high pH waters at the Cedars, California, USA” / J.N. Christensen, J.M. Watkins, L.S. Devriendt, D.J. de Paolo, M.E. Conrad, M. Voltolini, W. Yang, W. Dong // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2023. – Vol. 343. – P. 416–419. DOI: 10.1016/j.gca.2022.09.022.
- Demir S. Geological genesis of alkaline magnesium-type groundwater within the ophiolitic rocks areas in Southwestern Turkey // *Journal of Earth Science*. – 2023. – Vol. 34 (4). – P. 1231–1248. DOI: 10.1007/s12583-022-1767-1.
- Regional geothermal water hydrogeochemical characterization and geothermometry in the Dabie orogenic belt, east-central China / H. Liu, C. Wang, X. Gao, D. Wu, B. Wu, Ch. Cheng, T. Fang // *Hydrogeology Journal*. – 2025. DOI: 10.1007/s10040-025-02929-9.
- Origins of high pH mineral waters from ultramafic rocks, Central Portugal / J.M. Marques, P.M. Carreira, M.R. Carvalho, M.J. Matias, F.E. Goff, M.J. Basto, R.C. Graça, L. Aires-Barros, L. Rocha // *Applied Geochemistry*. – 2008. – Vol. 23 (12). – P. 3278–3289. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2008.06.029.
- Conceptual modelling on water-rock reaction and genesis of high pH fluids in a typical granitoid geothermal reservoir: a case from Indus-Tsangpo Suture Zone, India / P. Mishra, A. Dutta, V.P. Malviya, A.P. Thapliyal, P. Saini, S. Banerjee, V.V. Sakhare // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2024. – Vol. 136. – 103736. DOI: 10.1016/j.pce.2024.103736.
- Raposo D.B., Pereira S.Y. Hydrochemistry and isotopic studies of carbonatite groundwater systems: the alkaline-carbonatite complex of Barreiro, southeastern Brazil // *Environmental Earth Sciences*. – 2019. – Vol. 78. – 233. DOI: 10.1007/s12665-019-8228-x.
- Hyperalkaline waters and travertines of the ophiolite complex of Mt. Soldatskaya, Kamchatsky Mys Peninsula, Kamchatka, Russia // Y. Taran, E. Kalacheva, D. Savelyev, B. Pokrovskii, M. Bujakaite // *Geochemical Journal*. – 2024. – Vol. 58. – P. 127–137. DOI: 10.2343/geochemj.GJ24011.
- Thermal waters in the central part of Baikal Rift Zone: hydrogeochemistry and geothermometry (Republic of Buryatia, Russia) / E.V. Zippa, A.V. Ukraintsev, M.K. Chernyavskii, I.A. Fedorov, V.A. Poturay, E.V. Domrocheva, N.A. Mukhortina // *Geothermics*. – 2025. – Vol. 130. – 103317. DOI: 10.1016/j.geothermics.2025.103317.
- Лепокурова О.Е., Домрочева Е.В. Гуминовые вещества в природных водах Нарыкско-Осташкинской площади (Кузбасс) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 3. – С. 197–206. DOI 10.18799/24131830/2020/3/2562.
- Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Изд-во ЦентрЛитНефтеГаз, 2012. – 672 с.
- Потурай В.А. Состав углеводородов в углекислых минеральных водах // Проблемы недропользования. – 2025. – № 1 (44). – С. 89–98. DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.089.
- Chapelle F.H. Dissolved organic carbon in groundwater systems. The groundwater project. – Ontario, Canada: Guelph, 2022. – 58 p. DOI: 10.21083/978-1-77470-016-7.

