

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.16>

УДК 556.3:551.762.3(571.122)

Эволюция состава стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода в водах нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири

Д.А. Новиков^{1,3*}, А.Н. Пыряев^{2,3}, А.А. Максимова^{1,3}, Ф.Ф. Дульцев¹, А.В. Черных¹

¹Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия

²Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

³Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

В работе представлены результаты исследования изотопного состава кислорода и водорода вод и углерода водорастворенной углекислоты для нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири, охватывающих широкий стратиграфический диапазон – мезозой (от сеномана до байоса) и частично палеозой. Полученные значения δD и $\delta^{18}O$ – очень разнообразны, охватывают интервалы от -120% до -50% и от -17% до -2% соответственно. Такой разнообразный изотопный состав вод указывает на отсутствие унифицированного механизма накопления вод и их преобразование в ходе геологической эволюции Западно-Сибирского осадочного бассейна. Главной чертой большинства изученных вод является выраженные значения изотопных кислородных сдвигов относительно GMWL (Global meteoric water line), в целом нарастающие с увеличением возраста водовмещающих отложений и достигающие 9% , что указывает на их древнее седиментационное происхождение.

Диапазоны вариации изотопного состава углерода растворенной в воде углекислоты (от $-51,8\%$ до $+21,8\%$) и его содержания в водах (от $0,2$ до $38,6$ ммоль/дм³) указывают на широкий спектр условий и процессов, участвующих в преобразовании водорастворенной углекислоты. Тем не менее, установлена общая закономерность изменения изотопного состава углерода CO_2 во времени. На основании полученных данных предложена модель преобразования изотопного состава углерода углекислоты в виде замкнутого цикла «атмосфера – почвы – глубокие водоносные горизонты», основанная на данных по изотопному составу водорастворенной углекислоты в водах нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири.

Ключевые слова: гидрогеохимия, стабильные изотопы, кислород, водород, углерод, северные районы Западной Сибири

Для цитирования: Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. (2023). Эволюция состава стабильных изотопов водорода, кислорода и углерода в водах нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири. *Георесурсы*, 25(4), с. 219–232. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.16>

Введение

Теоретические и экспериментальные исследования распределения стабильных изотопов (H, O и C) в подземных водах являются основой при изучении различных генетических и геохимических типов природных вод. Их современный химизм является продуктом длительной геологической эволюции захороненных вод (в т.ч. сингенетических). Состав природных вод начинает формироваться в обстановках осадконакопления. Затем на стадиях диа- и катагенеза захваченные породой воды претерпевают значительные изменения, вовлекаясь во множество процессов, таких как элизионный водообмен, вертикальная и латеральная миграция и взаимодействие в системе «вода – порода – газ – органическое вещество (ОВ)». В этой связи наряду с составом растворенных веществ для правильной идентификации генетического облика подземных вод необходимо всесторонне изучать их изотопный состав. Окончательное отнесение водного

раствора к тому или иному генетическому типу возможно только после изучения изотопного состава вод, отвечающего процессам формирования их влаги, фракционирования и обмена изотопами с окружающими породами (Novikov, 2018). Немаловажным параметром, позволяющим получить дополнительные данные о взаимодействии вод с окружающей средой является изотопный состав растворенного неорганического углерода. По этой характеристике можно оценить взаимодействие вод с органическими соединениями и газами глубоких горизонтов, особенностям формирования которых был посвящен цикл работ А.Э. Конторовича, В.С. Вышемирского, Л.И. Богородской, С.И. Гольшьева (Конторович и др., 1985а; Конторович и др., 1985б; Вышемирский, Конторович, 1997; Вышемирский, Конторович, 1998).

Огромный фактический материал по составу флюидов Западно-Сибирского артезианского бассейна, накопленный с 50-х годов прошлого века, значительно расширил наши представления о составе подземной гидросферы. Вместе с тем вопросы генезиса подземных вод нефтегазоносных отложений Западной Сибири широко дискутируются в научном сообществе с 60-х годов (Ставицкий и др., 2004; Шварцев, Новиков, 2004; Курчиков, Плавник, 2009; Новиков и др., 2021а; Novikov, 2017 и др.).

* Ответственный автор: Дмитрий Анатольевич Новиков
e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

© 2023 Коллектив авторов

Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Среди немногих работ по изотопному составу подземных вод различных регионов Западно-Сибирского артезианского бассейна следует отметить труды В.Е. Ветштейна, А.Д. Назарова, С.И. Гольшева, В.Г. Иванова, Л.Н. Крицук, В.А. Полякова и др. (Ветштейн и др., 1981; Гольшев, Иванов, 1983; Крицук, Поляков, 2005; Лепокурова, 2012; Назаров, 2004; Поляков и др., 2008).

Изотопные методы исследований, начиная с пионерных работ Хармона Крейга (Craig, 1961) и Вилли Дансгаарда (Dansgaard, 1964), широко применяются при гидрогеохимических исследованиях во всем мире. За многие годы изучения накоплен обширный материал по изотопному составу подземных вод Западно-Канадского нефтегазозносного бассейна (Hitchon, Friedman, 1969; Hitchon et al., 1971; Connolly et al., 1990), бассейна Уиллистон (Roston, Holmden, 2000), бассейнов Мичигана и Аппалачей (McNutt et al., 1987; Das et al., 1990; Wilson, Long, 1993), бассейна Иллинойс (Stueber, Walter, 1991; Stueber et al., 1993; Strapoc et al., 2008; Schlegel et al., 2011 a; Schlegel et al., 2011 b; Labotka et al., 2015), нефтегазозносных бассейнов Китая (Cai et al., 2001; Nan et al., 2011; Jiang et al., 2015; Zhu et al., 2015 и др.).

Отдельное внимание следует уделить исследованиям, посвященным изучению изотопного состава сидекацитов различной генетической природы (Конторович и др., 1985а; Конторович и др., 1985б), выступающих первичным материалом для формирования изотопного состава водорастворенного углерода. Соответственно, приведенные в них данные являются предпосылкой для выявления причин установления определенных значений $\delta^{13}\text{C}$ в водах, проанализированных в настоящем исследовании.

Ранее выполненные исследовательские работы в большинстве случаев касались изотопного состава локальных районов Западной Сибири, отдельных месторождений и водоносных горизонтов, находящихся, в основном, выше регионального турон-олигоценного водоупора и не имеющих перспектив для открытия залежей нефти и газа. В настоящем исследовании на примере уникальной выборки (225 проб) подземных вод из нефтегазозносных горизонтов широкого стратиграфического диапазона северных районов Западно-Сибирского осадочного бассейна сделана первая попытка анализа глобальных эффектов первичных и вторичных преобразований состава стабильных изотопов самих вод и растворенного неорганического углерода (Dissolved inorganic carbon – DIC).

Материалы и методы

Отбор 225 проб проводился в несколько этапов (2018–2022 гг.) непосредственно на месторождениях из водоносных горизонтов от верхнего мела до верхнего палеозоя (рис. 1). Процедура отбора и хранения проб детально описана в работе (Пырьев и др., 2022). Отбор проб производился из разведочных скважин, где сохранились «реликтовые» пластовые воды, без участия агента заводнения и других технологических жидкостей.

Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также DIC проводилось в Аналитическом центре МИИ Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН на масс-спектрометре изотопных отношений Finnigan™ MAT 253. Изотопный состав кислорода вод и углерода DIC определялись по известным

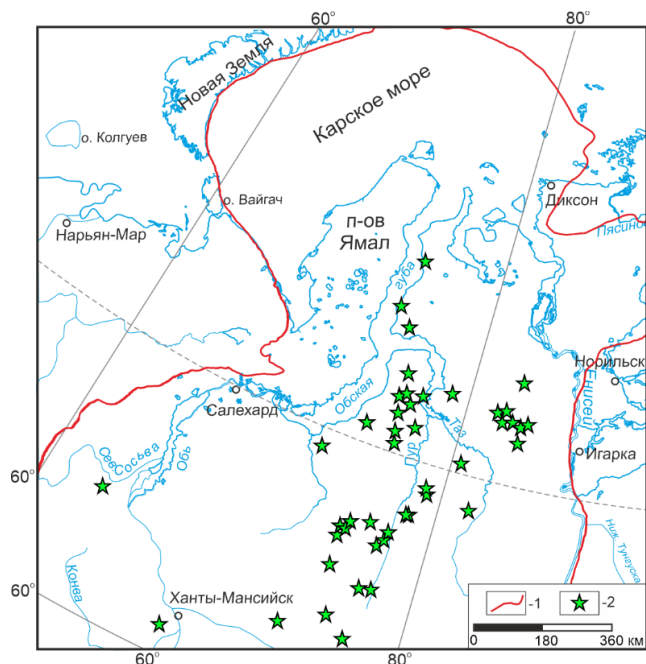


Рис. 1. Местоположение изученных месторождений в северных районах Западной Сибири. 1 – граница Западно-Сибирской нефтегазозносной провинции; 2 – изученные месторождения нефти и газа.

методикам (Epstein, Mayeda, 1953; Evans et al., 2016; Górká et al., 2011; Nelson, 2000) с применением приставки пробоподготовки GasBench II. Определения изотопного состава водорода вод проводили с помощью приставки пробоподготовки H/Device по методике, описанной в (Корес et al., 2019). Все измерения проводили относительно материалов сравнения МАГАТЭ: NBS-18 и NBS-19 при измерениях $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$; VSMOW2, SLAP2 и GISP при измерениях δD и $\delta^{18}\text{O}$ (<https://nucleus.iaea.org>). Погрешность измерений не превышала 0,2‰ при анализе изотопного состава углерода и кислорода и 2‰ – водорода. Полученные значения изотопного состава углерода приведены относительно мирового стандарта VPBD, кислорода и водорода – относительно VSMOW.

Значения кислородных сдвигов (КС) в индивидуальных пробах рассчитывали относительно глобальной линии метеорных вод (GMWL – Global meteoric water line (Craig, 1961)): $\text{КС} = \delta^{18}\text{O} - (\delta\text{D} - 10)/8$. Величины дейтериевых эксцессов d (Dansgaard, 1964) рассчитывали по формуле: $d = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$.

