

УДК 544.02(282.256.615)

## ИЗОТОПНО-КОНЦЕНТРАЦИОННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРИРОДНЫХ ВОД НОВОСИБИРСКОЙ ОБЛАСТИ КАК ИНСТРУМЕНТ КОНТРОЛЯ ИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ОКРУЖЕНИЕМ

**Пыряев Александр Николаевич**<sup>1,2</sup>,  
pyrayev@igm.nsc.ru

**Новиков Дмитрий Анатольевич**<sup>3,2</sup>,  
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

**Максимова Анастасия Алексеевна**<sup>3,2</sup>,  
rock.nastaya64@gmail.com

**Дульцев Федор Федорович**<sup>3</sup>,  
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

**Деркачев Антон Сергеевич**<sup>2</sup>,  
a.derkachev@g.nsu.ru

**Черных Анатолий Витальевич**<sup>3</sup>,  
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

**Хвощевская Альбина Анатольевна**<sup>4</sup>,  
unprc\_voda@mail.ru

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3.

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1.

<sup>3</sup> Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,  
Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3/6.

<sup>4</sup> Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

**Актуальность:** необходимость создания методики различения близких по изотопному составу кислорода и водорода водоемов на основании их изотопно-концентрационных характеристик.

**Цель:** сопоставить изотопно-концентрационные характеристики отдельных водоемов, выявить их применимость для оценки различий водоемов, имеющих близкие изотопные составы кислорода и водорода.

**Методы.** Лабораторное изучение химического состава природных вод методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой проводилось в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Определение комплекса величин  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C_{DIC}$  вод и растворенного неорганического углерода проводилось в центре коллективного пользования Института геологии и минералогии СО РАН с помощью прибора Isotope Ratio Mass Spectrometer Finnigan<sup>TM</sup> MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II.

**Результаты.** Представлены данные изотопных исследований природных вод с. Скала Новосибирской области (Россия). Изотопный состав кислорода и водорода указывает на метеорно-инфильтрационное происхождение всех изученных вод. Большинство изученных объектов имеют изотопные характеристики, сопоставимые с другими объектами области: от  $-142$  до  $-114$  ‰ для  $\delta D$ , от  $-18,5$  до  $-11,6$  ‰ для  $\delta^{18}O$ . Неординарный изотопный состав кислорода и водорода зафиксирован для пробы подземной воды, отобранной в с. Скала: легкий изотопный состав кислорода и водорода вместе с повышенными значениями дейтериевого эксцесса. По изотопно-концентрационной характеристике растворенного неорганического углерода изученные воды разделены на три группы: дренажные воды карьеров с низким содержанием растворенного неорганического углерода тяжелого изотопного состава (значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  от  $-5,3$  до  $-4,4$  ‰), речные воды с умеренным содержанием растворенного неорганического углерода и широкой вариацией изотопного состава углерода (значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  от  $-13,3$  до  $-6,8$  ‰), подземные воды с максимальным содержанием растворенного неорганического углерода и самым легким из представленных изотопным составом углерода (значения  $\delta^{13}C_{DIC}$  от  $-13,3$  до  $-9,2$  ‰). Вид характеристики определяется индивидуальными условиями накопления DIC и изотопного обмена вод с окружающей средой.

**Ключевые слова:**

стабильные изотопы водорода, кислорода, водорастворенного углерода,  
речные воды, дренажные воды карьеров и подземные воды, изотопно-концентрационная характеристика.

## Введение

Состав стабильных изотопов вод ( $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ) уже несколько десятилетий является важным инструментом в решении вопросов генезиса вод [1, 2], дифференциации источников вод [3], реконструкций истории водоема [4], экологических приложений [5] и др. Формирование изотопного состава природных вод определяется серией процессов, среди которых основная роль отводится условиям образования влаги [6] и выпадения атмосферных осадков [7]. Окружение каждого источника также способно оказывать влияние на изотопную характеристику вод: их испарение и изотопный обмен с кислородсодержащими породами [8, 9]. Тем не менее в ряде случаев идентифицировать отдельные водоемы/водоносные горизонты из-за близости изотопного состава кислорода и водорода в них не представляется возможным без привлечения дополнительных методов. Одним из таких инструментов может служить изотопно-концентрационная характеристика (ИКХ) водорастворенного углерода (DIC – Dissolved inorganic carbon), объединяющая показатели концентрации отдельных ионов с изотопным составом DIC. В частности, в работе [10] было показано, что ИКХ служит высокочувствительным инструментом, позволяющим выделить границы условно замкнутых экосистем. В настоящей работе мы задались вопросом о применимости ИКХ в вопросе индивидуализации (оценки различий) отдельных водоемов, имеющих близкие условия формирования и, соответственно, схожие показатели изотопного состава кислорода и водорода.

Изучаемая территория расположена в пределах Кольванского гранитоидного массива, который находится на левобережье р. Обь, в районе рабочего поселка Кольвань. Он представляет собой штокообразное тело, вытянутое в меридиональном направлении [11]. Границы извилистые, контакты полого падают в сторону вмещающих пород.

В связи с распространением гранитоидных массивов в Новосибирской области на территории изучения во время полевых работ была установлена высокая активность радона (до  $673 \text{ Бк/дм}^3$ ) в объектах села Скала, расположенного в левобережной части реки Оби в Новосибирской области. В качестве объектов сравнения также были привлечены данные по ранее исследованным объектам Новосибирской области, часть из которых находится в черте городской агломерации (рис. 1). Учитывая относительно небольшую протяженность представленного региона, не включающего больших перепадов высот и смены климатических условий, объекты имеют довольно близкие условия формирования, что также должно отразиться на близости изотопных составов водорода и кислорода в них. Соответственно, ИКХ может быть заложена в основу обособления (индивидуализации) конкретных водоемов, то есть для выявления набора изотопно-геохимических характеристик, свойственных каждому отдельно взятому объекту.

## Методы

Отбор, консервацию и транспортировку проб проводили в мае–августе 2022 г. согласно методикам, представленным в работе [10]. Точки отбора проб представлены на рис. 1. Анализ изотопного состава вод ( $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ ) и DIC ( $\delta^{13}C_{DIC}$ ) проводили с помощью масс-спектрометра изотопных отношений Finnigan<sup>TM</sup> MAT 253, снабженного приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II, в Центре коллективного пользования научным оборудованием для многоэлементных и изотопных исследований Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН. Исследования проводили с использованием известных методик [12–15]. Все измерения проводились относительно материалов сравнения МАГАТЭ: NBS-18 и NBS-19 – при измерениях  $\delta^{13}C_{DIC}$ ; VSMOW2, SLAP2 и GISP – при измерениях  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$  [16]. Погрешность измерений не превышала 0,1 ‰ при анализе изотопного состава углерода, 0,2 ‰ – кислорода и 2 ‰ – водорода. Лабораторное изучение химического состава вод проводилось методами титриметрии, ионной хроматографии, масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой в проблемной научно-исследовательской лаборатории гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Томского политехнического университета. Все значения  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$  и  $\delta^{13}C_{DIC}$  представлены в ‰ относительно международных стандартов VSMOW – для кислорода и водорода, VPDB – для углерода.