18. A new conceptual framework for the transformation of groundwater dissolved organic matter / L.K. McDonough, M.S. Andersen, M.I. Behnke, H. Rutledge, Ph. Oudone, K. Meredith, D.M. O'Carroll, I.R. Santos, C.E. Marjo, R.G.M. Spencer, A.M. McKenna, A. Baker // *Nature Communications*. – 2022. – Vol. 13. – P. 2153. DOI: 10.1038/s41467-022-29711-9.
19. Regan S., Hynds P., Flynn R. An overview of dissolved organic carbon in groundwater and implications for drinking water safety // *Hydrogeology Journal*. – 2017. – Vol. 25. – P. 959–967. DOI: 10.1007/s10040-017-1583-3.
20. Ecological assessment of groundwater ecosystems disturbed by recharge systems using organic matter quality, biofilm characteristics, and bacterial diversity / J. Voisin, B. Cournoyer, L. Marjolet, A. Vienney, F. Mermillod-Blondin // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2020. – Vol. 27. – P. 3295–3308. DOI: 10.1007/s11356-019-06971-5.
21. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения 14.08.2025).
22. ГОСТ Р 70152-2022. Качество воды. Методы внутреннего лабораторного контроля качества проведения микробиологических и паразитологических исследований. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200184836> (дата обращения 14.08.2025).
23. ГОСТ Р 54316-2020. Воды минеральные природные питьевые. Общие технические условия. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564463542> (дата обращения 14.08.2025).
24. Геохимия болотных вод нижней части бассейна Томи (юг Томской области) / С.Л. Шварцев, О.В. Серебренникова, М.А. Здвижков, О.Г. Савичев, О.С. Наймушина // *Геохимия*. – 2012. – Т. 50. – № 4. – С. 367–380. DOI: 10.1134/S0016702912040076.
25. Органические микропримеси в пресных природных водах бассейнов Томи и Верхней Оби / А.Э. Конторович, С.Л. Шварцев, В.А. Зуев, Н.М. Рассказов, Ю.П. Туров // *Геохимия*. – 2000. – № 5. – С. 533–544.
26. Растворенные формы миграции гумусовых кислот на поверхностных водных объектах Ямало-Ненецкого автономного округа / О.Е. Лепокурова, И.С. Иванова, Н.С. Трифонов, Ю.В. Колубаева, Д.А. Соколов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 56–69. DOI: 10.18799/24131830/2022/5/3564.
27. Концентрации и источники полициклических ароматических углеводородов в воде и донных отложениях рек северных нефтегазодобывающих территорий Западной Сибири / Н.А. Волкова, И.С. Иванова, Д.А. Соколов, Ю.В. Колубаева, Д.А. Чуйкина // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 4. – С. 135–148. DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3924.
28. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metal contamination in Shitalakshya River water: ecological and health risk implications / G.M.M.A. Hasan, F. Rinky, K.S. Ahmed, K. Sikdar, M. Moniruzzaman // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2025. – Vol. 197. – P. 282. DOI: 10.1007/s10661-025-13750-y.
29. Makobe S., Seopela M.P., Ambushe A.A. Seasonal variations, source apportionment, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Klip River, Johannesburg, South Africa // *Environmental Monitoring and Assessment*. – 2025. – Vol. 197. – P. 257. DOI: 10.1007/s10661-025-13724-0.