Результаты

К настоящему времени в нефтегазозносных отложениях северных районов Западно-Сибирского артезианского бассейна установлены, в основном, нейтральные и слабощелочные воды (рН 6,1–8,6) с восстановительной геохимической средой (Eh от –360 до –150) и величиной общей минерализации, варьирующей в широком диапазоне значений от 2 до 63,3 г/дм³ преимущественно ClNa, Cl–HCO₃Na и HCO₃–ClNa состава (по классификации С.А. Щукарева) (рис. 2). Наиболее минерализованные седиментогенные воды характерны для верхнеюрского водоносного комплекса (оксфордского регионального резервуара). Их минерализация в отдельных скважинах Известинского, Комсомольского и Губкинского месторождений достигает

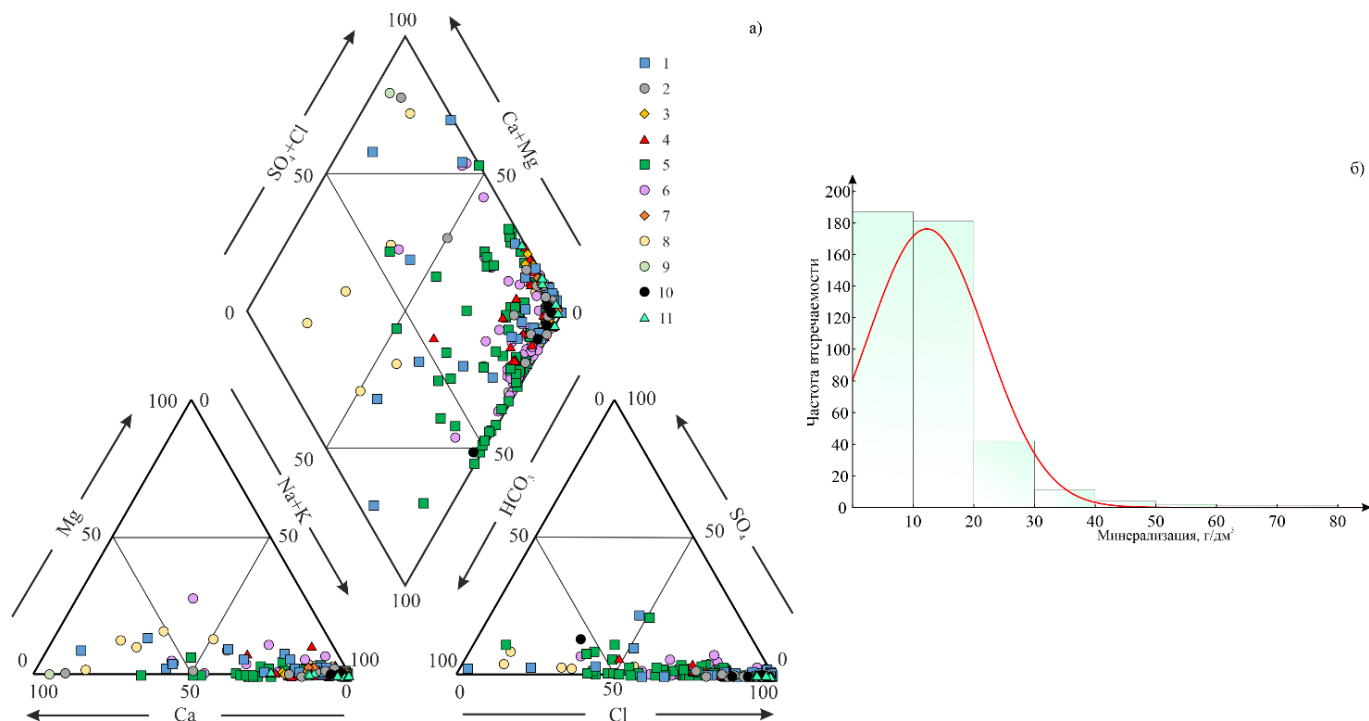


Рис. 2. Диаграмма Пайпера химического состава подземных вод нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири (а) и их распределение по величине общей минерализации (б). Возраст водовмещающих отложений: 1 – сеноман; 2 – альб; 3 – апт; 4 – готерив; 5 – валанжсин; 6 – валанжсин – берриас; 7 – оксфорд; 8 – келовеи; 9 – бат; 10 – байос – аален; 11 – доюрский

63,3 г/дм³ (Шварцев, Новиков, 2004; Новиков и др., 2019а; Novikov, 2020). В ниже-среднеюрском водоносном комплексе наиболее минерализованные воды до 55 г/дм³ установлены в среднеюрских горизонтах Малыгинского месторождения на севере полуострова Ямал и на ряде площадей Надым-Тазовского междуречья.

В вышезалегающих апт-альб-сеноманском и неоккомском водоносных комплексах воды имеют преимущественно ClNa, Cl–HCO₃Na и HCO₃–ClNa состав, а на ряде поисковых площадей ClNa с повышенной долей кальция (до 12–15 %-экв.) с величиной общей минерализации 1,5–25,3 г/дм³ в первом случае и 2,0–53,0 во втором. Доюрские водоносные комплексы (триас и палеозой) к настоящему времени изучены с помощью бурения весьма слабо, но, по имеющимся данным, в их пределах доминируют воды ClNa и Cl–HCO₃Na состава с общей минерализацией 2,5–46,8 г/дм³ (Новиков и др., 2020а).

Для северных районов Западной Сибири характерен инверсионный тип вертикальной гидрогеохимической зональности, на фоне которой выделяется пик наиболее соленых седиментогенных вод верхнеюрских отложений. Природа этого явления объясняется нами рядом факторов: 1) особенностями геологического строения, 2) палеогидрогеологической историей изучаемого региона, 3) процессами элизионного водообмена, следствием которых является широкое развитие аномально-высоких пластовых давлений (АВПД) (Новиков, 2019), 4) сопряженными процессами нефтегазообразования и связанными с ними конденсатогенными водами (Novikov, 2017; Novikov, 2022) и 5) катагенетическими изменениями химического состава подземных вод за счет взаимодействия в системе «вода – порода – газ – органическое вещество» (Шварцев, 1991; Шварцев, 1992; Шварцев, 2008; Новиков и др., 2019а; Novikov, 2020).

Величина общей минерализации юрско-меловых водоносных комплексов закономерно снижается в направлении от центральных районов к периферии бассейна до 2–5 г/дм³, где расположены современные области питания и развиты инфильтрационные воды. В этом же направлении происходит закономерная смена химического состава подземных вод с ClNa на HCO₃–ClNa (Кругликов, 1964; Novikov, Sukhorukova, 2015). В верхней части гидрогеологического разреза, в пределах криогенной толщи, на полуострове Ямал широким распространением пользуются криопэги с величиной общей минерализации до 150 г/дм³ ClNa–Mg состава (Мельников, Спесивцев, 1995; Стрелецкая, Лейбман, 2002; Криосфера..., 2013).

В целом, подземные воды нефтегазоносных отложений отличаются бессульфатностью, значительным содержанием растворенных ОВ и газов углеводородного состава. Предельные содержания микрокомпонентов (мг/дм³) достигают у: стронция до 1320, брома до 232, бора до 200, аммония до 150, йода до 136, кремния до 61, фтора до 12. Происхождение подземных вод хорошо просматривается по величинам генетических коэффициентов. Наиболее сильно различаются седиментогенные и конденсатогенные воды. Так, отношение r_{Na}/r_{Cl} у первых составляет 0,78–1,04 при среднем значении 0,92, а у вторых – 0,19–1,90 при среднем 0,66. Средние величины Cl/Br коэффициента равны 277 и 385, Ca/Cl – 0,05 и 0,5, (Br/Cl)·10³ – 3,81 и 2,94. Наиболее сильно эти генетические типы вод отличаются по среднему отношению Br/Cl – 0,16 и 2,82, соответственно.

Газонасыщенность подземных вод в пределах нижнего гидрогеологического этажа ведет себя неодинаково и может меняться в пределах одного пласта в два и более раз. Вероятно, такие различия могут быть обусловлены межпластовыми перетоками, особенно характерными

для углеводородных газов (Вышемирский, Конторович, 1998). При этом сохраняется общая тенденция увеличения газонасыщенности с глубиной от 0,3–3,0 л/л в апт-альб-сеноманском до 0,9–5,7 в ниже-среднеюрском комплексе (Кругликов и др., 1985; Novikov, 2022). В юрско-меловых водоносных горизонтах повсеместно развиты метановые воды с содержанием метана в среднем от 95,5 об. % в апт-альб-сеноманском комплексе до 83,3 об. % в ниже-среднеюрском. Происходит снижение его концентраций по мере погружения водоносных горизонтов (ВГ). С глубиной происходит рост содержаний гомологов метана от 1,3 об. % в апт-альб-сеноманском до 11,7 об. % в ниже-среднеюрском комплексе. Отмечаются также рост содержаний углекислого газа и одновременное понижение отношения суммы тяжелых углеводородов к азоту от 96 в апт-альб-сеноманском комплексе до 52 в ниже-среднеюрском. Содержание азота не превышает 15 об. %, углекислого газа – 4 об. %, водорода – 6 об. %, гелия – 0,14 об.% и аргона – 0,19 об. % соответственно (Новиков, 2020).

Ввиду большого объема выполненных изотопных исследований данные по отдельным пробам приведены только на рисунках, при этом в табл. 1 сведены результаты, объединяющие значения по всем изученным водоносным горизонтам. Изученные воды имеют широкий диапазон вариации изотопного состава кислорода и водорода. Относительная концентрация дейтерия в них варьирует от –123‰ до –54‰, изменяясь почти на 70‰ для индивидуальных проб. Изотопный состав кислорода при этом изменяется от –16,6‰ до –2,5‰, т.е. разница в изотопном составе самых тяжелых и самых легких вод достигает 14‰.

Для наглядности данные по изотопному составу кислорода и водорода в отдельных пробах представлены в виде точек на рис. 3. Там же представлена GMWL (Global meteoric water line) (Craig, 1961). Из рисунка видно, что большинство точек изотопного состава вод располагается

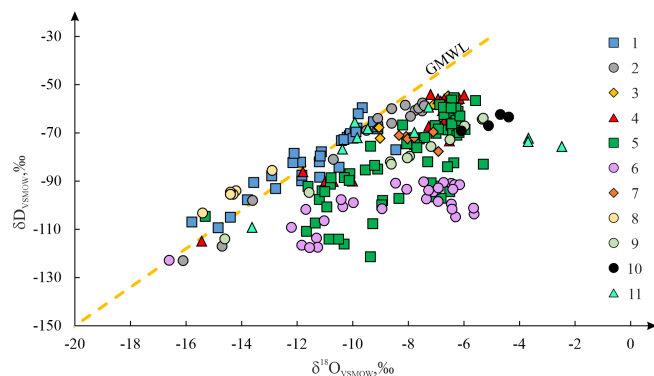


Рис. 3. Изотопный состав кислорода и водорода подземных вод нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири. Глобальная линия метеорных вод – GMWL: $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ (Craig, 1961). Возраст водовмещающих отложений: мезозойские: 1 – сеноман; 2 – альб; 3 – апт; 4 – готерив; 5 – валанжин; 6 – валанжин – берриас; 7 – оксфорд; 8 – келовеи; 9 – бат; 10 – байос – аален; 11 – доюрский

правее GMWL, т.е. изотопный состав кислорода в этих пробах имеет выраженный изотопный КС (Craig, 1966). Вариация значений $\delta^{18}O$ и КС для индивидуальных проб от возраста водовмещающих пород представлена на рис. 4, при этом усредненные значения КС и интервалы их изменения приведены в табл. 1. Значения КС в индивидуальных пробах находятся в диапазоне от –1,3‰ до +8,6‰. В случае проб с отрицательными значениями КС корректней будет указать величины дейтериевых эксцессов d – параметра, отражающего пересыщение вод дейтерием относительно усредненного изотопного состава метеорных вод, представленного GMWL.