## Результаты

В табл. 1 и на рис. 2 приведены данные по изотопному составу кислорода, водорода и DIC в изученных водах с. Скала в сопоставлении с родственными объектами Новосибирской области – поверхностными и подземными водами сел Верх-Тула, Новобеево, п. Седова Заимка, реками Новосибирской городской агломерации, Инскими источниками [18, 19].

Большинство представленных вод имеют среду от нейтральной до слабощелочной (значения pH варьируют от 7,0 до 8,8), лишь карьерные воды с. Скала имеют показатель кислотности немного ниже 7 (pH=6,9). Здесь же отметим, что для этих вод характерно наибольшее содержание сульфат-иона: молярное соотношение  $SO_4^{2-}/HCO_3^-$  в них достигает  $0,481 \pm 0,036$  против  $0,005 \pm 0,292$  (среднее 0,057) в остальных представленных пробах. Уровень минерализации вод с. Скала варьирует в довольно узком диапазоне – от 280 до  $787 \text{ мг/дм}^3$  – и вполне сопоставим с общей минерализацией вод Новосибирской области – от 158 до  $818 \text{ мг/дм}^3$  для представленных в работе объектов.

В ионном составе изученных вод преобладают гидрокарбонат-, хлорид- и сульфат-ионы. Остальные макрокомпоненты находятся в подчиненном количестве. Исключение также составляют карьерные воды с. Скала, где в существенных количествах присутствуют сульфат-ион (более  $106 \text{ мг/дм}^3$ ),  $Ca^{2+}$  (более  $105 \text{ мг/дм}^3$ ), нитрат-ион (более  $295 \text{ мг/дм}^3$ ) при соизмеримых с другими пробами количествах хлорид-,

гидрокарбонат-ионов. Содержание DIC в изученных водах, рассчитанное как сумма трех диссоциатов углекислоты ( $\text{CO}_{2(\text{водн})} + \text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ), варьировало от 1,1 до 8,2 ммоль/дм<sup>3</sup>.

Изотопный состав кислорода и водорода природных вод с. Скала варьирует от  $-14,9$  до  $-18,0$  ‰ для  $\delta^{18}\text{O}$  и от  $-115$  до  $-142$  ‰ для  $\delta\text{D}$ . Изотопный состав углерода водорастворенной углекислоты в пробах зависит от типа источника и условно разделен на две группы: карьерные воды с тяжелым DIC (значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  от  $-5,3$  до  $-4,4$  ‰) и остальные воды – с изотопно-легким  $\text{CO}_2$  (значения  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  от  $-9,2$  до  $-8,1$  ‰). Для объектов сравнения содержание изотопов варьировало в следующих диапазонах: от  $-138$  до  $-114$  ‰ для  $\delta\text{D}$ , от  $-18,5$  до  $-11,6$  ‰ для  $\delta^{18}\text{O}$  и от  $-13,6$  до  $-9,7$  ‰ для  $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ .

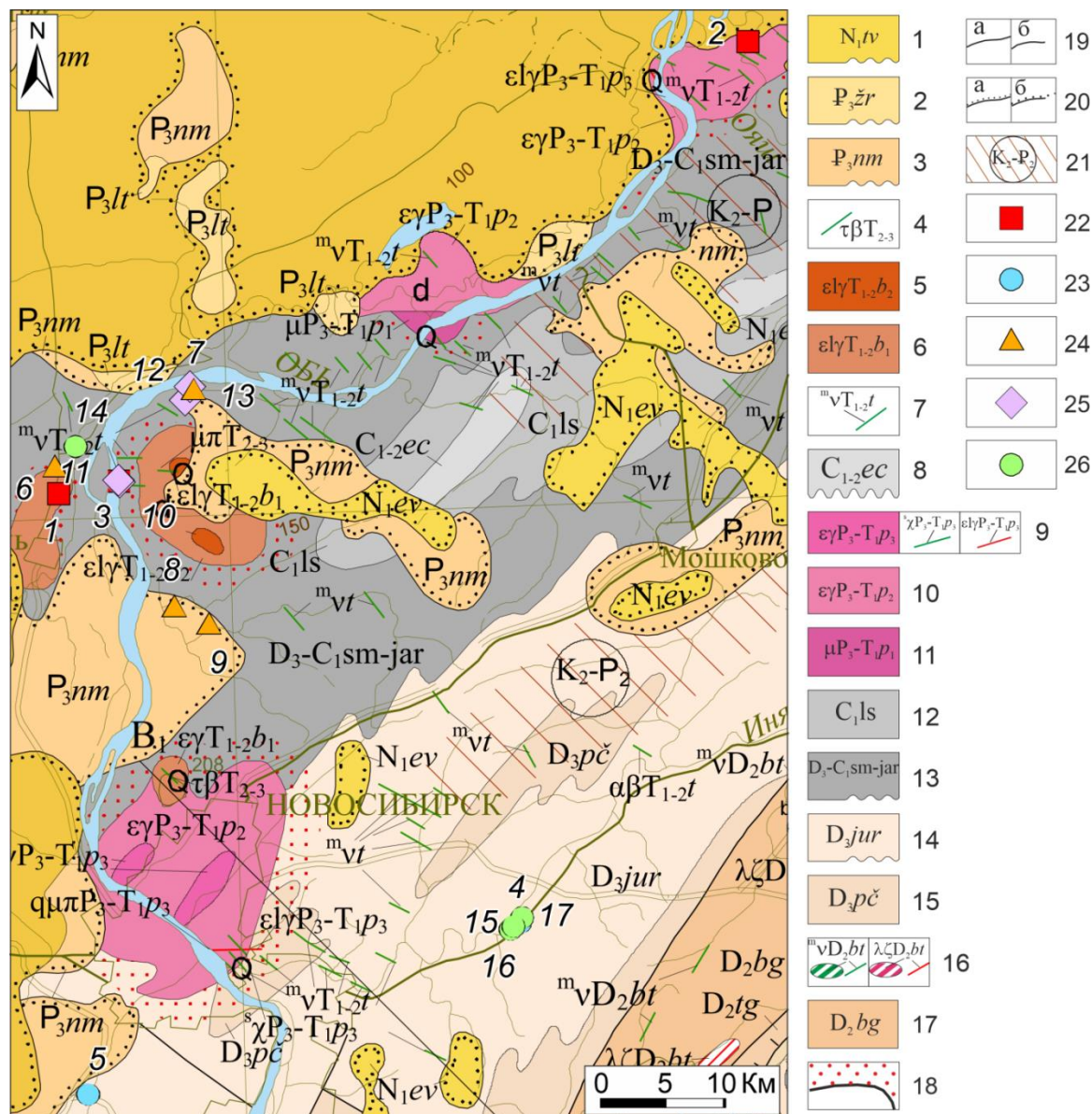
### Обсуждение

Полученные данные по изотопному составу кислорода и водорода вод представлены на рис. 2, а в координатах  $\delta\text{D} = f(\delta^{18}\text{O})$  относительно линий метеорных

вод: глобальной (GMWL) [20] и локальных линий (LMWL), построенных на основании данных международной базы Wiser (LMWL Wiser) [21] и данных работы [18] для изотопного состава атмосферных осадков в г. Новосибирске за 2020 г. (LMWL 2020). Представленные линии метеорных вод несколько различаются своим положением. Большинство полученных точек изотопного состава вод ложатся ближе к LMWL 2020. Кроме того, эта линия получена на основании наиболее актуальных данных, поэтому дальнейшее обсуждение результатов будет проводиться относительно нее.