30. Ramzi A., Habeeb Rahman K., Muraleedharan K.K. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the aquatic environment: a rudimentary approach // *Contaminated Land and Water. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies* / Eds. H. Alshemmari, M.Z. Hashmi, Y.N. Kavil, W. Shu-hong. – Cham: Springer, 2024. – P. 131–144. DOI: 10.1007/978-3-031-65129-8_10.
31. Xu D., Liang H., Gao P. Migration patterns and health risk assessment of polycyclic aromatic compounds in typical coal fire source // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2024. – Vol. 31. – P. 30750–30758. DOI: 10.1007/s11356-024-32980-0.
32. Хаустов А.П., Редина М.М. Полициклические ароматические углеводороды как маркер процессов в подземной гидросфере // *Фундаментальные и прикладные проблемы гидрогеологии: Материалы Всероссийского совещания по подземным водам Востока России*. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2021. – С. 439–443.
33. Manoli E., Samara C. Polycyclic aromatic hydrocarbons in natural waters: sources, occurrence and analysis // *Trends in Analytical Chemistry*. – 1999. – Vol. 18 (6). – P. 417–428. DOI: 10.1016/S0165-9936(99)00111-9.
34. Ровинский Ф.Я., Теплицкая Т.А., Алексеева Т.А. Фоновый мониторинг полициклоароматических углеводородов. – Л.: Гидрометеоздат, 1988. – 233 с.
35. Компаниченко В.Н., Потурай В.А. Органическое вещество в гидротермах Паужетского района: состав и сравнительный анализ с другими объектами // *Геохимия*. – 2024. – Т. 69. – № 8. – С. 681–692. DOI: 10.31857/S0016752524080036.
36. Mehetre G.T., Dastager S.G., Dharne M.S. Biodegradation of mixed polycyclic aromatic hydrocarbons by pure and mixed cultures of biosurfactant producing thermophilic and thermo-tolerant bacteria // *Science of The Total Environment*. – 2020. – Vol. 679. – P. 52–60. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.376.
37. Polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, toxicity, and remediation approaches / A.B. Patel, S. Shaikh, K.R. Jain, C. Desai, D. Madamwar // *Frontiers in Microbiology*. – 2020. – Vol. 11. – P. 562813. DOI: 10.3389/fmicb.2020.562813.
38. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // *Science*. – 1961. – Vol. 133. – P. 1702–1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.170.
39. Изотопные исследования подземных вод на полигоне «Томский» / В.А. Поляков, В.Т. Дубинчук, Е.В. Голубкова, В.А. Лыготин, Ю.В. Макушин, К.М. Макарова // *Разведка и охрана недр*. – 2008. – Т. 11. – С. 47–52.
40. Распределение стабильных изотопов Н, О и С в природных водах района Газовского нефтегазоконденсатного месторождения (Ямало-Ненецкий автономный округ) / О.Е. Лепокурова, И.С. Иванова, А.Н. Пыряев, О.А. Исмагулов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 2. – С. 157–169. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4466.
41. Li Yu., Wang M., Zhang D. An improved method for isotopic and quantitative analysis of dissolved organic carbon in natural water samples // *Water Science & Technology*. – 2024. – Vol. 89 (8). – P. 2060–2072. DOI: 10.2166/wst.2024.114.
42. Stable carbon isotope analysis of dissolved inorganic carbon (DIC) and dissolved organic carbon (DOC) in natural waters-- results from a worldwide proficiency test / R. van Geldern, M.P. Verma, M.C. Carvalho, F. Grassa, A. Delgado-Huertas, G. Monvoisin, J.A. Barth // *Rapid Communications in Mass Spectrometry*. – 2013. – Vol. 27(18). – P. 2099–107. DOI: 10.1002/rcm.6665.