Диапазоны вариации дейтериевого эксцесса и его усредненные значения по пробам в изученных водоносных горизонтах представлены в табл. 1. Значения d в индивидуальных пробах достигают 21‰, что, по-видимому,

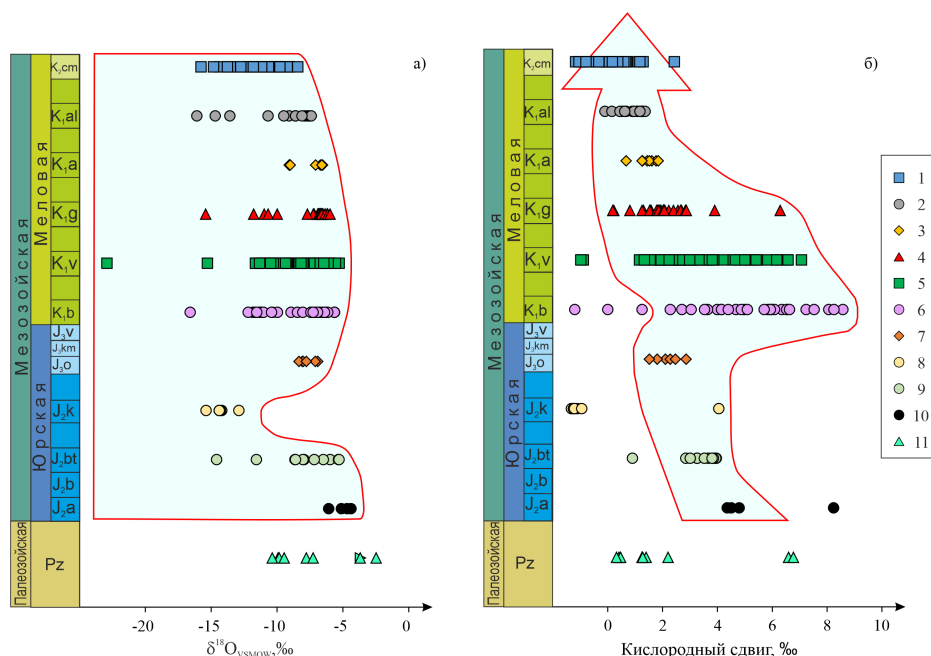


Рис. 4. Вариация изотопного состава кислорода вод (а) и величины КС (б) от возраста водовмещающих отложений. Pz – палеозой; мезозой: юрская система: J_а – аален; J_б – байос; J_в – бат; J_к – келовеи; J_о – оксфорд; J_кт – кимеридж; J_в – волга; меловая система: K_б – берриас; K_в – валанжин; K_г – готерив; K_а – апт; K_{ал} – альб; K_{ст} – сеноман. Области выделены диапазоны вариации $\delta^{18}O$ (а) и общего тренда изменения величины КС (б) для вод мезозойских водоносных отложений. Условные обозначения см. рис. 2

может являться следствием конденсатогенной природы этих вод.

Представленная выборка охватывает практически непрерывный стратиграфический ряд водоносных пластов от аалена (средняя юра) до сеномана (верхний мел). Для сравнения также были привлечены данные по водам, отобраным из пластов верхнего палеозоя. При указанных выше вариациях изотопного состава кислорода, зависимость КС от возраста водоносных пластов имеет экстремальную форму с максимумом (~ 9‰), приходящимся на отложения берриаса (нижний мел).

Содержание водорастворенного неорганического углерода (DIC), как сумма диссоциатов угольной кислоты и водорастворенного углекислого газа ($\text{CO}_{2\text{водн}} + \text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$), и его изотопный состав представлены на рис. 5а, вариация изотопного состава DIC от возраста водоносных отложений представлена на рис. 5б. Концентрация DIC в исследованных водах варьирует в широком диапазоне значений: от 0,17 до 38,6 ммоль/л при $\delta^{13}\text{C}$ от $-51,8\%$ до $+21,8\%$. Для большинства исследованных вод доминирующей компонентой в составе DIC выступал гидрокарбонат-ион, при этом $\text{CO}_{2\text{водн}}$ и ион CO_3^{2-} в большинстве проб присутствовали лишь в следовом количестве. Исключением являются единичные пробы, отобранные из водоносных горизонтов сеноманского, альбского, валанжинского и валанжин-берриасового возрастов. Наиболее обогащенными $\text{CO}_{2\text{водн}}$ выступили воды сеноманского горизонта, где содержание $\text{CO}_{2\text{водн}}$ в ряде случаев превышало содержание других диссоциатов на несколько порядков.

Обсуждение

Изотопный состав кислорода и водорода вод

Из рис. 3 видно, что лишь отдельные точки, отражающие изотопный состав исследованных вод, ложатся на современную глобальную линию метеорных вод. К таким пробам относятся в первую очередь воды, отобранные из сеноманских отложений, и одна – из валанжин-берриасских. На первый взгляд, такое положение точек может указывать на современное метеорно-инфильтрационное питание этих водоносных горизонтов (Alçiçek et al., 2019). Однако некоторые сомнения вызывает широкий диапазон вариации изотопного состава кислорода и водорода вод даже на линии GMWL, поскольку для современных метеорных вод, инфильтрующихся в водоносные горизонты в областях питания, следовало бы ожидать усредненного изотопного состава атмосферных осадков за весь сезон (Ферронский, Поляков, 2009). Широкая вариация изотопного состава вод сеноманского водоносного горизонта также может быть обусловлена и довольно широким пространственным удалением отдельных месторождений и, соответственно, различиями климатических условий формирования вод на момент их выпадения в виде атмосферных осадков.

Большинство изученных вод имеет изотопный состав, существенно отклоняющийся от тренда глобальной линии метеорных вод. Относительное обогащение вод тяжелым изотопом кислорода ^{18}O наблюдается для большинства вод, начиная с ааленского водоносного горизонта

| Возраст | Номер на рис. 2 | M, мг/дм ³ | DIC сумма, ммоль/дм ³ | $\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$, ‰ | $\delta\text{D}_{\text{VSMOW}}$, ‰ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$, ‰ | КС, ‰ | d, ‰ | Кол-во проб, шт. |
|--------------------|-----------------|----------------------------------|----------------------------------|---|-------------------------------------|--|------------------------------|------------------------------|------------------|
| сеноман | 1 | $\frac{224 \div 20269}{6257}$ | $\frac{1 \div 26}{4}$ | $\frac{-52,0 \div 18,0}{-6,0}$ | $\frac{-109 \div -60}{-78}$ | $\frac{-16,0 \div -8,0}{-11,0}$ | $\frac{-1,2 \div 2,4}{0,0}$ | $\frac{-9 \div 19}{10}$ | 32 |
| альб | 2 | $\frac{687 \div 22855}{18384}$ | $\frac{1 \div 37}{11}$ | $\frac{-21,8 \div 21,8}{+12,0}$ | $\frac{-123 \div -58}{-62}$ | $\frac{-16,0 \div -7,0}{-8,6}$ | $\frac{-0,1 \div 1,4}{1,0}$ | $\frac{-0,88 \div 10,8}{+4}$ | 16 |
| апт | 3 | $\frac{10691 \div 23848}{19007}$ | $\frac{3 \div 15}{8}$ | $\frac{-13,6 \div 13,9}{-3,0}$ | $\frac{-72 \div -55}{-58}$ | $\frac{-9,0 \div -7,0}{-7,0}$ | $\frac{0,7 \div 1,8}{1,0}$ | $\frac{-4,73 \div 5,02}{-2}$ | 8 |
| готерив | 4 | $\frac{202 \div 21387}{11112}$ | $\frac{1 \div 31}{10}$ | $\frac{-15,0 \div 18,0}{-1,0}$ | $\frac{-115 \div -54}{-58}$ | $\frac{-15,0 \div -6,0}{-7,0}$ | $\frac{0,2 \div 6,3}{2,0}$ | $\frac{-21 \div 9}{-6}$ | 30 |
| валанжин | 5 | $\frac{53 \div 22717}{4488}$ | $\frac{0 \div 39}{8}$ | $\frac{-45,0 \div 10,0}{-12,0}$ | $\frac{-166 \div -55}{-79}$ | $\frac{-23,0 \div -5,0}{-7,0}$ | $\frac{-1,0 \div 7,1}{3,0}$ | $\frac{-46 \div 18}{-13}$ | 68 |
| валанжин – берриас | 6 | $\frac{170 \div 15261}{6294}$ | $\frac{0 \div 35}{14}$ | $\frac{-16,0 \div 4,0}{-10,0}$ | $\frac{-123 \div -90}{-99}$ | $\frac{-17,0 \div -6,0}{-7,0}$ | $\frac{-1,2 \div 8,6}{5,0}$ | $\frac{-59 \div 10}{-36}$ | 31 |
| оксфорд | 7 | $\frac{29565 \div 53690}{32669}$ | $\frac{9 \div 16}{10}$ | $\frac{-19,0 \div 9,0}{-6,0}$ | $\frac{-78 \div -70}{-72}$ | $\frac{-8,3 \div -6,9}{-8,0}$ | $\frac{1,5 \div 2,9}{2,0}$ | $\frac{-22 \div -4}{-9}$ | 6 |
| келовой | 8 | $\frac{201 \div 2781}{374}$ | $\frac{2 \div 4}{3}$ | $\frac{-42,0 \div -16,0}{-22,0}$ | $\frac{-103 \div -86}{-96}$ | $\frac{-15,0 \div -}{13,0}$ $-14,0$ | $\frac{-1,3 \div 4,1}{-1,0}$ | $\frac{18 \div 21}{+20}$ | 7 |
| бат | 9 | $\frac{1082 \div 20579}{12801}$ | $\frac{2 \div 37}{29}$ | $\frac{-16,0 \div -7,0}{-10,0}$ | $\frac{-114 \div -64}{-80}$ | $\frac{-15,0 \div -5,0}{-8,0}$ | $\frac{0,9 \div 4,0}{4,0}$ | $\frac{-22 \div 3}{-16}$ | 11 |
| байос – аален | 10 | $\frac{10761 \div 22259}{17495}$ | $\frac{11 \div 24}{23,5}$ | $\frac{-15,0 \div -4,0}{-12,0}$ | $\frac{-69 \div -62}{-63}$ | $\frac{-6,0 \div -4,0}{-5,0}$ | $\frac{4,0 \div 8,0}{5,0}$ | $\frac{-28 \div -20}{-25}$ | 4 |
| палеозой | 11 | $\frac{22986 \div 71073}{37014}$ | $\frac{3 \div 30}{11}$ | $\frac{-15,0 \div 3,0}{-6,0}$ | $\frac{-77 \div -59}{-72}$ | $\frac{-10 \div -2}{-8,0}$ | $\frac{0,3 \div 6,8}{1,3}$ | $\frac{-56 \div 14}{-1}$ | 9 |

Табл. 1. Распределение изотопных характеристик подземных вод нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири. Примечание: минерализация, содержание DIC и изотопные характеристики подземных вод представлены в следующем виде: над чертой представлен диапазон вариации соответствующих значений для проб, отобранных из водоносного горизонта соответствующего возраста, под чертой представлено усредненное значение по всем пробам из данного возрастного интервала