Расположение точек на LMWL указывает на метеорное или метеорно-инфильтрационное (для подземных) происхождение соответствующих вод [1, 8].

Из рис. 2 видно, что для большинства подземных вод характерен более легкий изотопный состав кислорода и водорода относительно поверхностных вод – точки ложатся на LMWL в область более отрицательных значений  $\delta\text{D}$  и  $\delta^{18}\text{O}$ .



По-видимому, это является следствием большего участия осадков холодного периода года в питании подземных вод, поскольку для них характерен усредненный изотопный состав метеорных вод за весь сезон [1, 18], в отличие от поверхностных вод, представляющих, в первую очередь ввиду своей большей подвижности, осадки теплого сезона (август) в нашем случае. Отклонение некоторых точек вправо от LMWL обусловлено эвапотранспирацией вод [1, 22] и характерно в первую очередь для поверхностных вод, что наблюдается и в нашем случае для вод рек Иня и Чаус, а также дренажных вод карьера в с. Скала, отобранных в зумпфе.

Интересно отметить, что воды р. Скалушки имеют изотопный состав, отличающийся от всех представленных поверхностных вод региона существенно низким содержанием изотопов D и  $^{18}\text{O}$ . Это указывает на активное питание этой реки подземными водами, состав которых условно отображает проба, отобранная из водопродной колонки с. Скала. Используя простое уравнение смещения [1] и принимая за граничные члены ряда смещения воду из колонки и воду из р. Чаус, находим, что подземные воды составляют примерно 80 % питания р. Скалушки.

Дренажные воды карьера по изотопному составу довольно близки к водам р. Чаус и другим поверхностным водам региона исследований. Это наблюдение

несколько расходится с данными работы [23], где было показано насыщение карьерных вод относительно природных поверхностных водоемов тяжелыми изотопами. Авторы работы объясняли этот эффект комплексным влиянием ряда факторов: различие вкладов поверхностных вод, эвапотранспирации и др. По-видимому, в нашем случае условия образования дренажных вод в карьерах близки к условиям в поверхностных водоемах региона. Можно предположить, что проявление эффекта обогащения вод тяжелыми изотопами в отдельных случаях связано с глубиной и уровнем затопления карьеров.

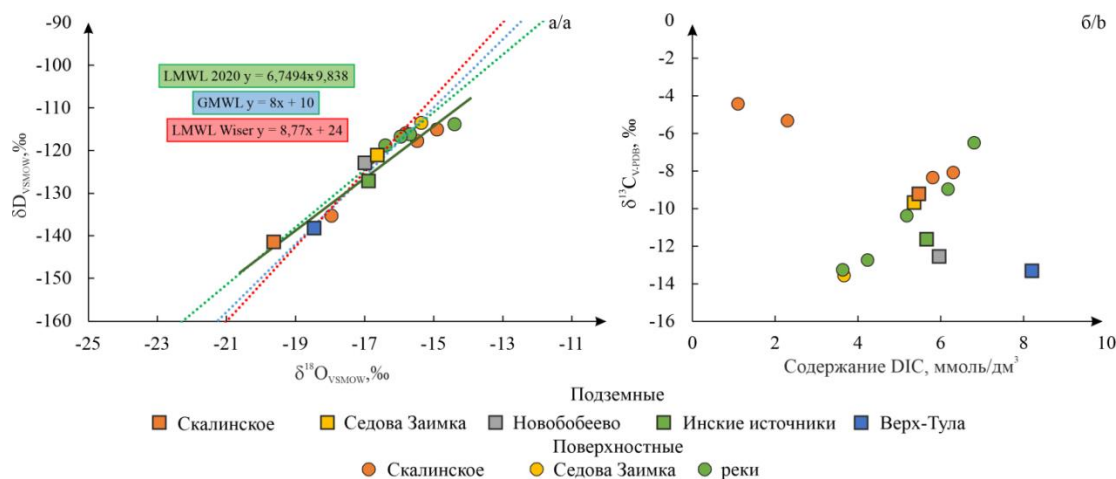
Отдельного внимания заслуживает проба, отобранная в с. Скала из водопродной колонки, используемой населением для питьевого водоснабжения. Изотопный состав кислорода и водорода этой пробы подземных вод самый легкий из всех изученных нами на территории Новосибирской области [18, 19, 24]. Кроме того, значения дейтериевого эксцесса [25] этой пробы  $d=15,5\text{‰}$ , что совсем не характерно для современных подземных вод Новосибирской области, хотя и довольно распространено для современных атмосферных осадков региона (по собственным данным). На основании данных по единственной пробе сложно сделать более подробную интерпретацию, поэтому на текущий момент оставим этот вопрос для дальнейших исследований.

**Рис. 1.** Местоположение изученных объектов [17]: 1 – таволжанский горизонт; 2 – журавский горизонт; 3 – новомихайловский горизонт; новомихайловская свита; 4 – средне-позднетриасовые дайки трахибазальтов порфировых, монцодиорит-порфиритов; 5, 6 – Барлакский гранит-лейкогранитовый мезоабиссальный комплекс: 5 – вторая фаза; 6 – первая фаза; 7 – Ташаринский габбро-долеритовый комплекс; 8 – евсеевский и каезовский горизонты. Ельцовская свита; 9–11 – Приобский монцодиорит-граносиенит-гранитовый мезоабиссальный комплекс: 9 – третья фаза; 10 – вторая фаза (главная); 11 – первая фаза; 12 – подъяковский и верхотомский горизонты. Лагерносадская (мильтюшинская) толща; 13 – саламатовская (чингисская) и ярская толщи нерасчлененные; 14 – подонинский горизонт. юргинская свита; 15 – пачинская свита; 16 – Буготакско-тогучинский риодацит-базальтовый комплекс. 17 – буготакская свита; 18 – контактовые роговики и ороговикованные породы; 19, 20 – геологические границы: 19 – согласно залеганию разновозрастных подразделений и интрузивных контактов: а – достоверные, б – предполагаемые; 20 – несогласного залеганию разновозрастных подразделений: а – достоверные, б – предполагаемые; 21 – позднемеловая–эоценовая кора выветривания; 22–26 – геохимические типы вод: 22 – трещинно-жильные воды гранитоидов (проявления радоновых вод: 1 – Скалинское; 2 – Новобибеевское; 3 – Седова Заимка); 23 – воды зоны региональной трещиноватости карбонатно-терригенных пород (источники: 4 – Инские; 5 – Святой в с. Верх-Тула); 24 – поверхностные воды с большой долей подземного питания (реки: 6 – Скалушка; 7 – Ключевая; 8 – Барлак Малый; 9 – Большой Барлак); 25 – поверхностные воды (реки: 10 – Шатуниха; 11 – Обь; 12, 13 – Смородинка); 26 – поверхностные воды в условиях антропогенного влияния (реки: 14 – Чаус; 15–17 – Иня)