Информация об авторах

Олеся Евгеньевна Лепкурова, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30; LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0252-197X>

Наталья Андреевна Мухортина, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории физико-химических исследований кернов и пластовых флюидов Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4; volkovana@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Поступила в редакцию: 28.08.2025

Поступила после рецензирования: 09.10.2025

Принята к публикации: 01.11.2025

REFERENCES

1. Lepokurova O.E., Zyateva O.F. Chemical composition of mineral water "Omega" (Tomsk region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2011, vol. 319, no. 1, pp. 172–177. (In Russ.)
2. Lepokurova O.E. Trace elements in highly alkaline water in the Chulymkaya well ("Omega", Tomsk region). *Tomsk State University Journal*, 2014, no. 385, pp. 181–185. (In Russ.)
3. Shvartsev S.L., Lepokurova O.E. The unique alkaline waters in the Chulym Basin (West Siberia). *Doklady Earth Sciences*, 2014, vol. 459, no. 1, pp. 1464–1469. DOI: 10.1134/S1028334X14110269.
4. Lepokurova O.E., Shvartsev S.L. Geochemistry of soda waters of the Chulym–Yenisei Artesian Basin (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics*, 2019, vol. 60, no. 5, pp. 558–569. DOI: 10.15372/RGG2019044.
5. Lepokurova O.E., Nalivaiko N.G., Ivanova I.S. Microbiological composition of unique alkaline groundwater in the Chulymkaya well (Omega, Tomsk region). *Fundamental and applied problems of hydrogeology. Proc. of the All-Russian conference on groundwater in the East of Russia*. Yakutsk, Melnikov Permafrost Institute SB RAS Publ., 2015. pp. 298–302. (In Russ.)
6. Christensen J.N., Watkins J.M., Devriendt L.S., DePaolo D.J., Conrad M.E., Voltolini M., Yang W., Dong W. Corrigendum to "Isotopic fractionation accompanying CO₂ hydroxylation and carbonate precipitation from high pH waters at the Cedars, California, USA". *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2023, vol. 343, pp. 416–419. DOI: 10.1016/j.gca.2022.09.022.
7. Demer S. Geological genesis of alkaline magnesium-type groundwater within the ophiolitic rocks areas in Southwestern Turkey. *Journal of Earth Science*, 2023, vol. 34 (4), pp. 1231–1248. DOI: 10.1007/s12583-022-1767-1.
8. Liu H., Wang C., Gao X., Wu D., Wu B., Cheng Ch., Fang T. Regional geothermal water hydrogeochemical characterization and geothermometry in the Dabie orogenic belt, east-central China. *Hydrogeology Journal*, 2025. DOI: 10.1007/s10040-025-02929-9.
9. Marques J.M., Carreira P.M., Rosário Carvalho M., Matias M.J., Goff F.E., Basto M.J., Graça R.C., Aires-Barros L., Rocha L. Origins of high pH mineral waters from ultramafic rocks, Central Portugal. *Applied Geochemistry*, 2008, vol. 23 (12), pp. 3278–3289. DOI: 10.1016/j.apgeochem.2008.06.029.