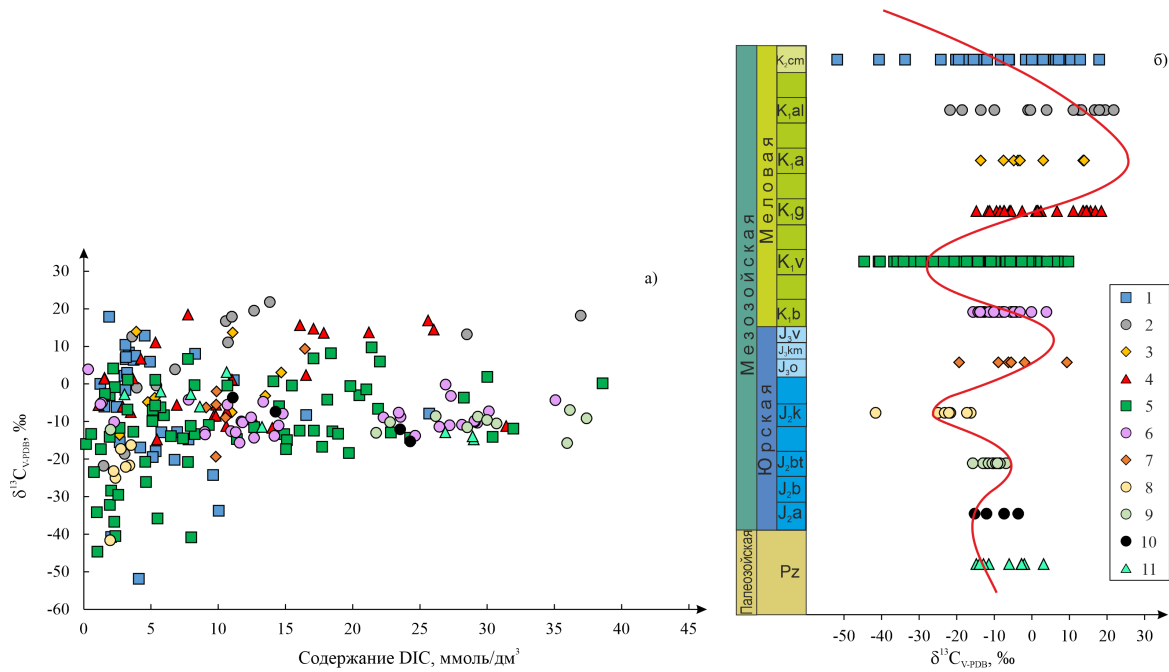


Рис. 5. Концентрация и изотопный состав DIC в водах нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири (а), вариация изотопного состава DIC от возраста водовмещающих отложений (б). Красной линией (б) условно отражена работа изотопного «осциллятора» – см. пояснения в тексте. Условные обозначения см. на рис. 2, 4.

и заканчивая сеноманским, что хорошо видно из рис. 4б по положительным значениям КС относительно GMWL. Согласно литературным данным (Новиков и др., 2020б; Ферронский, Поляков, 2009; Alçiçek et al., 2019), такое обогащение в первую очередь связывают с двумя факторами: испарением, а также длительным высокотермическим контактом вод с породами, обогащенными тяжелыми изотопами кислорода ¹⁸O, например такими, как карбонаты (Hoefs, 2021), т.е. в процессе взаимодействия в системе вода – порода (water-rock interaction – WRI). В нашем случае, по-видимому, насыщение вод тяжелым кислородом обусловлено суммой указанных факторов. Аналогичный эффект мы наблюдали (Новиков и др., 2021а) для родственных исследованным в настоящей работе объектов – пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений южных районов Западной Сибири.

В более молодых водоносных горизонтах наблюдаются постепенное насыщение вод легким изотопом O¹⁶ (рис. 4а) и уменьшение величины КС (рис. 4б), что, очевидно, связано как с уменьшением времени процессов WRI, так и с изменением условий, при которых сингенетичные воды были захоронены и находились в соответствующих водоносных горизонтах. Логично, что для вод более древних глубокопогруженных горизонтов, время и температуры WRI были большими, что давало больший вклад во вторую составляющую обогащения изотопного состава кислорода тяжелым изотопом ¹⁸O. В то же время, из рис. 4 видно, что воды палеозойских отложений обогащены тяжелым кислородом ¹⁸O в относительно меньшей степени в сравнении с водами более молодых водоносных горизонтов, несмотря на теоретически больший промежуток времени WRI. Предположительно, меньшая величина КС для палеозойских вод обусловлена меньшим испарением вод до захоронения в этот период, т.е. палеозойские воды за счет меньшего испарения в меньшей степени были обеднены легким изотопом ¹⁶O, поэтому точки их изотопного

состава были в меньшей степени сдвинуты вправо вверх относительно GMWL, чем точки более молодых водоносных горизонтов. По-видимому, это может косвенно указывать на меньшие климатические температуры в данном регионе в палеозое, что хорошо согласуется с предложенными в работе (Новиков и др., 2019б) схемой периодизации гидрогеологической истории и характеристикой палеосреды северной части Западно-Сибирского мегабассейна (Конторович и др., 2013).

Рассматривая глубокозалегающие водоносные горизонты, подверженные воздействию повышенных пластовых температур более 70 °С (Новиков и др., 2019; Новиков, Шварцев, 2009; Новиков, Борисов, 2021), следует также учитывать процессы формирования конденсатогенных вод, сопровождающиеся их фракционированием и последующей миграцией в вышележащие водоносные горизонты. Принимая во внимание общую тенденцию фракционирования при испарении и переносе в первую очередь легких по изотопному составу вод (водоуглеродную смесь, состоящую из вод и способных к миграции углеводородов), логично предположить, что для глубокопогруженных горизонтов, где нагрев идет снизу вверх, перенос влаги, обогащенной относительно более легкими изотопами, происходит в этом же направлении.

Таким образом, на основе вышесказанного можно заключить, что следует ожидать постепенное относительное обеднение нижележащих вод легким изотопом ¹⁶O с дальнейшим его переносом в вышележащие горизонты посредством межпластовых частичных переносов. Возможно, этим и обусловлен изотопный состав ряда сеноманских проб, очень близкий к современному изотопному составу метеорных вод. Соответственно, можно предположить, что регистрируемый «современный» изотопный состав таких вод отражает уже не нативное соотношение изотопов на момент захоронения, а динамически измененный изотопный состав за счет привноса порций легких изотопов

из нижележащих водоносных горизонтов. Но подчеркнем, что высказанная выше гипотеза требует более глубокой проработки с привлечением расчетных методов.

Приведенные данные для вод водовмещающих пород палеозойского возраста в целом соответствуют вышеописанным тенденциям преобразований изотопного состава кислорода и водорода. Однако на текущий момент объем данных недостаточно представительен, чтобы делать более конкретные выводы. Требуются дополнительные исследования в этом направлении. Полученные данные представлены в настоящей работе в первую очередь для общего набора статистики по изотопному составу вод столь редких и сложных для исследования объектов.

В целом, генезис изученных вод следует рассматривать как древний седиментационный с постепенным захоронением отдельных порций сингенетичных вод вместе с породами. Первичное обогащение вод тяжелым изотопом ^{18}O за счет испарения в теплых климатических условиях в последующем дополнительно усилилось их изотопным обменом с кислородсодержащими породами.

Изотопный состав DIC

Изотопный состав DIC в изученных пробах очень вариативен и охватывает широкий диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$: от $-51,8\%$ до $21,8\%$. Очевидно, что такое многообразие связано главным образом с широким спектром процессов преобразования ОБ в CO_2 и дальнейшего изотопного обмена сформированной углекислоты с окружающим органическим и неорганическим углеродсодержащим веществом. В свою очередь, изотопный состав углерода захороненного органического вещества может быть весьма разнообразным и определяется как материалом материнского ОБ, так и степенью его катагенетических преобразований (Конторович и др., 1985а, 1985б), рис. 6. Так, А.Э. Конторовичем с коллегами было показано, что для седикахитов терригенного и морского происхождения различия в изотопном составе углерода могут достигать более 5‰. Можно предположить, что частично вариация изотопного состава DIC может быть обусловлена и этим фактором.

Термический распад ОБ в окислительной обстановке приводит к формированию CO_2 , который наследует изотопный состав углерода-прекурсора. На этом принципе основан классический метод анализа изотопного состава углерода в органических веществах (Hoefs, 2021). В то же время преобразование ОБ в природе – комплексный процесс, включающий первичное преобразование ОБ в результате жизнедеятельности микроорганизмов и бактерий (Londry, 2008; Pohlman et al., 2008), дальнейшее преобразование более устойчивых органических компонентов при катагенетических изменениях и выделение отдельных фракций легкомигрирующих компонентов, что также подчеркивается в работе (Конторович и др., 1985а), где указано, что изотопный состав углерода седикахитов сильно зависит от стадии преобразования ОБ и имеет нелинейную функцию изменения.

Кроме того, высвобождаемая в ходе таких процессов углекислота способна участвовать в процессах силикат-карбонатного выветривания горных пород, находящихся в контакте с подземными водами (Das et al., 2005), т.е. изотопного обмена с окружающей средой. Еще одним осложняющим интерпретацию результатов фактором может служить вариативность изотопного состава углерода флюидов, возникающая вследствие их фракционирования при процессах дегазации. В работе (Li et al., 2022) наглядно показано, что в процессе добычи метана из угольных сланцев наблюдается его четырехступенчатое фракционирование с изменением изотопного состава углерода по схеме «стабильный – легче – тяжелее – снова легче». Безусловно, учет всех факторов возможного влияния на изучаемые системы стабильных изотопов – задача крайне сложная. Поэтому в настоящей работе мы постарались рассмотреть лишь общие наблюдаемые закономерности для широкой серии объектов с целью минимизации влияния отдельных частных факторов на общую картину.

Из представленной на рис. 5а зависимости видно, что по мере насыщения вод углекислотой распределение изотопного состава DIC сужается: от исходного разброса значений $\delta^{13}\text{C}$ более чем в 70‰ в области низких концентраций DIC (от 0 до 10 ммоль/дм³) оно постепенно сокращается сначала до $\sim 40\%$ в диапазоне концентраций DIC

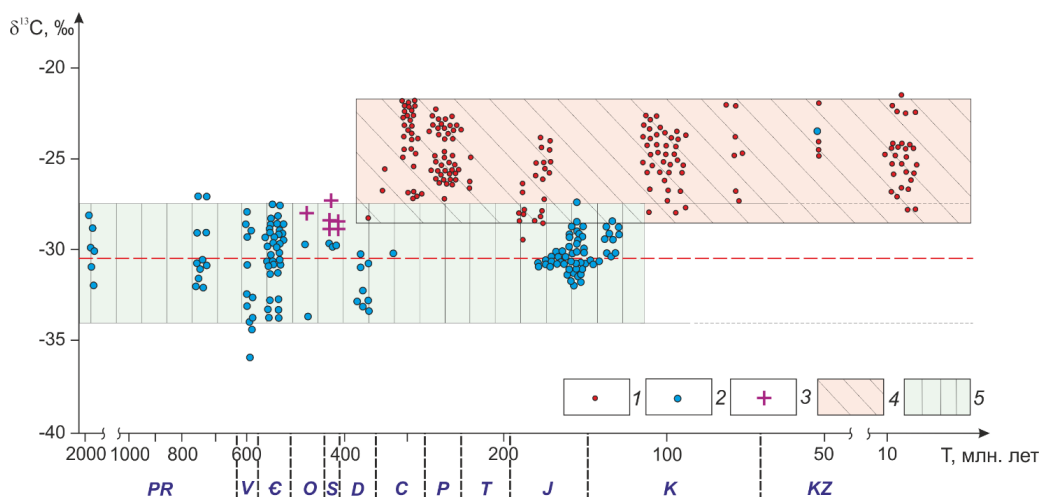


Рис. 6. Эволюция изотопного состава углерода в седикахитах в докембрии и фанерозое (Конторович и др., 1985а): 1 – терригенные; 2 – аквагенные (платктоногенные) седикахиты; 3 – граптолитовые сланцы силура западной части Сибирской платформы; интервал вариаций ^{13}C : 4 – в гетерогенных; 5 – в аквагенных седикахитах. Обозначения: PR – протерозойская акротема; системы: V – венд; E – кембрий; O – ордовик; S – силур; D – девон; C – карбон; P – пермь; T – триас; J – юра; K – мел; KZ – кайнозойская эратема

от 10 до 30 ммоль/дм³ и далее до ~20‰ при концентрациях DIC выше 30 ммоль/дм³. Также, очевидно, что содержание DIC в водах не имеет прямой взаимосвязи с возрастом водовмещающих отложений и связано в первую очередь с доступностью углеродсодержащего вещества водам и бактериям, принимающим непосредственное участие в его переработке. Подтверждение этого тезиса хорошо видно из представленной на рис. 5а зависимости для точек, отвечающих содержанию DIC в водах палеозойских отложений: содержание углекислоты в отдельных пробах даже ниже, чем в ряде проб более молодых водоносных горизонтов.