**Fig. 1.** Location of the objects studied: 1 – tavalzhansky horizon; 2 – zhuravsky horizon; 3 – novomikhailovskiy horizon; novomikhailovskaya formation; 4 – middle-late triassic dikes of porphyritic trachybasalts, monzodiorite-porphyrates; 5, 6 – Barlak granite-leucogranite mesoabyssal complex: 5 – second phase; 6 – first phase; 7 – Tasharin gabbro-dolerite complex; 8 – evseevsky and kaezovsky horizons. eltsovskaya formation; 9–11 – Priobsky monzodiorite-granosyenite-granite mesoabyssal complex: 9 – third phase; 10 – second phase (main); 11 – first phase; 12 – podyakovskiy and verkhotomskiy horizons. lagernosadskaya (milyushinskaya) formaion; 13 – salamatovskaya (chinggisskaya) and yarskaya formation, undivided; 14 – podoninsky horizon. yurginskaya formation; 15 – pachinskaya formation; 16 – Bugotaksko-Toguchinskiy rhyodacite-basalt complex; 17 – bugotak formation; 18 – contact hornfelses and hornfelsed rocks; 19, 20 – geological boundaries: 19 – conformable occurrence of units of different ages and intrusive contacts: a) reliable, b) supposed; 20 – unconformity occurrence of units of different ages: a) reliable, b) supposed; 21 – Late Cretaceous–Eocene weathering crust; 22–26 – geochemical types of waters: 22 – fissure-vein waters of granitoids (manifestations of radon waters: 1 – Skalinskoe; 2 – Novobibeevskoe; 3 – Sedova Zaimka); 23 – waters of the zone of regional jointing of carbonate-terrigenous rocks (springs: 4 – Inskie; 5 – Svyatoy in the village Verkh-Tula); 24 – surface waters with a large share of groundwater supply (rivers: 6 – Skalushka; 7 – Klyuchevaya; 8 – Barlak Maly; 9 – Bolshoy Barlak); 25 – surface water (rivers: 10 – Shatunikha; 11 – Ob; 12, 13 – Smorodinka); 26 – surface waters under conditions of anthropogenic influence (rivers: 14 – Chaus; 15–17 – Inya)

**Таблица.** Изотопный состав H, O и DIC в водах с. Скала и родственных объектах Новосибирской области  
**Table.** Isotopic composition of H, O, and DIC in the waters of v. Skala and related objects of the Novosibirsk region

№ пробы sample no.	Местоположение Location	$\delta^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$ , ‰	$\text{dD}_{\text{VSMOW}}$ , ‰	$\text{d}^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ , ‰	сумма DIC, ммоль/дм <sup>3</sup> DIC sum, mmol/dm <sup>3</sup>	$\text{SO}_4^{2-}/$ $\text{HCO}_3^-$
73 Rn	с. Скала, карьер – зумпф v. Skala, quarry – sumpf	-4,4	-118	-15,5	1,1	2,036
74 Rn	с. Скала, карьер – техногенное озеро v. Skala, quarry – technogenic lake	-5,3	-116	-15,8	2,3	0,481
87 Rn	с. Скала, колонка v. Skala, water column	-9,2	-142	-19,6	5,5	0,005
88 Rn	с. Скала, р. Скалушка v. Skala, r. Skalushka	-8,1	-135	-18,0	6,3	0,005
89 Rn	с. Скала, р. Чаус v. Skala, r. Chaus	-8,3	-115	-14,9	5,8	0,100
201 Rn	с. Новобеево, скважина v. Novobeevo, well	-12,6	-123	-17,0	6,0	0,292
124 Rn	р. Шатуниха, п. Седова Займка r. Shatunikha, v. Sedova Zaimka	-13,6	-114	-15,4	3,7	0,020
138 Rn	п. Седова Займка – скважина v. Sedova Zaimka – well	-9,7	-121,1	-16,6	5,4	0,032
Усредненные данные по нескольким пробам Averaged data for several samples	с. Верх-Тула, Святой источник v. Verkh-Tula, Svyatoy spring	-13,3	-138	-18,5	8,2	0,016
128 Rn	р. Смородинка r. Smorodinka	-13,3	-116	-15,7	3,6	0,022
130 Rn	р. Ключевая r. Klyuchevaya	-12,7	-119	-16,4	4,2	0,022
131 Rn	р. Барлак малый, с. Кубовое r. Barlak Maly, v. Kubovoe	-10,4	-117	-16,0	5,2	0,012
Усредненные данные по нескольким пробам Averaged data for several samples	р. Иня, ниже источника № 1 r. Inya, below the spring no. 1	-6,8	-114	-14,4	6,5	0,144
Усредненные данные по нескольким пробам Averaged data for several samples	Инские источники Inskie spring	-11,6	-127	-16,9	5,7	0,016



**Рис. 2.** Изотопный состав кислорода и водорода относительно глобальной линии метеорных вод – GMWL (global meteoric water line) [20] и локальных линий метеорных вод – LMWL (local meteoric water line) [18, 21] (а) и DIC (б) в водах с. Скала, Новосибирской обл.

**Fig. 2.** Isotope composition of oxygen and hydrogen in the studied waters with respect to GWML (global meteoric water line) [20] and LMWL (local meteoric water line) [18, 21] (a) the isotope composition of carbon depending on the concentration of DIC in waters of v. Skala, Novosibirsk region

По изотопному составу DIC воды с. Скала разделились на две условные группы (рис. 2, б): 1 – воды легкого изотопного состава углерода (речные воды и проба подземных вод из колонки); 2 – воды тяжелого изотопного состава углерода (дренажные воды карьера).

В данном случае разница в изотопном составе вполне выразительна, что в очередной раз указывает на различие в чувствительности отдельных изотопных данных к изменению условий окружающей среды, что также было наглядно продемонстрировано в работе [10]. Ком-



плексное использование величин  $\delta D$  и  $\delta^{18}O$ , характеризующих параметры и условия формирования растворителя, вместе с  $\delta^{13}C_{DIC}$ , выражающей уровень и характер взаимодействия вод с окружающим углеродсодержащим веществом, дают более подробное и развернутое понимание генезиса и эволюции вод. Так, на основании данных по изотопному составу водорода и кислорода вод существенных различий в водах карьеров и других поверхностных вод области выявлено не было. При этом изотопно-концентрационная характеристика углерода вод явно указывает на различие во взаимодействии этих вод с окружающей средой.

Из рис. 2, б видно, что точки, характеризующие речные воды и пробу, отобранную из водопроводной колонки с. Скала, очень близки к точкам поверхностных вод, в то время как пробы дренажных вод резко различаются как по содержанию DIC, так и по изотопному составу  $\delta^{13}C_{DIC}$ . Тем не менее для всех изученных вод концентрация DIC оказалась существенной и на несколько порядков превышает «фоновую» концентрацию углекислоты (поглощаемую из воздуха) в атмосферных осадках: 0,01–0,08 ммоль/дм<sup>3</sup> [26, 27]. В целом такая тенденция может рассматриваться как нормальная, поскольку большинство поверхностных водоемов перенасыщены углекислотой относительно равновесного с атмосферой состояния [28]. Это указывает на дополнительные источники углекислоты, поглощенной водами до момента их отбора и анализа. Очевидно, в нашем случае такими источниками могла служить диффузионная углекислота, поглощенная почвами из воздуха [29] и в дальнейшем перешедшая в раствор при миграции вод в приповерхностных горизонтах, либо CO<sub>2</sub>, образованный при аэробном распаде органических веществ, в определенной степени наследующий изотопный состав прекурсора – органического вещества [30] (аэробная биогенная углекислота). Здесь же, возможно, следует упомянуть углекислый газ, образуемый в ходе жизнедеятельности анаэробных микроорганизмов – анаэробная биогенная углекислота. Ее формирование и изотопный состав углерода в ней очень сильно зависят от конкретного механизма анаэробной биогенной переработки вещества [31–33], но в случае поверхностных вод, обильно насыщенных кислородом, эти механизмы в целом могут не учитываться.

