

## **УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ВЕРХНЕЮРСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНЫХ РАЙОНОВ ЗАУРАЛЬСКОЙ МЕГАМОНОКЛИЗЫ**

### *Дмитрий Анатольевич Новиков*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3/6, к.г.-м.н., зав. лабораторией, e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии

### *Александр Николаевич Пыряев*

Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3, к.х.н., научный сотрудник, e-mail: pyrayev@igm.nsc.ru; Новосибирский государственный университет, 630090, Россия, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2, ассистент кафедры химической и биологической физики

### *Федор Федорович Дульцев*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3/6, научный сотрудник, e-mail: DultsevFF@ipgg.sbras.ru

### *Анатолий Витальевич Черных*

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3/6, научный сотрудник, e-mail: ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

### *Светлана Викторовна Бакустина*

ООО «НОВАТЭК НТЦ», 625026, Россия, г. Тюмень, ул. 50 Лет ВЛКСМ, 53, начальник отдела исследования пластовых флюидов, e-mail: SVBakustina@novatek.ru

### *Дмитрий Владимирович Ульянов*

ООО «НОВАТЭК НТЦ», 625026, Россия, г. Тюмень, ул. 50 Лет ВЛКСМ, 53, Главный специалист отдела исследований пластовых флюидов, e-mail: D.Ulyanov@novatek.ru

В работе представлены первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований пластовых вод верхнеюрских отложений центральных районов Зауральской мегамоноклизы. Показано, что большинство вод имеет узкое распределение изотопов кислорода и водорода ( $\delta D$  от -103,2 до -85,6 ‰ и  $\delta^{18}O$  от -15,4 до -12,9 ‰). Часть из них имеет ярко выраженные экскурсы по изотопному составу, что говорит о различии в их генезисе: от конденсатогенного до смешанного с древними инфильтрогенными. Изотопный состав углерода водорастворенной углекислоты ( $\delta^{13}C_{DIC}$  от -41,6 до -16,3 ‰) указывает на ее биогенное происхождение и возможность межпластовых перетоков из вышележающих горизонтов.

**Ключевые слова:** гидрогеохимия, стабильные изотопы, генезис подземных вод, Зауральская мегамоноклиза, Западная Сибирь, Арктика

## FORMATION CONDITIONS OF GROUNDWATER OF THE UPPER JURASSIC OF THE CENTRAL REGIONS OF THE ZAURAL MEGAMONOCLYSIS

*Dmitry A. Novikov*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3/6, Akademika Koptyuga Ave., PhD, head of the laboratory, e-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, 2, Pirogova st., associate professor

*Aleksandr N. Pyrayev*

Sobolev Institute of Geology and Mineralogy SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD, Researcher, e-mail: pyrayev@igm.nsc.ru; Novosibirsk State University, 630090, Russia, Novosibirsk, Pirogova st. 2, assistant

*Fedor F. Dultsev*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3/6, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, e-mail: DultsevFF@ipgg.sbras.ru

*Anatoliy V. Chernykh*

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3/6, Akademika Koptyuga Ave., Researcher, e-mail: ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

*Svetlana V. Bakustina*

LLC "NOVATEK STC", 625026, Russia, Tyumen, 53, 50 Let VLKSM st., Head of Reservoir Fluids Research Department, e-mail: SVBakustina@novatek.ru

*Dmitry V. Ulyanov*

LLC "NOVATEK STC", 625026, Russia, Tyumen, 53, 50 Let VLKSM st., Chief Specialist of Reservoir Fluid Research Department, e-mail: D.Ulyanov@novatek.ru

The article presents the first results of complex isotope-hydrogeochemical studies of reservoir waters of the Upper Jurassic deposits of the central regions of the Zaural megamonoclysis. It was shown that most waters have a narrow distribution of oxygen and hydrogen isotopes ( $\delta D$  from -103.2 to -85.6 ‰ and  $\delta^{18}O$  from -15.4 to -12.9 ‰). Some of them have pronounced excursions on the isotopic composition, which indicates a difference in their genesis: from condensate to mixed with ancient infiltrogenic. The isotopic composition of carbon of water-dissolved carbon dioxide ( $\delta^{13}C_{DIC}$  from -41.6 to -16.3 ‰) indicates its biogenic origin and the possibility of interstratal flows from overlying horizons.