Изотопный осциллятор

Изменение изотопного состава углерода носит волнообразный характер (рис. 5б). Причина такого поведения зависимости, скорее всего, связана с нелинейным изменением изотопного состава самого ОВ от времени его преобразования, что отмечается в работе (Конторович и др., 1985а). Вероятно, волнообразный характер функции изотопного состава DIC может быть обусловлен конкуренцией процессов бактериального преобразования ОВ в водоносных горизонтах, что неизбежно приводит к смене механизмов изотопного фракционирования (Новиков и др., 2020б). Условно закрытую систему глубокозалегающего водоносного горизонта следует рассматривать как затухающий гармонический осциллятор (Трубецков, Рожнев, 2001), где источником «колебаний» изотопного состава выступают конкурирующие процессы преобразования ОВ, которые, по-видимому, со временем должны выходить на определенный базовый уровень данной системы. Условными «максимумами колебаний» такого изотопного осциллятора выступают бактериальные процессы преобразования ОВ, сырьем в которых являются продукты соответствующего конкурирующего процесса, а изотопный состав углерода выделяемой в каждом случае углекислоты находится как раз в этих «максимумах»: выраженный положительный при метаногенезе и уходящий в глубоко отрицательный при сульфат-метановых переходах (Новиков и др., 2021б).

Предполагая сохранение затухающей волнообразной функции, что также видно из сужения разброса изотопного состава DIC в водах палеозойских отложений, можно предположить, что система стремится к некоторому равновесному значению $\delta^{13}\text{C}$ – около –10‰ в нашем случае. Полученное значение $\delta^{13}\text{C}$, на удивление, довольно близко к усредненному изотопному составу воздушной углекислоты, поглощенной атмосферными осадками (Новиков и др., 2021в; Корес et al., 2019) с учетом коэффициента фракционирования (Zang et al., 1995): от –9,2‰ до –10,2‰. Принимая корректность предложенной гипотезы, просматривается интересная закономерность, предполагающая гомогенизацию изотопного состава углекислоты в подземных водах и замыкающая изотопный круговорот углерода в системе «воздушный CO₂ – органическое вещество – DIC». Этот круговорот можно описать следующим образом.

Исходный атмосферный углекислый газ (CO₂^{ATM}) является первоисточником большей части углекислоты, поглощаемой как атмосферными осадками, так и растительностью при фотосинтезе. Условно атмосферу можно

рассматривать как обобщенный первичный резервуар, накапливающий углекислоту с усредненным изотопным составом углерода.

При фотосинтезе растения фракционируют углекислоту, насыщая свои ткани легким изотопом, который, неизбежно, после гибели растений попадает в почву (CO₂^{PAC}). Тяжелый углекислый газ служит основой для построения карбонатного материала, накапливающегося, в конечном итоге, в виде массива карбонатсодержащих осадочных пород (CO₂^{KAPB}). Таким образом создается первая ступень преобразования и разделения атмосферной углекислоты.

Атмосферные осадки, поглощая сначала атмосферный CO₂, инфильтруются через почвенный слой в более глубокие горизонты, захватывают приповерхностную биогенную изотопно-легкую углекислоту, а также диффузионную почвенную углекислоту, близкую по изотопному составу к атмосферной. Частичный изотопный обмен такого DIC с породами при инфильтрации приводит, в среднем, к значениям $\delta^{13}\text{C}(\text{CO}_2^{\text{ИНФ}})$, близким к –12‰ (по собственным наблюдениям). Условно, этот этап можно рассматривать как вторую ступень преобразования изотопного состава углерода углекислоты. В данном случае, уже не атмосферной, а водорастворенной.

Захоронение таких вод в комплексе с органическим материалом ($\delta^{13}\text{C}^{\text{ОРГ}} < -30\%$), либо выделение их в водоносные горизонты, ограниченные надежными водоупорами, запускает тот самый маятник (осциллятор), принцип работы которого описан выше. Переработка ОВ в CO₂ и его дальнейшее участие в жизни бактериальных колоний приводят к «раскачиванию» изотопного состава DIC от высоко положительных (при метаногенезе) до глубоко отрицательных (при сульфатметановых переходах – SMT). Данный этап следует рассматривать как третью ступень преобразования углекислоты – уже в глубоких водоносных горизонтах.

Параметром, характеризующим угасающие колебания изотопного осциллятора, как показано на примере наших данных, является некая усредненная величина изотопного состава углерода ($\delta^{13}\text{C}^y$), возникающая, очевидно, при достижении условного равновесия в работе двух конкурирующих бактериальных систем. В нашем случае примечательно то, что эта усредненная дельта оказалась очень близкой к изотопному составу атмосферной углекислоты. Соответственно, возврат такой углекислоты как высоко-мобильного компонента подземных вод, наиболее подверженного миграции (Вышемирский, Конторович, 1998), обратно в атмосферу (эманациями индивидуального углекислого газа на поверхность, либо в виде DIC) с точки зрения изотопного состава не будет привносить никаких изменений и, по-видимому, может рассматриваться как замыкающее звено вышеописанной цепи.

Цикличность процессов накопления органических веществ (нефтей, углей и газов) была показана в работах В.С. Вышемирского и А.Э. Конторовича (Вышемирский, Конторович, 1997; Вышемирский, Конторович, 1998). Развивая эту мысль в настоящей работе, мы попытались продемонстрировать участие накапливаемых углеводородов в еще более широком цикле углерода в глобальной системе «подземные воды – органическое вещество – бактерии – газы», которая стремится к равновесному значению $\delta^{13}\text{C}$, близкому к атмосферной углекислоте,

являющейся, по сути, базовым источником углекислоты в природных водах. Подчеркнем, что предложенный механизм носит на текущий момент только гипотетический характер и требует дальнейшего развернутого исследования с привлечением аналогичных объектов и еще большего фактического материала.

Заключение

Впервые получена представительная выборка данных по изотопному составу кислорода и водорода пластовых вод нефтегазоносных отложений северных районов Западной Сибири, охватывающих временной интервал от палеозоя до верхнего мела. Широкий интервал значений δD и $\delta^{18}O$ указывает на существенные изменения палеоклиматических условий, при которых происходило формирование и захват сингенетической влаги породами: от теплых до прохладных. Для большинства изученных вод наблюдаются выраженные КС, что указывает на теплые климатические условия формирования влаги с активным испарением ее с поверхности древних бассейнов и дальнейшее преобразование изотопного состава кислорода вод при взаимодействии с окружающими породами. Полученные тренды изменения изотопного состава захороненных вод, а также величин d и КС хорошо совпадают с предполагаемыми изменениями палеоклиматических условий исследованного региона и могут служить условным палеотермометром.

Установлено, что для изученных вод в целом наблюдается постепенное их насыщение водорастворенным неорганическим углеродом с увеличением возраста водовмещающих пород, при этом его изотопный состав изменяется нелинейно, варьируя от глубоко отрицательных до положительных значений согласно волнообразной функции. Предположено, что такая вариация может быть связана с изменением механизма преобразования ОВ в водах и конкурирующими процессами термической органо-деструкции, метаногенеза, сульфатредукции и сульфат-метанового перехода, осложненных карбонат-силикатным выветриванием. Конкретные детали протекания этого комплексного процесса требуют дополнительных исследований, выходящих за рамки настоящей работы, но важнейшим наблюдением здесь выступила гомогенизация изотопного состава DIC. Предложена модель, предполагающая гомогенизацию изотопного состава углекислоты в подземных водах до значений, близких к усредненным значениям воздушного CO_2 с учетом коэффициентов фракционирования. Выявленный эффект, возможно, указывает на замыкание углеродного цикла в системе «воздушный CO_2 – органическое вещество – DIC».

Финансирование/Благодарность

Исследования проводились при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации. Работа выполнена по государственному заданию ИНГГ СО РАН (№ FWZZ- 2022-0014) и ИГМ СО РАН (№ 122041400171-5).

Благодарим рецензентов за внимательное ознакомление с работой и глубокий анализ представленных нами результатов и выводов, а также ценные и полезные замечания.