Ожидаемое «фоновое» значение  $\delta^{13}C_{DIC}$  в атмосферных осадках, с учетом коэффициента фракционирования [34] и изотопного состава воздушного CO<sub>2</sub> [27, 35], составляет около –10 ‰. В нашем случае к таким значениям близки лишь несколько проб – подземные воды из скважин п. Седова Заимка, воды из р. Барлак и подземные воды из колонки с. Скала. Для всех остальных представленных проб наблюдается существенное отклонение величины  $\delta^{13}C_{DIC}$  как в положительную, так и в отрицательную стороны. Большинство изученных вод насыщены изотопно-легкой углекислотой – особенно это прослеживается для подземных вод, что связано с их насыщением аэробной биогенной углекислотой.

Насыщение углекислоты тяжелым <sup>13</sup>C связано, скорее всего, с участием водорастворенного CO<sub>2</sub> в

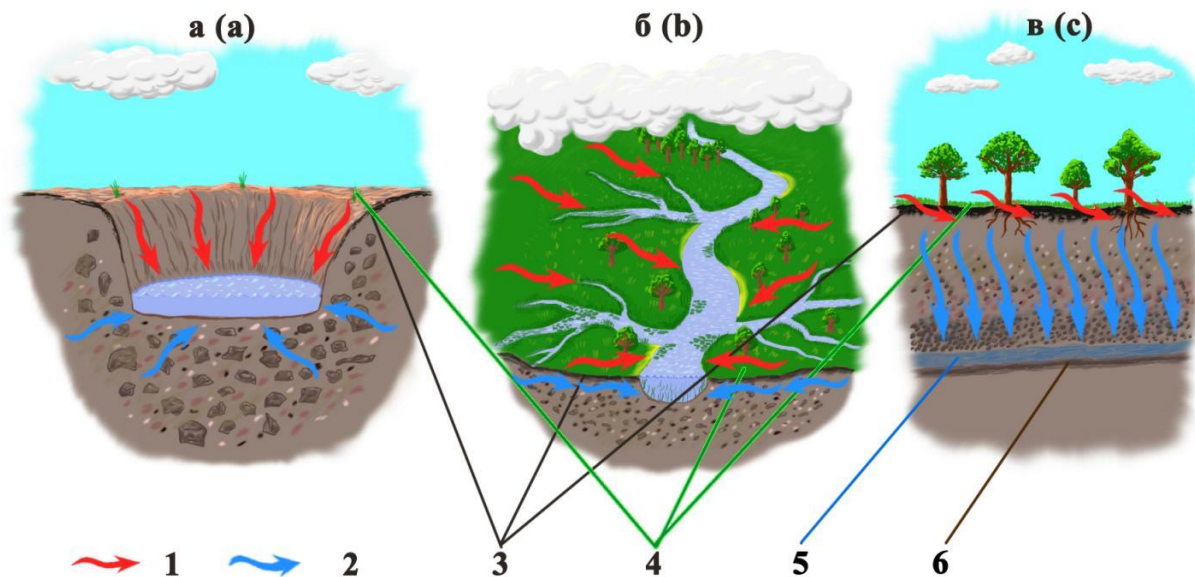
процессах выветривания изотопно-тяжелых карбонатных пород [2, 30]. В частности, в работе [19] для карбонатного материала в Новосибирской области приводятся значения  $\delta^{13}C \sim -2,9$  ‰. Еще одним источником изотопно-тяжелой углекислоты могут служить растения с фотосинтезом типа C<sub>4</sub> [1]. Для проработки обеих гипотез нужны дополнительные исследования, учитывающие минералогический и растительный фон окружения водоемов.

Содержание DIC в исследованных водах также неоднородно: наименьшие концентрации углекислоты характерны для дренажных вод карьера с. Скала, умеренно насыщены CO<sub>2</sub> речные воды, в наибольшей степени углекислый газ растворен в подземных водах (особенно это проявляется для вод Святого источника в с. Верх-Тула). Очевидно, причиной таких различий служит в первую очередь длительность контакта вод с окружающей средой и доступность углекислоты. Схематично это изображено на рис. 3.

В случае дренажных вод карьера (рис. 3, а) – довольно сильно изолированной системы с низкой насыщенностью флорой и фауной и крайне ограниченной поверхностью водосбора – доступной для растворения углекислоты мало. Внутренняя поверхность карьера в нашем случае существенно меньше его внешней водосборной площади. Основным источником в данном случае следует рассматривать атмосферный CO<sub>2</sub> с небольшой долей иных источников. Нельзя также исключать в отдельных случаях питание дренажных вод подземными источниками, но, как показали проведенные исследования изотопного состава кислорода и водорода, в нашем случае если таковое и присутствует, то лишь в минимальном количестве и может не учитываться.

Для речных вод захват углекислоты происходит в большей степени, что обусловлено значительной протяженностью водного пути, существенным участием диффузионной почвенной углекислоты в питании вод за счет более широкой площади водосбора (рис. 3, б). Здесь же начинает в некоторой степени проявляться биогенная аэробная углекислота, собираемая водами с почвенного слоя. Количество растительности для речных водосборов, очевидно, будет существенно большим, чем в случае дренажных вод карьеров. Однако растительность в данном случае играет двойную роль: с одной стороны, остатки растений насыщают почву органическим веществом, которое в дальнейшем является источником аэробной биогенной углекислоты, с другой – живые растения поглощают влагу из почв, затрудняя перенос углекислоты в речные системы, но также и высвобождая дополнительные порции CO<sub>2</sub> при корневом дыхании [36].

Наконец, для подземных вод вклад биогенной углекислоты, инфильтрующейся и диффундирующей с поверхности и почвенного слоя, максимален. При этом вклад ранее перечисленных факторов также остается в силе. Поверхностные воды, собирая органическое вещество и диффузионную углекислоту с поверхности и почвенного слоя, переносят ее на все большие глубины, пока не достигают водоупорной толщи, выступающей барьером для дальнейшей миграции вод.