**Keywords:** hydrogeochemistry, stable isotopes, genesis of groundwater, Zaural megamonoclysis, Western Siberia, Arctic

Геохимия подземных вод арктического сектора Западной Сибири активно изучается на протяжении последних 50 лет в связи с широкомасштабными поисковыми работами на нефть и газ [1-4]. Несмотря на это, до последнего времени в научной литературе отсутствуют данные по изотопно-геохимическим исследованиям подземных вод нефтегазоносных отложений. В последние годы в лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири ИНГГ СО РАН ведутся широкомасштабные работы, направленные на получение этой крайне важной в теоретическом и прикладном значении информации.

Являясь уникальным материалом в рамках каждого месторождения углеводородов (УВ), изотопный состав таких вод и водорастворенного углерода является ключевым фактором в фундаментальных гидрогеохимических исследованиях, поскольку позволяет реконструировать процессы захоронения вод [5], условий их нахождения в водоносном горизонте, взаимодействия с окружением [6], что в свою очередь представляет ценность для нефтегазопоисковых исследований и разработки залежей УВ.

В настоящей работе представлены первые данные по комплексным изотопно-гидрогеохимическим исследованиям 7 проб подземных вод пласта П, вогулкинской толщи, абалакской свиты одного из газовых месторождений, расположенных в Приуральской НГО Западно-Сибирской НГП (рис. 1). Лабораторное изучение химического состава методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в ПНИЛ гидрогеохимии ИШПР ТПУ. Изотопные исследования ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{13}\text{C}$ ) выполнялись в Аналитическом центре МИИ ИГМ СО РАН с помощью изотопного масс-спектрометра FinniganTM MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II. Методики определения  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{13}\text{C}$  описаны в литературе [7-10]. Все измерения проводились относительно материалов сравнения Международного агентства по атомной энергии (IAEA): NBS-18 и NBS-19 – при измерениях  $\delta^{13}\text{C}$ ; VSMOW2, SLAP2 и GISP – при измерениях  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ . Результаты представлены относительно стандарта VPDB для углерода и VSMOW – для кислорода и водорода. Погрешность измерений не превышала 0,2 ‰ при определениях  $\delta^{13}\text{C}$ , 0,3 ‰ – для  $\delta^{18}\text{O}$  и 2 ‰ – для  $\delta\text{D}$ .

Изученная коллекция проб пластовых вод отличается весьма пестрым составом, что характерно для вод конденсатогенного типа. По классификации С.А. Щукарева они относятся к Cl Na, Cl Ca, Cl- $\text{HCO}_3$  Ca-Na-Mg,  $\text{HCO}_3$ -Cl Na-Ca,  $\text{HCO}_3$ -Cl Ca-Na и  $\text{HCO}_3$  Ca типам (рис. 1).

Накопление в растворе основных солеобразующих анионов и катионов контролируется химическим типом воды и находится в прямой зависимости от величины ее общей минерализации, которая варьирует от 201 до 2781 мг/дм<sup>3</sup>. Величина pH изменяется от 6,4 до 7,2, составляя в среднем 6,9. Суммарное содержание диссоциатов водорастворенной углекислоты (DIC – dissolved inorganic carbon) в водах по сумме  $\text{CO}_{2\text{водн}}$  и  $\text{HCO}_3^-$  (содержание  $\text{CO}_3^{2-}$  - не определялось) составляло от 2,0 до 3,5 ммоль/л при соотношении  $\text{CO}_{2\text{водн}}/\text{HCO}_3^-$  от 0 до 0,34. В микрокомпонентном составе наиболее высокие содержания (мг/дм<sup>3</sup>) установлены у: Fe (до 37,2), Ba (до 16,9), I (до 13,8), Br (до 7,5), стронция (до 5,8), Si (до 5,6), Li (до 3,2) и B (до 2,9). С ростом величины общей минерализации в растворе накапливаются в следующих концентрациях тяжелые металлы (мкг/дм<sup>3</sup>): Zn (до 558), Ni (до 105), Pb (до 67,6), Cu (до 43), Co (до 8,7), Mo (до 2,4), Cd (до 0,8) и Sn (до 0,3).