Литература

- Ветштейн В.Е., Артемчук В.Г., Назаров А.Д. (1981). Особенности формирования и нефтегазопоисковое значение изотопного состава пластовых вод и поровых растворов. *Геология нефти и газа*, 6, с. 35–43.
- Вышемирский В.С., Конторович А.Э. (1997). Циклический характер нефтенакпления в истории Земли. *Геология и геофизика*, 38(5), с. 907–918.
- Вышемирский В.С., Конторович А.Э. (1998). Эволюция образования углеводородных газов в истории Земли. *Геология и геофизика*, 39(10), с. 1392–1401.
- Голышев С.И., Иванов В.Г. (1983). Изотопный состав водорода, кислорода, углерода подземных вод юго-восточной части Западно-Сибирского нефтегазоносного бассейна. *Геохимия*, 7, с. 1024–1028.
- Конторович А.Э., Богородская Л.И., Голышев С.И. (1985а). Закономерности фракционирования изотопов углерода в седикахитах. *Геология и геофизика*, 9, с. 34–42.
- Конторович А.Э., Богородская Л.И., Голышев С.И. (1985б). Распределение стабильных изотопов углерода в седикахитах различной генетической природы. *Геология и геофизика*, 7, с. 3–11.
- Конторович А.Э., Конторович В.А., Рыжкова С.В., Шурыгин Б.Н., Вакуленко Л.Г., Гайдебурова Е.А., Данилова В.П., Казаненков В.А., Ким Н.С., Костырева Е.А., Москвин В.И., Ян П.А. (2013). Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде. *Геология и геофизика*, 54(8), с. 972–1012.
- Криосфера нефтегазоконденсатных месторождений полуострова Ямал (2013). Т.2. Криосфера Бованенковского нефтегазоконденсатного месторождения. Под ред. Ю.Б. Бадю, Н.А. Гафарова, Е.Е. Поднебесного. М.: ООО «Газпром экспо», 424 с.
- Крицук Л.Н., Поляков В.А. (2005). Изотопный и химический состав подземных вод и природных вод Западной Сибири. М.: Геоинформмарк, 52 с.
- Кругликов Н.М. (1964). Гидрогеология северо-западного борта Западно-Сибирского артезианского бассейна. *Тр. ВНИГРИ*. Ленинград: Недра, вып. 238, 166 с.
- Кругликов Н.М., Нелюбин В.В., Яковлев О.Н. (1985). Гидрогеология Западно-Сибирского нефтегазоносного мегабассейна и особенности формирования залежей углеводородов. Ленинград: Недра, 363 с.
- Курчиков А.Р., Плавник А.Г. (2009). Кластеризация гидрогеохимических данных в задачах оценки прогнозных ресурсов углеводородов нефтегазоносных комплексов Западной Сибири. *Геология и геофизика*, 50(11), с. 1218–1226.
- Лепокурова О.Е. (2012). Геохимия уникальных пресных щелочных вод Чулымского бассейна. *Вестник Томского государственного университета*, 365, с. 181–186.
- Мельников В.П., Спесивцев В.И. (1995). Инженерно-геологические и геокриологические условия шельфа Баренцева и Карского морей. Новосибирск: Наука, 198 с.
- Назаров А.Д. (2004). Нефтегазовая гидрогеохимия юго-восточной части Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции. М.: Идея-Пресс, 288 с.
- Новиков Д.А. (2019). Роль элизионного водообмена в формировании гидродинамического поля Ямало-Карской депрессии. *Литология и полезные ископаемые*, 3, с. 248–261. <https://doi.org/10.31857/S0024-497X20193248-261>
- Новиков Д.А. (2020). Характер равновесий в системе «вода-газ» на примере юрско-меловых нефтегазоносных отложений Ямало-Карской депрессии. *Геология и геофизика*, 61(8), с. 1074–1092. DOI: 10.15372/GiG2019179
- Новиков Д.А., Борисов Е.В. (2021). Прогноз нефтегазоносности юрских резервуаров зоны сочленения Енисей-Хатангского и Западно-Сибирского бассейнов. *Геология и геофизика*, 62(2), с. 216–237. DOI: 10.15372/GiG2020119
- Новиков Д.А., Шварцев С.Л. (2009). Гидрогеологические условия Предьенейской нефтегазоносной субпровинции. *Геология и геофизика*, 50(10), с. 1131–1143.
- Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Ян П.А. (2019а). Особенности латеральной гидрогеохимической и аутигенно-минералогической зональности оксфордского регионального резервуара Надым-Тазовского междуречья. *Геология и геофизика*, 60(6), с. 843–859. DOI: 10.15372/GiG2019041
- Новиков Д.А., Черных А.В., Садыкова Я.В., Дульцев Ф.Ф., Хилько В.А., Юрчик И.И. (2019б). Эволюция гидрогеохимического поля северных и арктических районов Западно-Сибирского осадочного бассейна в мезозое. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 330(10), с. 165–180. <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/10/2314>

- Новиков Д.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В., Хилько В.А., Юрчик И.И., Сухорукова А.Ф. (2020а). Гидрогеохимия доюрских комплексов Западной Сибири. *Геология и геофизика*, 61(11), с. 1561–1576. DOI: 10.15372/GiG2019145
- Новиков Д.А., Максимова А.А., Пыряев А.Н., Ян П.А. (2020б). Первые изотопно-гидрогеохимические данные по природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 331(11), с. 157–167. <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2897>
- Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Рыжкова С.В. (2021а). Первые данные по изотопному составу пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 332(2), с. 59–72. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3043>
- Новиков Д.А., Пыряев А.Н., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Ильин А.В., Чертовских Е.О. (2021б). Новые данные по изотопному составу ($\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) рассолов Сибирской платформы. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 332(7), с. 20–33. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3260>
- Новиков Д.А., Копылова Ю.Г., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф., Пыряев А.Н., Максимова А.А., Дульцев Ф.Ф., Черных А.В. (2021в). Изотопно-геохимические особенности проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири). *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 332(3), с. 135–145. <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/3/3109>
- Поляков В.А., Дубинчук В.Т., Голубкова Е.В., Лыгин В.А., Макушин Ю.В., Макарова К.М. (2008). Изотопные исследования подземных вод на полигоне «Томский». *Разведка и охрана недр*, 29(11), с. 47–52.
- Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А. (2022). Стабильные изотопы как инструмент контроля границ закрытых экосистем на примере бассейна р. Витим. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 333(5), с. 148–157. <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3483>
- Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Конторович А.Э., Плавник А.Г. (2004). Гидрохимическая зональность юрских и меловых отложений Западно-Сибирского бассейна. *Геология и геофизика*, 45(7), с. 826–832.
- Стрелецкая И.Д., Лейбман М.О. (2002). Криогеохимическая взаимосвязь пластовых льдов, криопогов и вмещающих их отложений центрального Ямала. *Криосфера Земли*, 6(3), с. 15–24.
- Трубецков Д.И., Рожнев А.Г. (2001). Линейные колебания и волны. М.: Изд-во Физико-математической литературы, 416 с.
- Ферронский В.И., Поляков В.А. (2009). Изотопия гидросферы земли. М.: Научный мир, 632 с.
- Шварцев С.Л. (1991). Взаимодействие воды с алюмосиликатными горными породами. Обзор. *Геология и геофизика*, 12, с. 16–50.
- Шварцев С.Л. (1992). О соотношении составов подземных вод и горных пород. *Геология и геофизика*, 8, с. 16–50.
- Шварцев С.Л. (2008). Взаимодействие в системе вода-порода как новая база для развития гидрогеологии. Тихоокеанская геология, 27(6), с. 5–16.
- Шварцев С.Л., Новиков Д.А. (2004). Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь). *Геология и геофизика*, 45(8), с. 1008–1020.
- Alçiçek H., Bülbül A., Yavuzer I., Alçiçek M.C. (2019). Origin and evolution of the thermal waters from the Pamukkale Geothermal Field (Denizli Basin, SW Anatolia, Turkey): Insights from hydrogeochemistry and geothermometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 372, pp. 48–70. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.09.011>
- Cai C., Franks S.G., Aagaard P. (2001) Origin and migration of brines from Paleozoic strata in Central Tarim, China: constrains from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$ and water chemistry. *Applied Geochemistry*, 16, pp. 1269–1284. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00006-3)
- Connolly C.A., Walter L.M., Baadsgaard H, Longstaffe F.J. (1990). Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, Western Canada Sedimentary Basin. I. Chemistry. *Applied Geochemistry*, 5, pp. 375–413. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(90\)90017-Y](https://doi.org/10.1016/0883-2927(90)90017-Y)
- Craig H. (1966). Isotopic Composition and Origin of the Red Sea and Salton Sea Geothermal Brines. *Science*, 154, pp. 1544–1548. <https://doi.org/10.1126/science.154.3756.1544>
- Craig H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, p. 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Dansgaard W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), pp. 436–468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
- Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. (2005). Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 236, pp. 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.05.009>
- Das N., Horita J., Holland H.D. (1990). Chemistry of fluid inclusions in halite from the Salina Group of the Michigan Basin: Implications for Late Silurian seawater and the origin of sedimentary brine. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, pp. 319–327. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90321-B](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90321-B)
- Epstein S., Mayeda T. (1953). Variation of O18 content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4(5), pp. 213–224. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(53\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(53)90051-9)
- Evans M.N., Selmer K.J., Breeden III B.T., Lopatka A.S., Plummer R.E. (2016). Correction algorithm for online continuous flow $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ carbonate and cellulose stable isotope analyses. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, pp. 3580–3588. <https://doi.org/10.1002/2016GC006469>
- Global Monitoring Laboratory. <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/iadv/>
- Görka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczebak D., Jedrysek M.-O. (2011). Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO_2 . *Environmental Pollution*, 159, pp. 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.08.027>
- Hitchon B., Billings G.K., Klován J.E. (1971). Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin-III. Factors controlling chemical composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, pp. 1321–1349. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(71\)90088-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(71)90088-3)
- Hitchon B., Friedman I. (1969). Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin-I. Stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33, pp. 1321–1349. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(69\)90178-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(69)90178-1)
- Hoefs J. (2021). Stable isotope geochemistry. Ninth edition. Springer Nature Switzerland AG, 528 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77692-3>
- Jiang L., Worden R.H., Cai C. (2015). Generation of isotopically and compositionally distinct water during thermochemical sulfate reduction (TSR) in carbonate reservoirs: Triassic Feixianguan Formation, Sichuan Basin, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 165, pp. 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.05.033>
- Kopec B.G., Feng X., Posmentier E.S., Sonder L.J. (2019). Seasonal deuterium excess variations of precipitation at summit, Greenland, and their climatological significance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, pp. 72–91. <https://doi.org/10.1029/2018JD028750>
- Labotka D.M., Panno, S.V., Locke, R.A., Freiburg J.T. (2015). Isotopic and geochemical characterization of fossil brines of the Cambrian Mt. Simon Sandstone and Ironton-Galesville Formation from the Illinois Basin, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 165, pp. 342–360. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.06.013>
- Li W., Lu S., Li J., Wei Y., Zhao S., Zhang P., Wang Z., Li X., Wang J. (2022). Research progress on isotopic fractionation in the process of shale gas/coalbed methane migration. *Petroleum Exploration and Development*, 49(5), pp. 1069–1084. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60333-1](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60333-1)
- Londry K.L., Dawson K.G., Grover H.D., Summons R.E., Bradley A.S. (2008). Stable carbon isotope fractionation between substrates and products of Methanosarcina barkeri. *Organic Geochemistry*, 39, pp. 608–621. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.03.002>
- McNutt R.H., Frape S.K., Dollar P. (1987). A strontium, oxygen and hydrogen isotopic composition of brines, Michigan and Appalachian Basins, Ontario and Michigan. *Applied Geochemistry*, 2, pp. 495–505. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(87\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0883-2927(87)90004-7)
- Nan H., Rao W., Ma H., Chen J., Li T. (2011). Hydrogen, oxygen, helium and strontium isotopic constraints on the formation of oilfield waters in the western Qaidam Basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, pp. 651–660. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.10.018>
- Nelson S.T. (2000). A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, pp. 1044–1046. [https://doi.org/10.1002/1097-0231\(20000630\)14:12<1044::AID-RCM987>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1097-0231(20000630)14:12<1044::AID-RCM987>3.0.CO;2-3)
- Novikov D.A. (2017). Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5), pp. 780–788. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(17\)30088-5](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(17)30088-5)
- Novikov D.A. (2018). Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 193(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/193/1/012049>
- Novikov D.A. (2020). Hydrogeochemistry of authigenic mineral formation in Upper Jurassic sediments (the Nadym-Taz interfluvial area, Arctic regions of Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 122, 104704. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104704>

Novikov D.A. (2022). Equilibrium modeling of water-gas systems in Jurassic–Cretaceous reservoirs of the Arctic petroleum province, northern West Siberia. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2), pp. 363–373. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60030-2](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60030-2)

Novikov D.A., Sukhorukova A.F. (2015). Hydrogeology of the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10), pp. 8703–8719. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1832-5>

Pohlman J.W., Ruppel C., Hutchinson D.R., Downer R., Coffin R.B. (2008). Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 25, pp. 942–951. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.01.016>

Reference Products for Environment and Trade. <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx>

Roston B.J., Holmden C. (2000). Fingerprinting formation-waters using stable isotopes, Midale Area, Williston Basin, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 69–70, pp. 219–223. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(00\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(00)00024-8)