10. Mishra P., Dutta A., Malviya V.P., Thapliyal A.P., Saini P., Banerjee S., Sakhare V.V. Conceptual modelling on water-rock reaction and genesis of high pH fluids in a typical granitoid geothermal reservoir: a case from Indus-Tsangpo Suture Zone, India. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2024, vol. 136, 103736. DOI: 10.1016/j.pce.2024.103736.
11. Raposo D.B., Pereira S.Y. Hydrochemistry and isotopic studies of carbonatite groundwater systems: the alkaline–carbonatite complex of Barreiro, southeastern Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 2019, vol. 78, 233. DOI: 10.1007/s12665-019-8228-x.
12. Taran Y., Kalacheva E., Savelyev D., Pokrovskii B., Bujakaite M. Hyperalkaline waters and travertines of the ophiolite complex of Mt. Soldatskaya, Kamchatsky Mys Peninsula, Kamchatka, Russia. *Geochemical Journal*, 2024, vol. 58, pp. 127–137. DOI: 10.2343/geochemj.GJ24011.
13. Zippa E.V., Ukraintsev A.V., Chernyavskii M.K., Fedorov I.A., Poturay V.A., Domrocheva E.V., Mukhortina N.A. Thermal waters in the central part of Baikal Rift Zone: hydrogeochemistry and geothermometry (Republic of Buryatia, Russia). *Geothermics*, 2025, vol. 130, 103317. DOI: 10.1016/j.geothermics.2025.103317.
14. Lepokurova O.E., Domrocheva E.V. Humic substances in natural water of the Naryksko-Ostashkinskaya area (Kuzbass). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 3, pp. 197–206. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2020/3/2562.
15. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geochemistry of groundwater. Theoretical, applied and environmental aspects*. Moscow, TsentrLitNefteGaz Publ., 2012. 672 p. (In Russ.)
16. Poturay V.A. Composition of hydrocarbons in carbonaceous mineral waters. *Problems of Subsoil Use*, 2025, vol. 1 (44), pp. 89–98. (In Russ.) DOI: 10.25635/2313-1586.2025.01.089.
17. Chapelle F.H. *Dissolved organic carbon in groundwater systems. The groundwater project*. Ontario, Canada, Guelph, 2022. 58 p. DOI: 10.21083/978-1-77470-016-7.
18. McDonough L.K., Andersen M.S., Behnke M.I., Rutledge H., Oudone Ph., Meredith K., O'Carroll D.M., Santos I.R., Marjo C.E., Spencer R.G.M., McKenna A.M., Baker A. A new conceptual framework for the transformation of groundwater dissolved organic matter. *Nature Communications*, 2022, vol. 13, 2153. DOI: 10.1038/s41467-022-29711-9.
19. Regan S., Hynds P., Flynn R. An overview of dissolved organic carbon in groundwater and implications for drinking water safety. *Hydrogeology Journal*, 2017, vol. 25, pp. 959–967. DOI: 10.1007/s10040-017-1583-3.
20. Voisin J., Cournoyer B., Marjolet L., Vienney A., Mermillod-Blondin F. Ecological assessment of groundwater ecosystems disturbed by recharge systems using organic matter quality, biofilm characteristics, and bacterial diversity. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, vol. 27, pp. 3295–3308. DOI: 10.1007/s11356-019-06971-5.