**Рис. 3.** Схема питания углекислотой, захватываемой поверхностным и подземным стоком, для водоемов различного типа: 1 – поверхностный сток; 2 – подземный сток; 3 – насыщенный органическим веществом почвенный слой; 4 – флора; 5 – водоносный горизонт с подземными водами; 6 – водоупор

**Fig. 3.** Scheme of carbon dioxide supply captured by surface and underground runoff for various types of water bodies: 1 – surface runoff; 2 – underground runoff; 3 – soil rich in organic matter; 4 – flora; 5 – aquifer with ground water; 6 – aquiclude

#### Выводы

1. Получены первые данные по изотопному составу природных вод с. Скала Новосибирской области, и выполнено их сопоставление с ранее изученными объектами. Изотопный состав кислорода и водорода вод указывает на их метеорно-инфильтрационное происхождение (от  $-18,0$  до  $-14,9$  ‰ для  $\delta^{18}\text{O}$  и от  $-142$  до  $-115$  ‰ для  $\delta\text{D}$ ).
2. Обнаружены подземные воды, имеющие неординарно обедненный тяжелыми изотопами состав ( $\delta^{18}\text{O} = -19,6$ ;  $\delta\text{D} = -142$  ‰) и необычное для подземных вод региона исследования значение дейтериевого эксцесса. Выявлено активное участие подземных вод в питании реки Скалушки, вклад подземных вод составляет до 80 %.
3. Изотопно-концентрационная характеристика изученных вод разделяет их на три условные группы: дренажные воды карьеров, поверхностные (речные) и подземные. Каждый из указанных типов вод имеет свою уникальную изотопно-

концентрационную характеристику: малонасыщенные тяжелой углекислотой ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  от  $-5,3$  до  $-4,4$  ‰) дренажные воды, средние по изотопному составу ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  от  $-13,3$  до  $-6,8$  ‰) и концентрации DIC речные воды и насыщенные легкой углекислотой ( $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$  от  $-13,3$  до  $-9,2$  ‰) подземные воды. Причиной таких различий служит, в первую очередь, длительность контакта вод с окружающей средой и доступность углекислоты. Полученные данные могут служить условным маркером для определения источников вод Новосибирской области и оценки различий (индивидуализации) водоемов.

*Полевые и аналитические работы по изучению химического состава природных вод выполнены при финансовой поддержке проектов Министерства науки и высшего образования РФ №№ FWZZ-2022-0014, FSWW-2023-0008, аналитические работы по исследованию изотопного состава водорода, кислорода вод и DIC – при поддержке проекта № 22-17-20029 Российского научного фонда и Правительства Новосибирской области.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы земли. – М.: Изд-во «Научный мир», 2009. – 632 с.
2. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 8th ed. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. – Germany: Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. – 460 p.
3. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco) / D. Chafouq, A. El Mandour, M. Elgettafi, M. Himi, I. Chouikri, A. Casas // Journal of African Earth Sciences. – 2018. – V. 139. – P. 1–13.
4. Mook W.G. Environmental isotopes in the hydrological cycle, Principles and applications // Unesco, IHP. Technical documents in hydrology. – 2001. – V. 5. – № 39.
5. Oxygen and hydrogen isotopic composition of waters in a past-mining area of southern Apuan Alps (Italy): hydrogeological characterization and implications on the fate of potentially toxic elements / M. Doveri, B. Stenni, R. Petrini, R. Giannecchini, G. Dreossi, M. Menichini, L. Ghezzi // Journal of Geochemical Exploration. – 2019. – V. 205. – 106338. – 9 p.
6. Deuterium excess in marine water vapor: dependency on relative humidity and surface wind speed during evaporation / M. Benetti, G. Reverdin, C. Pierre, L. Merlivat, C. Risi, H.C. Steen-Larsen, F. Vimeux // J. Geophys. Res. Atmos. – 2014. – V. 119. – P. 584–593.
7. GRIP deuterium excess reveals rapid and orbital-scale changes in greenland moisture origin / V. Masson-Delmotte, J. Jouzel, A. Landais, M. Stievenard, S.J. Johnsen, J.W.C. White, M. Werner, A. Sveinbjornsdottir, K. Fuhrer // Science. – 2005. – V. 309. – P. 118–121.

8. Origin and evolution of the thermal waters from the Pamukkale Geothermal Field (Denizli Basin, SW Anatolia, Turkey): insights from hydrogeochemistry and geothermometry / H. Alçiçek, A. Bülbül, I. Yavuzer, M.C. Alçiçek // Journal of Volcanology and Geothermal Research. – 2019. – V. 372. – P. 48–70.
9. Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction / R.M. Shoedarto, Y. Tada, K. Kashiwaya, K. Koike, I. Iskandar // Geothermics. – 2020. – V. 86. – 101797. – 17 p.
10. Пыряев А.Н., Новиков Д.А., Максимова А.А. Стабильные изотопы как инструмент контроля границ закрытых экосистем на примере бассейна р. Витим // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 5. – С. 148–157.
11. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000 (третье поколение). Серия Алтае-Саянская. Лист N-44 – Новосибирск. Объяснительная записка. / Г.А. Бабин, А.И. Черных, А.Г. Головина, С.В. Жигалов, С.С. Долгушин, Е.В. Ветров, Т.В. Кораблева, Н.А. Бодина, Н.А. Светлова, Г.С. Федосеев, А.П. Хилько, В.А. Епифанов, Ю.И. Лоскутов, И.Ю. Лоскутов, М.В. Михаревич, Е.А. Пихутин. – СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2015. – 392 с.
12. Epstein S., Mayeda T. Variation of O18 content of waters from natural sources // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1953. – V. 4 (5). – P. 213–224.
13. 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. – 2000. – V. 4. – P. 1044–1046.
14. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO<sub>2</sub> / M. Górka, P.E. Sauer, D. Lewicka-Szczebak, M.-O. Jedrysek // Environmental Pollution. – 2011. – V. 159. – P. 294–301.
15. Correction algorithm for online continuous flow  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  carbonate and cellulose stable isotope analyses / M.N. Evans, K.J. Selmer, B.T. Breeden III, A.S. Lopatka, R.E. Plummer // Geochem. Geophys. Geosyst. – 2016. – V. 17. – P. 3580–3588.
16. International Atomic Energy Agency. URL: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx> (дата обращения: 15.08.2022).
17. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1000000. Лист N 44. – СПб: ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2015.
18. Первые результаты комплексных изотопно-гидрогеохимических исследований Новобибеевского проявления радоновых вод / Д.А. Новиков, Ф.Ф. Дульцев, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, А.Н. Фаге, А.А. Хвощевская, А.С. Деркачев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 57–72.
19. Изотопно-геохимические особенности проявления слабарадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири) / Д.А. Новиков, Ю.Г. Копылова, Л.Г. Вакуленко, А.Ф. Сухорукова, А.Н. Пыряев, А.А. Максимова, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Черных // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 3. – С. 135–145.
20. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
21. IAEA Nucleus for Nuclear Knowledge and Information. URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> (дата обращения: 15.08.2022).
22. Gat J.R., Matsui E. Atmospheric water balance in the Amazon basin: an isotopic evapotranspiration model // Journal of geophysical research. – 1991. – V. 96. – № D7. – P. 13179–13188.
23. Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA // Journal of Geochemical Exploration. – 2020. – V. 210. – Article 106445.
24. Первые данные по изотопному составу пластовых вод разрабатываемых нефтяных месторождений Новосибирской области / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, С.В. Рыжкова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – 332. – № 2. – С. 59–72.
25. Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation // Tellus. – 1964. – V. 16. – № 4. – P. 436–468.
26. Liu Z., Dreybrodt W., Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO<sub>2</sub> budget: considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms // Earth-Science Reviews. – 2010. – V. 99. – Iss. 3–4. – P. 162–172.
27. Первые изотопно-гидрогеохимические данные по природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского / Д.А. Новиков, А.А. Максимова, А.Н. Пыряев, П.А. Ян // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 157–167.
28. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes / J.J. Cole, N.F. Caraco, G.W. Kling, T.K. Kratz // Science. – 1994. – V. 265 (5178). – P. 1568–1570.
29. Cerling T.E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate // Earth and Planetary Science Letters. – 1984. – V. 71 (2). – P. 229–240.
30. Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. 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. – 2005. – V. 236. – P. 419–429.
31. Новые данные по изотопному составу ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  и  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) рассолов сибирской платформы / Д.А. Новиков, А.Н. Пыряев, А.В. Черных, Ф.Ф. Дульцев, А.В. Ильин, Е.О. Чертовских // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – № 7. – С. 20–33.
32. Assessing sulfate reduction and methane cycling in a high salinity pore water system in the northern Gulf of Mexico / J.W. Pohlman, C. Ruppel, D.R. Hutchinson, R. Downer, R.B. Coffin // Marine and Petroleum Geology. – 2008. – V. 25. – P. 942–951.
33. Stable carbon isotope fractionation between substrates and products of *Methanosarcina barkeri* / K.L. Londry, K.G. Dawson, H.D. Grover, R.E. Summons, A.S. Bradley // Organic Geochemistry. – 2008. – V. 39. – P. 608–621.
34. Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO<sub>2</sub> // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – Iss. 1. – P. 107–114.
35. Global Monitoring Laboratory. URL: <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/iadv/> (дата обращения: 02.07.2022).
36. Mukhopadhyay A., Midha V.K. Waterproof breathable fabrics. Handbook of Technical Textiles. – UK: Woodhead Publ., 2016. 55 p.