Изучив распределение широкого спектра элементов в исследуемых пробах был выбран следующий набор коэффициентов: rNa/rCl, Cl/Br, B/Br и  $\text{HCO}_3/\text{Cl}$  (рис. 1 в-е). Проанализировав ранее проведенные исследования по палеогидрогеохимическим реконструкциям изучаемого комплекса отложений [11-12] можно

с уверенностью разделить пробы из коллекции на две группы. Первая группа - конденсатогенный тип маломинерализованных вод ( $201-1135 \text{ мг/дм}^3$ ) характеризуется средними отношениями  $\text{Ca/Na}=2,7$ ;  $\text{Ca/Mg}=8,4$ ;  $\text{Ca/Si}=42,4$ ;  $\text{Mg/Si}=4,6$ ;  $\text{Na/Si}=13,7$ ;  $\text{Si/Na}=0,1$ . Значения генетических коэффициентов для этой группы составляют:  $r\text{Na/rCl}$  – от 0,11 до 2,17;  $\text{Cl/Br}$  – от 196 до 2146;  $\text{V/Br}$  – от 0,41 до 7,69 и  $\text{HCO}_3/\text{Cl}$  от 0,21 до 10,91. Содержания Th ( $\text{мкг/дм}^3$ ) варьируют от 0,007 до 0,109, U – от 0,002 до 0,049, Th/U отношение в среднем составляет 1,75. Вторая группа относится к смеси конденсатогенных и пластовых вод, сформированных в условиях инфильтрации (древние инфильтрогенные воды) и имеет ряд отличий. Величина их общей минерализации достигает  $2781 \text{ мг/дм}^3$ , а значения коэффициентов составляют:  $\text{Ca/Na}=0,08$ ;  $\text{Ca/Mg}=2,1$ ;  $\text{Ca/Si}=30,1$ ;  $\text{Mg/Si}=14,6$ ;  $\text{Na/Si}=349,6$ ;  $\text{Si/Na}=0,003$ . Величины генетических коэффициентов указывают на седиментогенно-инфильтрогенный генезис:  $r\text{Na/rCl}$  – 0,89;  $\text{Cl/Br}$  – 210;  $\text{V/Br}$  – 0,39 и  $\text{HCO}_3/\text{Cl}$  – 0,09. Содержания Th ( $\text{мкг/дм}^3$ ) – 0,01, U – 0,0005, Th/U отношение достигает 22,95. При этом средние содержания некоторых элементов среди вод первой и второй групп отличаются на математический порядок ( $\text{мг/дм}^3$ ): по I – 0,09 и 13,8; Ba – 1,0 и 16,9; Br – 0,22 и 7,54; и Sr – 0,39 и 5,75 соответственно. Не выявлено концентрирования в растворе  $\text{NH}_4$ , P, Si, Li, Ti, Mn, Fe, Cu и других.