21. SanPiN 1.2.3685-21. *Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans*. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (accessed 14 August 2023).
22. SS R 70152-2022. *Water quality. Methods of internal laboratory quality control of microbiological and parasitological studies*. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200184836> (accessed 14 August 2023).
23. SS R 54316-2020. *Natural drinking mineral waters. General specifications*. (In Russ.) Available at: <https://docs.cntd.ru/document/564463542> (accessed 14 August 2023).
24. Shvartsev S.L., Serebrennikova O.V., Zdvizhkov M.A., Savichev O.G., Naimushina O.S. Geochemistry of wetland waters from the lower Tom basin, Southern Tomsk oblast. *Geochemistry International*, 2012, vol. 50, pp. 367–380. (In Russ.) DOI: 10.1134/S0016702912040076.
25. Kontorovich A.E., Shvartsev S.L., Rasskazov N.M., Zuev V.A., Turov Yu.P. Organic trace contaminants in fresh natural waters from the drainage basins of Tom' and upper Ob' rivers. *Geochemistry International*, 2000, vol. 38, nn. 5, pp. 480–490.
26. Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Trifonov N.S., Kolubaeva Y.V., Sokolov D.A. Dissolved forms of migration of humic substances in surface water bodies of the Yamal-Nenets autonomous district. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 56–69. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/5/3564.
27. Volkova N.A., Ivanova I.S., Sokolov D.A., Kolubaeva Yu.V., Chuikina D.I. Concentrations and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediments of rivers of northern oil and gas producing territories of Western Siberia. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no. 4, pp. 135–148. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2023/4/3924.
28. Hasan G.M.M.A., Rinky F., Ahmed K.S., Sikdar K., Moniruzzaman M. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heavy metal contamination in Shitalakshya River water: ecological and health risk implications. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, vol. 197, 282. DOI: 10.1007/s10661-025-13750-y.
29. Makobe S., Seopela M.P., Ambushe A.A. Seasonal variations, source apportionment, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Klip River, Johannesburg, South Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2025, vol. 197, 257. DOI: 10.1007/s10661-025-13724-0.
30. Ramzi A., Habeeb Rahman K., Muraleedharan K.K. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the aquatic environment: a rudimentary approach. *Contaminated Land and Water. Emerging Contaminants and Associated Treatment Technologies*. Eds. H. Alshemmari, M.Z. Hashmi, Y.N. Kavil, W. Shuhong. Cham, Springer, 2024. pp. 131–144. DOI: 10.1007/978-3-031-65129-8_10.
31. Xu D., Liang H., Gao P. Migration patterns and health risk assessment of polycyclic aromatic compounds in typical coal fire source. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, vol. 31, pp. 30750–30758. DOI: 10.1007/s11356-024-32980-0.
32. Khaustov A.P., Redina M.M. Polycyclic aromatic hydrocarbons as a marker of processes in the underground hydrosphere. *Fundamental and applied problems of hydrogeology: Proceedings of the All-Russian conference on groundwater in the East of Russia*. Irkutsk, IEC SB RAS Publ., 2021. pp. 439–443.
33. Manoli E., Samara C. Polycyclic aromatic hydrocarbons in natural waters: sources, occurrence and analysis. *Trends in Analytical Chemistry*, 1999, vol. 18 (6), pp. 417–428. DOI: 10.1016/S0165-9936(99)00111-9.
34. Rovinsky F.Ya., Teplitskaya T.A., Alekseeva T.A. *Background monitoring of polycyclic aromatic hydrocarbons*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1988. 224 p. (In Russ.)
35. Kompanichenko V.N., Poturay V.A. Organic matter in hydrotherms of the Pauzhetka field: composition and comparative analysis with other sites. *Geochemistry International*, 2024, vol. 62, no. 8, pp. 832–843. DOI: 10.1134/S0016702924700423.
36. Mehetre G.T., Dastager S.G., Dharne M.S. Biodegradation of mixed polycyclic aromatic hydrocarbons by pure and mixed cultures of biosurfactant producing thermophilic and thermo-tolerant bacteria. *Science of The Total Environment*, 2020, vol. 679, pp. 52–60. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.376.
37. Patel A.B., Shaikh S., Jain K.R., Desai C., Madamwar D. Polycyclic aromatic hydrocarbons: sources, toxicity, and remediation approaches. *Frontiers in Microbiology*, 2020, vol. 11, 562813. DOI: 10.3389/fmicb.2020.562813.
38. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703. DOI: 10.1126/science.133.3465.170.
39. Polyakov V.A., Dubinchuk V.T., Golubkova E.V., Lgotin V.A., Makushin Yu.V., Makarova K.M. Isotope studies of groundwater at the Tomsky test site. *Exploration and protection of mineral resources*, 2008, vol. 11, pp. 47–52. (In Russ.)
40. Lepokurova O.E., Ivanova I.S., Pyrayev A.N., Ismagulov O.A. Distribution of stable H, O and C isotopes in natural waters in the area of the Taz oil and gas condensate field (Yamalo-Nenets autonomous region). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 157–169. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4466.
41. Li Yu., Wang M., Zhang D. An improved method for isotopic and quantitative analysis of dissolved organic carbon in natural water samples. *Water Science & Technology*, 2024, vol. 89 (8), pp. 2060–2072. DOI: 10.2166/wst.2024.114.
42. Van Geldern R., Verma M.P., Carvalho M.C., Grassa F., Delgado-Huertas A., Monvoisin G., Barth J.A. Stable carbon isotope analysis of dissolved inorganic carbon (DIC) and dissolved organic carbon (DOC) in natural waters – results from a worldwide proficiency test. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 2013, vol. 27 (18), pp. 2099–107. DOI: 10.1002/rcm.6665.

Information about the authors

Olesya E. Lepokurova, Dr. Sc., Leading Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, 4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation; LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0252-197X>

Natalia A. Mukhortina, Cand. Sc., Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy Sciences, Tomsk Branch, 4, Akademicheskoy avenue, Tomsk, 634055, Russian Federation; volkovana@ipgg.sbras.ru; <https://orcid.org/0000-0003-2625-8985>

Received: 28.08.2025

Revised: 09.10.2025

Accepted: 01.11.2025