Поступила: 17.08.2022 г.

Дата рецензирования: 06.12.2022 г.

#### Информация об авторах

**Пыряев А.Н.**, кандидат химических наук, научный сотрудник лаборатории изотопно-аналитической геохимии Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН; старший преподаватель кафедры химической и биологической физики Новосибирского национального исследовательского государственного университета.

**Новиков Д.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, заведующий лабораторией гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; доцент кафедры геологии месторождений нефти и газа и кафедры общей и региональной геологии Новосибирского национального исследовательского государственного университета.



**Максимова А.А.**, инженер лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; ассистент кафедры минералогии и геохимии Новосибирского национального исследовательского университета.

**Дульцев Ф.Ф.**, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Деркачев А.С.**, студент, Новосибирский национальный исследовательский государственный университет.

**Черных А.В.**, научный сотрудник лаборатории гидрогеологии осадочных бассейнов Сибири Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН.

**Хвациевская А.А.**, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 544.02(282.256.615)

## ISOTOPE-CONCENTRATION CHARACTERISTICS OF NATURAL WATERS IN THE NOVOSIBIRSK REGION AS A TOOL FOR CONTROL OF THEIR INTERACTION WITH THE ENVIRONMENT

**Aleksandr N. Pyryaev**<sup>1,2</sup>,  
pyrayev@igm.nsc.ru

**Dmitry A. Novikov**<sup>3,2</sup>,  
NovikovDA@ipgg.sbras.ru

**Anastasia A. Maksimova**<sup>2,3</sup>,  
rock.nastaya64@gmail.com

**Fedor F. Dultsev**<sup>3</sup>,  
DultsevFF@ipgg.sbras.ru

**Anton S. Derkachev**<sup>2</sup>,  
a.derkachev@g.nsu.ru

**Anatoliy V. Chernykh**<sup>3</sup>,  
ChernykhAV@ipgg.sbras.ru

**Albina A. Khvacsheskaya**<sup>4</sup>,  
unpc\_voda@mail.ru

<sup>1</sup> Institute of Geology and Mineralogy SB RAS,  
3, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Novosibirsk State University,  
1, Pirogov street, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>3</sup> Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS,  
3/6, Koptuyug avenue, Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>4</sup> National Research Tomsk Polytechnic University,  
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

**The relevance** of the research is caused by the need to develop the differentiation method for the water reservoirs with similar hydrogen and oxygen isotope composition using the combined isotope and concentration characteristic.

**Purpose:** to compare combined isotope and concentration characteristics of individual water reservoirs and to reveal whether to apply them or not for differentiation of the water reservoirs with similar hydrogen and oxygen isotope composition.

**Methods.** Laboratory studies of the chemical composition of natural waters by means of titration, ion chromatography, mass spectrometry with inductively coupled plasma and analysis of the chemical composition of waters using titration were carried out at the Research Laboratory of Hydrogeochemistry at the School of Earth Sciences and Engineering of the Tomsk Polytechnic University. The  $\delta D$ ,  $\delta^{18}O$ ,  $\delta^{13}C_{DIC}$  values of waters and dissolved inorganic carbon were determined in the Research Equipment Sharing Center at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS using the Isotope Ratio Mass Spectrometer FinniganTM MAT 253, equipped by the H/Device and GasBench II.

**Results.** Investigation of the isotope composition of H, O and dissolved inorganic carbon in the natural waters of Skala village in Novosibirsk region (Russia) was carried out. Isotope composition of all studied waters indicates their meteoric and infiltration genesis. Most waters have isotope composition comparable with it in other water objects of the region:  $\delta D$  values are varying from  $-142$  to  $-114$  ‰ whereas  $\delta^{18}O$  values are varying from  $-18,5$  to  $-11,6$  ‰. Unusual isotope composition of hydrogen and oxygen has been detected in ground water from Skala village: depleted  $\delta D$  and  $\delta^{18}O$  values combined with exceeding deuterium excess values. Waters under investigation were distinguished in three groups using combined isotope and concentration characteristic of dissolved inorganic carbon: drainage water from mine pit with low dissolved inorganic carbon concentration and enriched with  $\delta^{13}C_{DIC}$  values from  $-5,3$  to  $-4,4$  ‰, river waters with moderate dissolved inorganic carbon concentration and wide  $\delta^{13}C_{DIC}$  values from  $-13,3$  to  $-6,8$  ‰, ground waters with maximal dissolved inorganic carbon concentration and depleted  $\delta^{13}C_{DIC}$  values from  $-13,3$  to  $-9,2$  ‰. The combined isotope and concentration characteristics type of individual water reservoir depends on the water accumulation and isotope exchange with environment.

### **Key words:**

stable isotope composition of hydrogen, oxygen and DIC, river waters, drainage water from mine pit and ground waters, combined isotope and concentration characteristics.

Field and analytical work on the study of the chemical composition of natural waters was carried out with the financial support of projects of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation no. FWZZ-2022-0014, FSWW-2023-0008, analytical work on the study of the geochemical features of water-bearing rocks and the isotopic composition of hydrogen, oxygen of water and DIC – with the support project no. 22-17-20029 of the Russian Science Foundation and Government of the Novosibirsk region.