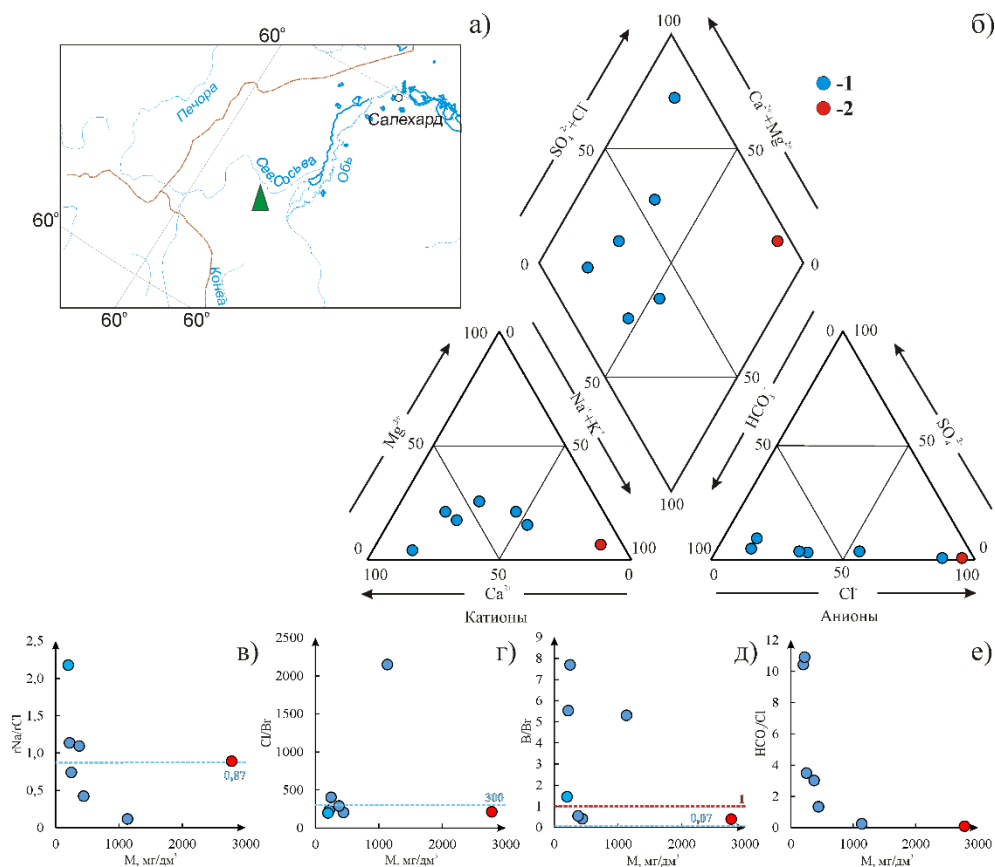


Рис. 1 Карта района исследований (а); диаграмма Пайпера (б); типизация подземных вод по коэффициентам  $r\text{Na/rCl}$  (в),  $\text{Cl/Br}$  (г),  $\text{V/Br}$  (д) и  $\text{HCO}_3/\text{Cl}$  (е):

1 – конденсатогенные воды; 2 – преимущественно конденсатогенные воды; 3 – смесь конденсатогенных вод с древними инфильтрогенными.

Изотопные характеристики изученных вод и DIC представлены в таблице 1. Значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  вод варьируют в диапазоне от -103,2 до -85,6 и от -15,4 до -12,9 ‰. Большая часть проб имеет узкое распределение изотопов кислорода и водорода, образуя группу точек (рис. 2 а). Отдельно выделяются две точки, соответствующие пробам с наименьшей и наибольшей степенью минерализации. Все полученные пары значений  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  располагаются выше как глобальной линии метеорных вод (GMWL [13]), так и локальных метеорных линий (LMWL) для ближайших метеорологических станций – Печора и Ханты-Мансийск [14].

Таблица 1

Характеристика стабильных изотопов Н, О и С для вод верхнеюрских отложений центральных районов Зауральской мегамоноклизы

№ пробы	М, мг/дм <sup>3</sup>	pH	$\delta^{18}O$ , ‰	$\delta D$ , ‰	$\delta^{13}C_{DIC}$ , ‰	Содержание DIC, моль/л
1	201	7,18	-15,4	-103,2	-41,6	2,0
2	220	7,02	-14,3	-95,5	-25,0	2,4
3	249	6,95	-14,4	-95,5	-23,2	2,2
4	374	7,2	-14,4	-94,6	-16,3	3,5
5	443	6,86	-14,2	-94,0	-21,7	3,4
6	1135	6,42	-14,4	-95,5	-22,1	3,1
7	2781	7,02	-12,9	-85,6	-17,3	2,8