Schlegel M.E., McIntosh J.C., Bates B.L., Kirk M.F., Martini A.M. (2011). Comparison of fluid geochemistry and microbiology of multiple organic-rich reservoirs in the Illinois Basin, USA: Evidence for controls on methanogenesis and microbial transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, pp. 1903–1919. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.01.016>

Schlegel M.E., Zhou Z., McIntosh J.C., Ballentine C.J., Person M.A. (2011). Constraining the timing of microbial methane generation in an organic-rich shale using noble gases, Illinois Basin, USA. *Chemical Geology*, 287, pp. 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.04.019>

Strapoc D., Mastalerz M., Schimmelmann A., Drobnik A., Hedges S. (2008). Variability of geochemical properties in a microbially dominated coalbed gas system from the eastern margin of the Illinois Basin, USA. *International Journal of Coal Geology*, 76, pp. 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.02.002>

Stueber A.M., Walter L.M. (1991). Origin and chemical evolution of formation waters from Silurian-Devonian strata in the Illinois basin, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, pp. 309–325. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90420-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90420-A)

Stueber A.M., Walter L.M., Huston T.J., Pushkar P. (1993). Formation waters from Mississippian-Pennsylvanian reservoirs, Illinois basin, USA: Chemical and isotopic constraints on evolution and migration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, pp. 763–784. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90167-U](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90167-U)

Wilson T.P., Long D.T. (1993). Geochemistry and isotope chemistry of Ca-Na-Cl brines in Silurian strata, Michigan Basin, U.S.A. *Applied Geochemistry*, 8, pp. 507–524. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(93\)90079-V](https://doi.org/10.1016/0883-2927(93)90079-V)

Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. (1995). Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(1), pp. 107–114. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)91550-D](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)91550-D)

Zhu W., Wang T., Xie Z., Xie B., Liu K. (2015). Giant gas discovery in the Precambrian deeply buried reservoirs in the Sichuan Basin, China: Implications for gas exploration in old cratonic basins. *Precambrian Research*, 262, pp. 45–66. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.02.023>

Сведения об авторах

Дмитрий Анатольевич Новиков – кандидат геол.-минерал. наук, заведующий лабораторией, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент, Новосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3. e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Александр Николаевич Пыряев – кандидат хим. наук, научный сотрудник, Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; старший преподаватель кафедры химической и биологической физики, Новосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3

Анастасия Алексеевна Максимова – младший научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ассистент кафедры минералогии и геохимии, Новосибирский государственный университет

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3

Федор Федорович Дульцев – научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3

Анатолий Витальевич Черных – научный сотрудник, Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, д. 3

Статья поступила в редакцию 03.03.2023;

Принята к публикации 13.09.2023; Опубликовано 30.12.2023

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Evolution of the composition of H, O and C stable isotopes in the groundwaters of oil and gas bearing sediments in the northern regions of West Siberia

D.A. Novikov^{1,3*}, A.N. Pyrayev^{2,3}, A.A. Maximova^{1,3}, F.F. Dultsev¹, A.V. Chernykh¹

¹Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

²V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

³Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation

*Corresponding author: Dmitry A. Novikov, e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Abstract. The results of a study of the isotopic composition of oxygen and hydrogen of groundwater and dissolved inorganic carbon in oil and gas deposits of the northern regions of Western Siberia, covering a wide stratigraphic range – Mesozoic and Paleozoic are presented. The obtained

values are very diverse, covering the intervals from –120 to –50‰ (δD) and from –17 to –2‰ (δ¹⁸O). Such a variable isotopic composition of waters indicates the absence of a unified mechanism for the accumulation of waters and their transformation during the geological evolution of the West

Siberian sedimentary basin. The main feature of most of the studied waters is the pronounced values of oxygen isotope shifts relative to GMWL, which generally increase with the age of water-bearing deposits and reach 9‰, which indicates their ancient sedimentary origin.

Variations in the isotopic composition of DIC (from –51.8 to +21.8‰) and its content in waters (from 0.2 to 38.6 mmol/l) indicate a wide range of water burial conditions and processes involved in the conversion of water-soluble carbon dioxide. A general pattern of changes in the isotopic composition of carbon in CO₂ with time, expressed in general form by damped oscillations of the “isotope oscillator”, is revealed. A model of transformation of the carbon isotope composition in carbon dioxide in the closed cycle “atmosphere-soils-deep aquifers” for oil and gas deposits of the northern regions of Western Siberia based on the obtained isotope data is proposed.

Keywords: hydrogeochemistry, stable isotopes, oxygen, hydrogen, carbon, northern regions of Western Siberia

Recommended citation: Novikov D.A., Pyrayev A.N., Maximova A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. (2023). Evolution of the composition of H, O and C stable isotopes in the groundwaters of oil and gas bearing sediments in the northern regions of West Siberia. *Georesursy = Georesources*, 25(4), pp. 219–232. <https://doi.org/10.18599/grs.2023.4.16>

Acknowledgments

Work is done on state assignment of IPGG SB RAS (Project FSWW-0022-0014) and IGM SB RAS (№ 122041400171-5).

The authors thank the reviewers for valuable and useful comments.

References

- Alçiçek H., Bülbül A., Yavuzer I., Alçiçek M.C. (2019). Origin and evolution of the thermal waters from the Pamukkale Geothermal Field (Denizli Basin, SW Anatolia, Turkey): Insights from hydrogeochemistry and geothermometry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 372, pp. 48–70. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.09.011>
- Cai C., Franks S.G., Aagaard P. (2001). Origin and migration of brines from Paleozoic strata in Central Tarim, China: constrains from ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, δD, δ¹⁸O and water chemistry. *Applied Geochemistry*, 16, pp. 1269–1284. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(01\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(01)00006-3)
- Connolly C.A., Walter L.M., Baadsgaard H., Longstaffe F.J. (1990). Origin and evolution of formation waters, Alberta Basin, Western Canada Sedimentary Basin. I. Chemistry. *Applied Geochemistry*, 5, pp. 375–413. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(90\)90017-Y](https://doi.org/10.1016/0883-2927(90)90017-Y)
- Craig H. (1966). Isotopic Composition and Origin of the Red Sea and Salton Sea Geothermal Brines. *Science*, 154, pp. 1544–1548. <https://doi.org/10.1126/science.154.3756.1544>
- Craig H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, pp. 1702–1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Cryosphere of oil and gas condensate fields of the Yamal Peninsula (2013). V.2. Cryosphere of the Bovanenkovo oil and gas condensate field. Ed. Yu.B. Badu, N.A. Gafarov, E.E. Podnebesny. Moscow: OOO Gazprom Expo, 424 p. (In Russ.)
- Dansgaard W. (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), pp. 436–468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
- Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. (2005). Carbon isotope ratio of dissolved inorganic carbon (DIC) in rivers draining the Deccan Traps, India: sources of DIC and their magnitudes. *Earth and Planetary Science Letters*, 236, pp. 419–429. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.05.009>
- Das N., Horita J., Holland H.D. (1990). Chemistry of fluid inclusions in halite from the Salina Group of the Michigan Basin: Implications for Late Silurian seawater and the origin of sedimentary brine. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54, pp. 319–327. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(90\)90321-B](https://doi.org/10.1016/0016-7037(90)90321-B)
- Epstein S., Mayeda T. (1953). Variation of O18 content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 4(5), pp. 213–224. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(53\)90051-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(53)90051-9)
- Evans M.N., Selmer K.J., Breeden III B.T., Lopatka A.S., Plummer R.E. (2016). Correction algorithm for online continuous flow δ¹³C and δ¹⁸O carbonate and cellulose stable isotope analyses. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 17, pp. 3580–3588. <https://doi.org/10.1002/2016GC006469>
- Ferronsky V.I., Polyakov V.A. (2009). Isotopes of the Earth’s hydrosphere. Moscow: Nauchny Mir, 632 p. (In Russ.)
- Global Monitoring Laboratory. <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/iadv/>
- Golyshev S.I., Ivanov V.G. (1983). Isotopic composition of hydrogen, oxygen, carbon of groundwater in the southeastern part of the West Siberian oil and gas basin. *Geokhimiya*, 7, pp. 1024–1028. (In Russ.)
- Görka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczepak D., Jedrysek M.-O. (2011). Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂. *Environmental Pollution*, 159, pp. 294–301. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.08.027>
- Hitchon B., Billings G.K., Klován J.E. (1971). Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin-III. Factors controlling chemical composition. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, pp. 1321–1349. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(71\)90088-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(71)90088-3)
- Hitchon B., Friedman I. (1969). Geochemistry and origin of formation waters in the western Canada sedimentary basin-I. Stable isotopes of hydrogen and oxygen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 33, pp. 1321–1349. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(69\)90178-1](https://doi.org/10.1016/0016-7037(69)90178-1)
- Hoefs J. (2021). Stable isotope geochemistry. Ninth edition. Springer Nature Switzerland AG, 528 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77692-3>
- Jiang L., Worden R.H., Cai C. (2015). Generation of isotopically and compositionally distinct water during thermochemical sulfate reduction (TSR) in carbonate reservoirs: Triassic Feixianguan Formation, Sichuan Basin, China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 165, pp. 249–262. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.05.033>
- Kontorovich A.E., Bogorodskaya L.I., Golyshev S.I. (1985a). Patterns of fractionation of carbon isotopes in sediments. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 9, pp. 34–42. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Bogorodskaya L.I., Golyshev S.I. (1985b). Distribution of stable carbon isotopes in sediments of different genetic nature. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 7, pp. 3–11. (In Russ.)
- Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Ryzhkova S.V., Shurygin B.N., Vakulenko L.G., Gaideburova E.A., Danilova V.P., Kazanekov V.A., Kim N.S., Kostyreva E.A., Moskvina V.I., Yan P.A. (2013). Jurassic paleogeography of the West Siberian sedimentary basin. *Russ. Geol. Geophys.*, 54(8), pp. 747–779. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.002>
- Kopec B.G., Feng X., Posmentier E.S., Sonder L.J. (2019). Seasonal deuterium excess variations of precipitation at summit, Greenland, and their climatological significance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, pp. 72–91. <https://doi.org/10.1029/2018JD028750>
- Kritsuk L.N., Polyakov V.A. (2005). Isotopic and chemical composition of groundwater and natural waters of Western Siberia. Moscow: Geoinformmark, 52 p. (In Russ.)
- Kruglikov N.M., Nelyubin V.V., Yakovlev O.N. (1985). Hydrogeology of the West Siberian oil and gas megabasin and features of the formation of hydrocarbon deposits. Leningrad: Nedra, 363 p. (In Russ.)
- Kruglikov N.M. (1964). Hydrogeology of the northwestern side of the West Siberian artesian basin. *Tr. VNIIGRI*. Leningrad: Nedra, is. 238, 166 p. (In Russ.)
- Kurchikov A.R., Plavnik A.G. (2009). Clustering of groundwater chemistry data with implications for reservoir appraisal in West Siberia. *Russ. Geol. Geophys.*, 50(11), pp. 943–949. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.10.003>
- Labotka D.M., Panno, S.V., Locke, R.A., Freiburg J.T. (2015). Isotopic and geochemical characterization of fossil brines of the Cambrian Mt. Simon Sandstone and Ironton–Galesville Formation from the Illinois Basin, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 165, pp. 342–360. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2015.06.013>
- Lepokurova O.E. (2012). Geochemistry of the unique fresh alkaline waters of the Chulym. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 365, pp. 181–186. (In Russ.)
- Li W., Lu S., Li J., Wei Y., Zhao S., Zhang P., Wang Z., Li X., Wang J. (2022). Research progress on isotopic fractionation in the process of shale gas/coalbed methane migration. *Petroleum Exploration and Development*, 49(5), pp. 1069–1084. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60333-1](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60333-1)
- Londry K.L., Dawson K.G., Grover H.D., Summons R.E., Bradley A.S. (2008). Stable carbon isotope fractionation between substrates and products