## REFERENCES

- Feronsky V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery* [Isotopy of the hydrosphere]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2009. 632 p.
- Hoefs J. *Stable isotope geochemistry*. 8<sup>th</sup> ed. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Germany, Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. 460 p.
- Chafouq D., El Mandour A., Elgettafi M., Himi M., Chouikri I., Casas A. Hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the Ghis-Nekor plain (northern Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2018, vol. 139, pp. 1–13.
- Mook W.G. Environmental isotopes in the hydrological cycle, principles and applications. *Unesco, IHP. Technical documents in hydrology*, 2001, vol. 5, no. 39.
- Doveri M., Stenni B., Petrini R., Giannecchini R., Dreossi G., Menichini M., Ghezzi L. Oxygen and hydrogen isotopic composition of waters in a past-mining area of southern Apuan Alps (Italy): hydrogeological characterization and implications on the fate of potentially toxic elements. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, vol. 205, 106338, 9 p.
- 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. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2014, vol. 119, pp. 584–593.
- Masson-Delmotte V., Jouzel J., Landais A., Stievenard M., Johnsen S.J., White J.W.C., Werner M., Sveinbjornsdottir A., Fuhrer K. GRIP deuterium excess reveals rapid and orbital-scale changes in greenland moisture origin. *Science*, 2005, vol. 309, pp. 118–121.
- Alçiçek H., Bülbül A., Yavuzer I., Alçiçek M.C. 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*, 2019, vol. 372, pp. 48–70.
- Shoedarto R.M., Tada Y., Kashiwaya K., Koike K., Iskandar I. Specifying recharge zones and mechanisms of the transitional geothermal field through hydrogen and oxygen isotope analyses with consideration of water-rock interaction. *Geothermics*, 2020, vol. 86, 101797, 17 p.
- Pyryaev A.N., Novikov D.A., Maksimova A.A. 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*, 2022, vol. 333, no. 5, pp. 148–157. In Rus.
- Babin G.A., Chernykh A.I., Golovina A.G., Zhigalov S.V., Dolgushin S.S., Vetrov E.V., Korableva T.V., Bodina N.A., Svetlova N.A., Fedoseev G.S., Khilko A.P., Epifanov V.A., Loskutov Yu.I., Loskutov I.Yu., Mikharevich M.V., Pikhutin E.A. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000 (tretye pokolenie). Seriya Altae-Sayanskaya. List N-44 – Novosibirsk. Obyasnitelnaya zapiska [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000 (third generation). Altai-Sayan series. Sheet N-44 –Novosibirsk. Explanatory letter]. St. Petersburg, Cartographic factory VSEGEI, 2015. 392 p.
- Epstein S., Mayeda T. Variation of O<sup>18</sup> content of waters from natural sources. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1953, vol. 4 (5), pp. 213–224.
- 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*, 2000, vol. 4, pp. 1044–1046.
- Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczebak D., Jedrysek M.-O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO<sub>2</sub>. *Environmental Pollution*, 2011, vol. 159, pp. 294–301.
- Evans M.N., Selmer K.J., Breeden III B.T., Lopatka A.S., Plummer R.E. Correction algorithm for online continuous flow  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  carbonate and cellulose stable isotope analyses. *Geochim. Geophys. Geosyst.*, 2016, vol. 17, pp. 3580–3588.
- International Atomic Energy Agency. Available at: <https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx>. (accessed 15 August 2022).
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:1000000. List N 44 [State geological map of the Russian Federation. Scale 1:1000000. Sheet N-44]. St. Petersburg, FSBI VSEGEI, 2015.
- Novikov D.A., Dultsev F.F., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Fage A.N., Khvashchevskaya A.A., Derkachev A.S., Chernykh A.V. Initial results of the integrated isotope-hydrogeochemical studies of the Novobibeevo occurrence of radon-rich waters. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 1, pp. 57–72. In Rus.
- Novikov D.A., Kopylova Yu.G., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F., Pyryaev A.N., Maksimova A.A., Dultsev F.F., Chernykh A.V. Isotope geochemical features of occurrence of low-radon waters (Inskie springs) (south-western Siberia). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 3, pp. 135–145. In Rus.
- Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 1961, vol. 133, pp. 1702–1703.
- IAEA Nucleus for Nuclear Knowledge and Information. Available at: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx> (accessed 15 August 2022).
- Gat J.R., Matsui E. Atmospheric water balance in the Amazon basin: an isotopic evapotranspiration model. *Journal of geophysical research*, 1991, vol. 96, no. D7, pp. 13179–13188.
- Newman C.P., Poulson S.R., Hanna B. Regional isotopic investigation of evaporation and water-rock interaction in mine pit lakes in Nevada, USA. *Journal of Geochemical Exploration*, 2020, vol. 210, article 106445.
- Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ryzhkova S.V. 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*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 59–72. In Rus.
- Dansgaard W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 1964, vol. 16, no. 4, pp. 436–468.
- Liu Z., Dreybrodt W., Wang H. A new direction in effective accounting for the atmospheric CO<sub>2</sub> budget: considering the combined action of carbonate dissolution, the global water cycle and photosynthetic uptake of DIC by aquatic organisms. *Earth-Science Reviews*, 2010, vol. 99, Iss. 3–4, pp. 162–172.
- Novikov D.A., Maksimova A.A., Pyryaev A.N., Yan P.A. First isotope-hydrogeochemical data on the natural waters of the southeast slope of the Chekanovsky ridge (Arctic areas of the Siberian platform). *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2020, vol. 331, no. 11, pp. 157–167. In Rus.
- Cole J.J., Caraco N.F., Kling G.W., Kratz T.K. Carbon dioxide supersaturation in the surface waters of lakes. *Science*, 1994, vol. 265 (5178), pp. 1568–1570.
- Cerling T.E. The stable isotopic composition of modern soil carbonate and its relationship to climate. *Earth and Planetary Science Letters*, 1984, vol. 71 (2), pp. 229–240.
- Das A., Krishnaswami S., Bhattacharya S.K. 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*, 2005, vol. 236, pp. 419–429.
- Novikov D.A., Pyryaev A.N., Chernykh A.V., Dultsev F.F., Ilyin A.V., Chertovskikh E.O. New data on the isotopic composition ( $\delta^{13}\text{C}$ ,  $\delta\text{D}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) of the Siberian platform brines. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 7, pp. 20–33. In Rus.
- 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, vol. 25, pp. 942–951.
- Londry K.L., Dawson K.G., Grover H.D., Summons R.E., Bradley A.S. Stable carbon isotope fractionation between substrates and products of *Methanosarcina barkeri*. *Organic Geochemistry*, 2008, vol. 39, pp. 608–621.
- Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO<sub>2</sub>. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, vol. 59, Iss. 1, pp. 107–114.
- Global Monitoring Laboratory. Available at: <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/iadv/> (accessed 2 July 2022).
- Mukhopadhyay A., Midha V.K. *Waterproof breathable fabrics. Handbook of Technical Textiles*. UK, Woodhead Publ., 2016. 55 p.

Received: 17 August 2022.

Reviewed: 6 December 2022.

**Information about the authors**

**Aleksandr N. Pyryaev**, Cand. Sc., researcher, Institute of Geology and Mineralogy SB RAS; senior lecturer, Novosibirsk State University.

**Dmitry A. Novikov**, Cand. Sc., head of the laboratory, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS; associate professor, Novosibirsk State University.

**Anastasia A. Maksimova**, assistant, Novosibirsk State University; engineer, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Fedor F. Dultsev**, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Anton S. Derkachev**, student, Novosibirsk State University.

**Anatoliy V. Chernykh**, researcher, Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS.

**Albina A. Khvachevskaya**, Cand. Sc., head of the scientific laboratory National Research Tomsk Polytechnic University.