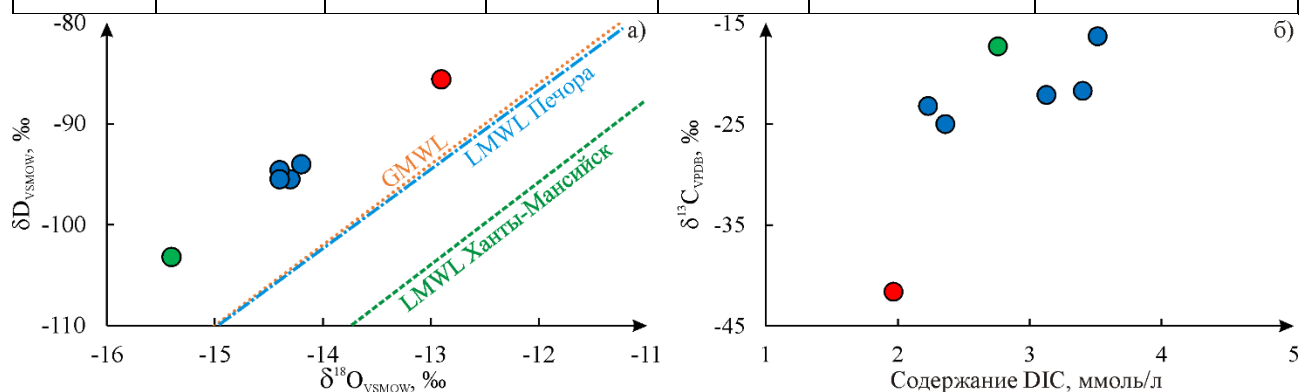


Рис. 2: Изотопные отношения кислорода и водорода вод верхнеюрских отложений центральных районов Зауральской мегамоноклизы относительно GMWL [13] и локальных метеорных линий Печоры и Ханты-Мансийска [14] (а) и изотопно-концентрационная характеристика DIC изученных вод (б).

Условные обозначения см. на рис. 1.

Изотопный состав углерода DIC в исследованных водах различен (рис. 2 б). Для пробы наименее минерализованной воды значение  $\delta^{13}C_{DIC}$  - изотопно наиболее легкое (-41,6 ‰). Эта проба отличается самым низким содержанием хлорид-иона. Переход к пробам с большей минерализацией и большим содержанием ионов  $Na^+$  и  $Cl^-$  приводит к резкому утяжелению изотопного состава водорастворенного углерода до значений от -25,0 до -16,3 ‰.

Полученные значения  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  исследованных вод существенно отличаются от изотопных характеристик современных атмосферных осадков. При этом величина дейтериевого эксцесса  $d$  [15] в изученных водах, рассчитанного как  $d = \delta D - 8 \cdot \delta^{18}O$ , составляла от 18,9 до 20,0 ‰. Такое отклонение точек от GMWL свидетельствует об условиях формирования этой влаги в условиях, очень сильно отличающихся от равновесных (Релеевское фракционирование влаги), при повышенном уровне испарения влаги [16], которое контролируется в первую очередь относительной влажностью и температурой поверхности, с которой происходит испарение [17]. Сравнение полученных данных по изотопному составу кислорода и водорода с современными локальными метеорными линиями показывает, что исследованные воды были сформированы в условиях, сильно отличающихся от современных, то есть они могут, в первом приближении, быть отнесены к древним инфильтрационным и отражают условия древнего климата. В нашем случае большинство вод имеет относительно невысокую степень минерализации в сравнении с аналогичными объектами [1-2, 4, 18-20], что предполагает их первично конденсатогенный генезис.

По мере роста общей минерализации вод изотопный состав кислорода и водорода утяжеляется. Видно, что проба 7 имеет наиболее тяжелый изотопный состав, в то время как проба 1 – наиболее изотопно легкая (см. табл. 1). Остальные точки с высоким коэффициентом корреляции ( $R^2 = 0.99$ ) ложатся на прямую соединяющую пары значений  $\delta D$ - $\delta^{18}O$  для проб 1 и 7. Наблюдается постепенная смена типа вод от гидрокарбонатных натриево-кальциевых к хлоридным натриевым. При этом содержание гидрокарбонат-иона во всех водах остается на очень близком уровне (120-190 мг/дм<sup>3</sup>). Этот прирост концентрации ионов хлора и натрия также подтверждает наличие древних инфильтрационных вод, примешиваемых все в больших количествах к исходно конденсатогенным.

Вопрос точного возраста изученных вод на текущий момент остается открытым. Тем не менее, определенную информацию об условиях захоронения вод, их взаимодействии с окружением можно подчерпнуть на основании данных по изотопному составу водорастворенного углерода.

Значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  во всех изученных водах - достаточно легкие (ниже -16,3 ‰), что предполагает органигенное и/или биогенное происхождение DIC во всех изученных пробах. В первом случае источником углекислоты служит термодегградация и окисление органических веществ (ОВ) [5], захороненных вместе с осадочными породами и водой, что должно приводить к высвобождению изотопно-легкой углекислоты. Во втором случае синтез водорастворенного CO<sub>2</sub> происходит в результате жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов [6]. Очевидно, что для окисления ОВ необходима доступность кислорода, что представляется маловероятным для подземных вод на больших глубинах с умеренными температурными условиями (до 100 °С). Термодегградация органического ОВ в существенной степени начинается при достаточно высоких температурах (более 105 °С), о чем свидетельствуют результаты работы, посвященной термическому распаду органических поллютантов [21]. В нашем случае температура исследованных вод составляет 45-50 °С, что явно ниже указанной пороговой.

Соответственно, полученный изотопный состав углерода в DIC изученных вод является либо следствием древних высокотермических событий, при которых произошел распад ОВ, приведший к высвобождению изотопно-легкой водорастворенной углекислоты, либо результатом бактериальной активности. Более того, второй фактор неизбежно накладывается на первый ввиду давности гипотетического высокотермического события. Следовательно, основным источником изотопно-легкого водорастворенного углерода следует рассматривать бактериальную анаэробную переработку ОВ, превалирующими механизмами которой принято считать метаногенез и сульфатредукцию (SMT-sulfate-methane transition) [5-6]. Метаногенез может развиваться по нескольким путям питания, но наиболее распространенным для морских и подобных им систем принято считать карбонат-редукционный, при котором происходит восстановление предпочтительно обедненной углеродом  $^{13}\text{C}$  водорастворенной углекислоты водородом до метана [22], при этом остающийся DIC насыщается тяжелым изотопом. В свою очередь, SMT [Ошибка! Источник ссылки не найден.] приводит к преобразованию метана в гидрокарбонат-ион, наследующий изотопно-легкий состав углерода [22]. Для проявления механизма SMT с одной стороны требуется достаточно высокое содержание сульфатов (более 0,2 ммоль) и метана (как прекурсора) в системе [Ошибка! Источник ссылки не найден.], с другой – при анаэробном окислении метана по указанному механизму содержание этих компонентов в системе снижается: сульфатов - за счет их перехода в сульфидную форму, метана – за счет его окисления до гидрокарбоната [22].

В нашем случае для всех исследованных проб содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  составляло от 0,05 до 0,11 ммоль, что вполне может соответствовать конкурентному проявлению двух перечисленных процессов анаэробного преобразования органического вещества [22]. Из полученных значений  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  можно сделать предположение, что превалирующим механизмом преобразования ОВ для большинства бактериальных систем изученных вод выступает метаногенез, при котором нормальными значениями относительной концентрации углерода  $^{13}\text{C}$  в DIC принято считать значения от -20 до 0 ‰ [6]. В свою очередь, для вод, в которых значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  имеют более отрицательные значения (-23 ‰ и ниже) наблюдается большее проявление SMT-механизма. При этом интересно отметить, что смена механизма преобразования органического вещества согласуется с уровнем минерализации вод и изотопным составом водорода и кислорода вод, что в очередной раз подтверждает предполагаемое попадание в систему древних инфильтрационных вод.

Таким образом, результаты изотопных исследований кислорода и водорода вод верхнеюрских отложений центральных районов Зауральской мегамоноклизы в комплексе с анализом их химических особенностей показали их древнее происхождение. Генезис вод носит смешанный характер с постепенным переходом от выраженного конденсатогенного к древним инфильтрационным. Изотопный состав водорастворенного углерода в водах многообразен и указывает на биогенное (бактериальное) происхождение DIC в результате комплекса конку-

рирующих процессов переработки органического вещества: метаногенеза и сульфатредукции.

*Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025; РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-70074 «Ресурсы Арктики»; РФФИ и Правительства Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научного проекта № 19-45-890005.*