- of *Methanosarcina barkeri*. *Organic Geochemistry*, 39, pp. 608–621. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2008.03.002>
- McNutt R.H., Frape S.K., Dollar P. (1987). A strontium, oxygen and hydrogen isotopic composition of brines, Michigan and Appalachian Basins, Ontario and Michigan. *Applied Geochemistry*, 2, pp. 495–505. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(87\)90004-7](https://doi.org/10.1016/0883-2927(87)90004-7)
- Melnikov V.P., Spesivtsev V.I. (1995). Engineering-geological and geocryological conditions of the shelf of the Barents and Kara seas. Novosibirsk: Nauka, 198 p. (In Russ.)
- Nan H., Rao W., Ma H., Chen J., Li T. (2011). Hydrogen, oxygen, helium and strontium isotopic constraints on the formation of oilfield waters in the western Qaidam Basin, China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 40, pp. 651–660. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2010.10.018>
- Nazarov A.D. (2004). Oil and gas hydrogeochemistry of the southeastern part of the West Siberian oil and gas province. Moscow: Idea-Press, 288 p. (In Russ.)
- Nelson S.T. (2000). A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods. *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, pp. 1044–1046. [https://doi.org/10.1002/1097-0231\(20000630\)14:12<1044::AID-RCM987>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1097-0231(20000630)14:12<1044::AID-RCM987>3.0.CO;2-3)
- Novikov D.A. (2017). Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins. *Petroleum Exploration and Development*, 44(5), pp. 780–788. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(17\)30088-5](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(17)30088-5)
- Novikov D.A. (2018). Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 193(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/193/1/012049>
- Novikov D.A. (2019). The role of elision water exchange in the formation of the Yamalo-Kara depression hydrodynamic field. *Litologiya i poleznyye iskopaemye = Lithology and Minerals*, 3, pp. 248–261. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0024-497X20193248-261>
- Novikov D.A. (2020). Analysis of water-gas system equilibria in jurassic-cretaceous reservoirs (by the example of the Yamal-Kara depression). *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 61(8), pp. 1074–1092. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2019179>
- Novikov D.A. (2020). Hydrogeochemistry of authigenic mineral formation in Upper Jurassic sediments (the Nadym-Taz interfluvial area, Arctic regions of Western Siberia). *Applied Geochemistry*, 122, 104704. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104704>
- Novikov D.A. (2022). Equilibrium modeling of water-gas systems in Jurassic–Cretaceous reservoirs of the Arctic petroleum province, northern West Siberia. *Petroleum Exploration and Development*, 49(2), pp. 363–373. [https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(22\)60030-2](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(22)60030-2)
- Novikov D.A., Borisov E.V. (2021). Prediction of oil and gas occurrence in the jurassic reservoirs of the zone of junction of the Yenisei–Khatanga and West Siberian basins. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 62(2), pp. 216–237. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2020119>
- Novikov D.A., Chernykh A.V., Sadykova Ya.V., Dultsev F.F., Khilko V.A., Yurchik I.I. (2019b). Evolution of hydrogeochemical field of North and Arctic regions of the West Siberian sedimentary basin in the Mesozoic. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*, 330(10), pp. 165–180. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2019/10/2314>
- Novikov D.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V., Khilko V.A., Yurchik I.I., Sukhorukova A.F. (2020a). Hydrogeochemistry of pre-jurassic aquifers in West Siberia. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 61(11), pp. 1561–1576. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2019145>
- Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. (2021c). Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters “Inskie springs” (South-Western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(3), pp. 135–145. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/03/3109
- Novikov D.A., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Yan P.A. (2020b). First isotope-hydrogeochemical data on the natural waters of the south-east slope of the Chekanovsky ridge (Arctic areas of the Siberian platform). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 331(11), pp. 157–167. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/11/2897>
- Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ilyin A.V., Chertovskikh E.O. (2021b). New data on the isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$, δD , $\delta^{18}\text{O}$, $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) of the siberian platform brines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 332(7), pp. 20–33. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/7/3260>
- Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ryzhkova S.V. (2021a). The first data on the isotopic composition of stratal waters of the developed oil fields in Novosibirsk region. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2(33), pp. 59–72. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2021/2/3043>
- Novikov D.A., Shvartsev S.L. (2009). Hydrogeological conditions of the Pre-Yenisei petroleum subprovince. *Russ. Geol. Geophys.*, 50(10), pp. 873–883. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.09.005>
- Novikov D.A., Sukhorukova A.F. (2015). Hydrogeology of the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(10), pp. 8703–8719. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1832-5>
- Novikov D.A., Vakulenko L.G., Yan P.A. (2019a). Lateral zoning of groundwater chemistry and authigenic mineralogy in the oxfordian regional reservoir of the Nadym–Taz interfluvial. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 60(6), pp. 843–859. (In Russ.) <https://doi.org/10.15372/GiG2019041>
- Pohlman J.W., Ruppel C., Hutchinson D.R., Downer R., Coffin R.B. (2008). Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico. *Marine and Petroleum Geology*, 25, pp. 942–951. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2008.01.016>
- Polyakov V.A., Dubinchuk V.T., Golubkova E.V., Lgotin V.A., Makushin Yu.V., Makarova K.M. (2008). Isotope studies of groundwater at the Tomsk test site. *Razvedka i ohrana nedr*, 29(11), pp. 47–52. (In Russ.)
- Pyryaev A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A. (2022). Stable isotopes as a tool to check the boundaries of closed ecosystems, by the example of the Vitim river basin. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 333(5), pp. 148–157. (In Russ.) <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/5/3483>
- Reference Products for Environment and Trade. <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx>
- Roston B.J., Holmden C. (2000). Fingerprinting formation-waters using stable isotopes, Midale Area, Williston Basin, Canada. *Journal of Geochemical Exploration*, 69–70, pp. 219–223. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(00\)00024-8](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(00)00024-8)
- Schlegel M.E., McIntosh J.C., Bates B.L., Kirk M.F., Martini A.M. (2011). Comparison of fluid geochemistry and microbiology of multiple organic-rich reservoirs in the Illinois Basin, USA: Evidence for controls on methanogenesis and microbial transport. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, pp. 1903–1919. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.01.016>
- Schlegel M.E., Zhou Z., McIntosh J.C., Ballentine C.J., Person M.A. (2011). Constraining the timing of microbial methane generation in an organic-rich shale using noble gases, Illinois Basin, USA. *Chemical Geology*, 287, pp. 27–40. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.04.019>
- Shvartsev S.L. (1991). Interaction of water with aluminosilicate rocks. *Review. Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 12, pp. 16–50. (In Russ.)
- Shvartsev S.L. (1992). On the ratio of compositions of underground waters and rocks. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 8, pp. 16–50. (In Russ.)
- Shvartsev S.L. (2008). Interaction in the water-rock system as a new basis for the development of hydrogeology. *Russ. J. of Pac. Geol.*, 2, pp. 465–475. <https://doi.org/10.1134/S1819714008060018>
- Shvartsev S.L., Novikov D.A. (2004). The nature of the vertical hydrogeochemical zonality of oil and gas deposits (on the example of the Nadym-Taz interfluvial, Western Siberia). *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 45(8), pp. 1008–1020. (In Russ.)
- Stavitsky B.P., Kurchikov A.R., Kontorovich A.E., Plavnik A.G. (2004). Hydrochemical zoning of the Jurassic and Cretaceous deposits of the West Siberian basin. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 45(7), pp. 826–832. (In Russ.)
- Strapoć D., Mastalerz M., Schimmelmann A., Drobnik A., Hedges S. (2008). Variability of geochemical properties in a microbially dominated coalbed gas system from the eastern margin of the Illinois Basin, USA. *International Journal of Coal Geology*, 76, pp. 98–110. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2008.02.002>
- Streletskaia I.D., Leibman M.O. (2002). Cryochemochemical relationship between massive ice, cryopegs and enclosing deposits of the central Yamal. *Criosfera Zemli*, 6(3), pp. 15–24. (In Russ.)
- Stueber A.M., Walter L.M. (1991). Origin and chemical evolution of formation waters from Silurian-Devonian strata in the Illinois basin, USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55, pp. 309–325. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90420-A](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90420-A)
- Stueber A.M., Walter L.M., Huston T.J., Pushkar P. (1993). Formation waters from Mississippian-Pennsylvanian reservoirs, Illinois basin, USA: Chemical and isotopic constraints on evolution and migration. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57, pp. 763–784. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90167-U](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90167-U)

- Trubetskov D.I., Rozhnev A.G. (2001). Linear oscillations and waves. Moscow: Publ. House of Physical and Mathematical Literature, 416 p. (In Russ.)
- Vetshtein V.E., Artemchuk V.G., Nazarov A.D. (1981). Peculiarities of Formation and Oil and Gas Prospecting Significance of the Isotope Composition of Formation Waters and Pore Solutions. *Geologiya nefi i gaza = Russian Oil and Gas Geology*, 6, pp. 35–43. (In Russ.)
- Vyshemirsky V.S., Kontorovich A.E. (1997). The cyclic nature of oil accumulation in the history of the Earth. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 38(5), pp. 907–918. (In Russ.)
- Vyshemirsky V.S., Kontorovich A.E. (1998). The evolution of the formation of hydrocarbon gases in the history of the Earth. *Geologiya i geofizika = Russian Geology and Geophysics*, 39(10), pp. 1392–1401. (In Russ.)
- Wilson T.P., Long D.T. (1993). Geochemistry and isotope chemistry of Ca-Na-Cl brines in Silurian strata, Michigan Basin, U.S.A. *Applied Geochemistry*, 8, pp. 507–524. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(93\)90079-V](https://doi.org/10.1016/0883-2927(93)90079-V)
- Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. (1995). Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO₂. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(1), pp. 107–114. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)91550-D](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)91550-D)
- Zhu W., Wang T., Xie Z., Xie B., Liu K. (2015). Giant gas discovery in the Precambrian deeply buried reservoirs in the Sichuan Basin, China: Implications for gas exploration in old cratonic basins. *Precambrian Research*, 262, pp. 45–66. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.02.023>

About the Authors

Dmitry A. Novikov – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Head of the Laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Associate Professor, Novosibirsk State University
3 Ak.Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation. e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru

Aleksandr N. Pyrayev – Cand. Sci. (Chemistry), Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Senior Lecturer, Novosibirsk State University
3 Ak.Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Anastasia A. Maksimova – Junior Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; Assistant of the Department, Novosibirsk State University
3 Ak.Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Fedor F. Dultsev – Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
3 Ak.Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

Anatoly V. Chernykh – Researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
3 Ak.Koptyug ave., Novosibirsk, 630090, Russian Federation

*Manuscript received 3 March 2023;
Accepted 13 September 2023;
Published 30 December 2023*