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шварцев С.Л., Новиков Д.А. Природа вертикальной гидрогеохимической зональности нефтегазоносных отложений (на примере Надым-Тазовского междуречья, Западная Сибирь) // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 8. – С. 1008-1020.
2. Ставицкий Б.П., Курчиков А.Р., Конторович А.Э., Плавник А.Г. Гидрохимическая зональность юрских и меловых отложений Западно-Сибирского бассейна // Геология и геофизика. – 2004. – Т. 45. – № 7. – С. 826-832.
3. Конторович А.Э. Пути освоения ресурсов нефти и газа Российского сектора Арктики // Вестник РАН. – 2015. – Т. 85. – № 5-6. – С. 420-430.
4. Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // Petroleum Exploration and Development. – 2017. – V. 44. – № 5. – P. 780-788.
5. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. – Москва: Научный мир, 2009. – 632 с.
6. Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // Chemical Geology. – 1999. – V. 161. – P. 291-314.
7. Epstein S., Mayeda T. Variation of O18 content of waters from natural sources // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1953. – V. 4 (5). – P. 213-224.
8. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods Rapid Communications in Mass Spectrometry // Rapid Commun Mass Spectrom. – 2000. – V. 14. – P. 1044-1046.
9. Evans M.J., Derry L.A., France-Lanord C. Degassing of metamorphic carbon dioxide from the Nepal Himalaya // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. – 2008. – V. 9 (4). – P. 1-18.
10. Kopec B.G., Feng X., Posmentier E.S., Sonder L. J. Seasonal Deuterium Excess Variations of Precipitation at Summit, Greenland, and their Climatological Significance // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2019. – V. 124. – P. 72– 91.
11. Новиков Д.А., Черных А.В., Садыкова Я.В., Дульцев Ф.Ф., Хилько В.А., Юрчик И.И. Эволюция гидрогеохимического поля северных и арктических районов Западно-Сибирского осадочного бассейна в мезозое // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 165-180.
12. 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. Палеогеография Западно-Сибирского осадочного бассейна в юрском периоде // Геология и геофизика. – 2013. – Т. 54. – № 8. – С. 972-1012.
13. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V.133 (3465). – P. 1702–1703.
14. International Atomic Energy Agency (IAEA). [Электронный ресурс] URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>.
15. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – Vol. 16. – № 4. – P. 436–468.
16. Gat J. R., Matsui E. Atmospheric water balance in the Amazon basin: An isotopic evapotranspiration model // Journal of Geophysical Research. – 1991. – V. 96. – №7. – P. 13179-13188.



17. Benetti M., Reverdin G., Pierre C., Merlivat L., Risi C., Steen-Larsen H.C., Vimeux F. Deuterium excess in marine water vapor: Dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2014. – V. 119. – P. 584-593.
18. Novikov D.A., Sukhorukova A.F. Hydrogeology of the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin // *Arabian Journal of Geosciences*. – 2015. – V. 8. – № 10. – P. 8703-8719.
19. Novikov D.A. Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2018. – V. 193. – №. 012049.
20. Новиков Д.А., Пыржев А.Н., Черных А.В., Дульцев Ф.Ф., Рыжкова С.В. Первые данные по изотопному составу пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 59-72.
21. Font R., Gomez-Rico M.F., Fullana A. Thermal degradation of organic pollutants in sewage sludge // *Water Pollution IX*. – 2008. – V. 111. – P. 405-414.
22. Pohlman J.W., Ruppel C., Hutchinson D.R., Downer R., Coffin R.B. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico // *Marine and Petroleum Geology*. – 2008. – V. 25. – P. 942-951.
23. Jørgensen B.B., Beulig F., Egger M., Petro C., Scholze C., Røy H. Organoclastic sulfate reduction in the sulfate-methane transition of marine sediments // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – V. – 254. – P. 231-245.

## REFERENCES

24. Shvarcev S.L., Novikov D.A. Priroda vertikal'noj gidrogeohimicheskoy zonal'nosti neftegazonosnyh otlozhenij (na primere Nadym-Tazovskogo mezhdurech'ya, Zapadnaya Sibir') // *Geologiya i geofizika*. – 2004. – Т. 45. – № 8. – С. 1008-1020.
25. Stavickij B.P., Kurchikov A.R., Kontorovich A.E., Plavnik A.G. Hidrohimicheskaya zonal'nost' yurskih i melovyh otlozhenij Zapadno-Sibirskogo bassejna // *Geologiya i geofizika*. – 2004. – Т. 45. – № 7. – С. 826-832.
26. Kontorovich A.E. Puti osvoeniya resursov nefti i gaza Rossijskogo sektora Arktiki // *Vestnik RAN*. – 2015. – Т. 85. – № 5-6. – С. 420-430
- Novikov D.A. Hydrogeochemistry of the Arctic areas of Siberian petroleum basins // *Petroleum Exploration and Development*. – 2017. – V. 44. – № 5. – P. 780-788.
27. Ferronskij V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery*. – Moskva: Nauchnyj mir, 2009. – 632 s.
28. Whiticar M.J. Carbon and hydrogen isotope systematics of bacterial formation and oxidation of methane // *Chemical Geology*. – 1999. – V. 161. – P. 291-314.
29. Epstein S., Mayeda T. Variation of O18 content of waters from natural sources // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 1953. – V. 4 (5). – pp. 213-224.
30. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analysed by continuous flow methods *Rapid Communications in Mass Spectrometry* // *Rapid Commun Mass Spectrom*. – 2000. – V. 14. – P. 1044-1046.
31. Evans M.J., Derry L.A., France-Lanord C. Degassing of metamorphic carbon dioxide from the Nepal Himalaya // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. – 2008. – V. 9 (4). – P. 1-18.
32. Kopec B.G., Feng X., Posmentier E.S., Sonder L. J. Seasonal Deuterium Excess Variations of Precipitation at Summit, Greenland, and their Climatological Significance // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2019. – V. 124. – P. 72- 91.
33. Novikov D.A., Chernyh A.V., Sadykova YA.V., Dul'cev F.F., Hil'ko V.A., Yurchik I.I. Evolyuciya gidrogeohimicheskogo polya severnyh i arkticheskikh rajonov Zapadno-Sibirskogo osadochnogo bassejna v mezozoe // *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*. – 2019. – Т. 330. – № 10. – С. 165-180.
34. Kontorovich A.E., Kontorovich V.A., Ryzhkova S.V., Shurygin B.N., Vakulenko L.G., Gajdeburova E.A., Danilova V.P., Kazanenkov V.A., Kim N.S., Kostyreva E.A., Moskvina V.I., Yan

P.A. Paleogeografiya Zapadno-Sibirskogo osadochnogo bassejna v yurskom periode // Geologiya i geofizika. – 2013. – T. 54. – № 8. – S. 972-1012  
Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V.133 (3465). – P. 1702–1703.

35. International Atomic Energy Agency (IAEA). [Электронный ресурс] URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>.

36. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – Vol. 16. – № 4. – P. 436–468.

37. Gat J. R., Matsui E. Atmospheric water balance in the Amazon basin: An isotopic evapotranspiration model // Journal of Geophysical Research. – 1991. – V. 96. – №7. – P. 13179-13188.

38. Benetti M., Reverdin G., Pierre C., Merlivat L., Risi C., Steen-Larsen H.C., Vimeux F. Deuterium excess in marine water vapor: Dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation // Journal of Geophysical Research: Atmospheres. – 2014. – V. 119. – P. 584-593.

39. Novikov D.A., Sukhorukova A.F. Hydrogeology of the northwestern margin of the West Siberian Artesian Basin // Arabian Journal of Geosciences. – 2015. – V. 8. – № 10. – P. 8703-8719.

40. Novikov D.A. Genetic classification of subsurface waters and brines of Arctic regions of Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – V. 193. – №. 012049.

41. Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernyh A.V., Dul'cev F.F., Ryzhkova S.V. Pervye dannye po izotopnomu sostavu plastovyh vod razrabatyvaemyh neftyanyh mestorozhdenij Novosibirskoj oblasti // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov. – 2021. – T. 332. – № 2. – S. 59-72  
Font R., Gomez-Rico M.F., Fullana A. Thermal degradation of organic pollutants in sewage sludge // Water Pollution IX. – 2008. – V. 111. – P. 405-414.

42. Pohlman J.W., Ruppel C., Hutchinson D.R., Downer R., Coffin R.B. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico // Marine and Petroleum Geology. – 2008. – V. 25. – P. 942–951.

43. Jørgensen B.B., Beulig F., Egger M., Petro C., Scholze C., Røy H. Organoclastic sulfate reduction in the sulfate-methane transition of marine sediments // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – V. – 254. – P. 231-245.

© Д. А. Новиков, А. Н. Пыряев, Ф. Ф. Дульцев,  
А. В. Черных, С. В. Бакустина, Д. В. Ульянов, 2021