Геохимия системы вода-порода проявления слаборадоновых вод «Инские источники» (юг Западной Сибири)

Новиков Д.А., Вакуленко Л.Г., Сухорукова А.Ф.

*Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск, Россия,
E-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru*

АННОТАЦИЯ: В 2019 году в 35 км от г. Новосибирска, вдали от известных гранитных массивов, открыто проявление слаборадоновых вод «Инские источники», относящееся к водам зоны региональной трещиноватости. В настоящей работе приводятся первые результаты их геохимических исследований. Установлено, что воды источников умеренно пресные HCO_3^- Mg-Ca состава с величиной общей минерализации от 389 до 536 мг/дм³ с содержаниями кремния 4,14-8,61 мг/дм³. Они характеризуются pH от нейтральных до слабощелочных (7,1 – 8,4), окислительной геохимической обстановкой с Eh +205,3 – +231,8 мВ и содержанием O_2 раств. 6,24 – 12,26 мг/дм³. Установленная активность ^{222}Rn варьируют в диапазоне 7 – 149 Бк/дм³; содержания: ^{238}U от $2,83 \cdot 10^{-3}$ до $4,13 \cdot 10^{-3}$ мг/дм³ и ^{232}Th от $2,39 \cdot 10^{-6}$ до $1,16 \cdot 10^{-5}$ мг/дм³. По изотопному составу воды имеют инфильтрационное происхождение. Диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ в водах меняется от -17,1 до -16,7‰ со значениями δD от -128,4 до -126,2‰ и вариацией $\delta^{13}\text{C}$ в интервале -13,1 – -10,3‰. Вмещающие породы представлены глинистыми сланцами темно-серого (до черного), иногда серого цвета, с небольшой примесью алевроитового, песчано-алевритового материала. Изотопный состав кальцита вмещающих пород характеризуется близкими значениями: $\delta^{13}\text{C}$ варьирует от -3,1 до -2,7 ‰, $\delta^{18}\text{O}$ – от 17,2 до 18,4 ‰. Выветрелые глинистые сланцы характеризуются облегчением по $\delta^{13}\text{C}$ (до -11,0‰), так и по $\delta^{18}\text{O}$ (до 13,9‰). Также эти образцы по результатам геохимических исследований характеризуется существенным снижением (в несколько раз) содержания всех элементов-примесей (кроме U), свидетельствующим об активном проявлении процессов в системе вода – горная порода.

Geochemistry of the water-rock system of weak hydro-radon occurrence «Inskiye springs» (south of Western Siberia)

Novikov D.A., Vakulenko L.G., Sukhorukova A.F.

*Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, Novosibirsk, Russia,
E-mail: NovikovDA@ipgg.sbras.ru*

ABSTRACT: Weak hydro-radon occurrence «Inskiye springs» was discovered in 2019, 35 km from Novosibirsk, in area where are no granite massifs, and relates to the groundwaters of the regional fracturing zone. The first results of their geochemical studies are represented. It is established that groundwaters are moderately fresh with TDS from 389 to 536 mg/dm³, with Mg-Ca HCO_3^- composition. Silicon content vary between 4.14-8.61 mg/dm³. They are characterized by pH from neutral to slightly alkaline (7.1 - 8.4), oxidative geochemical conditions with Eh +205.3 - +231.8 mV and the content of solved O_2 between 6.24 - 12.26 mg/dm³. The concentrations of ^{222}Rn range from 7 to 149 Bq/dm³, ^{238}U from $2.83 \cdot 10^{-3}$ to $4.13 \cdot 10^{-3}$ mg/dm³ and ^{232}Th from $2.39 \cdot 10^{-6}$ to $1.16 \cdot 10^{-5}$ mg/dm³. Using the isotopic composition it was established an infiltration origin of groundwaters. The $\delta^{18}\text{O}$ content in waters varies from -17.1 to -16.7 ‰, the δD content from -128.4 to -126.2 ‰ and $\delta^{13}\text{C}$ from -13.1 to -10.3 ‰. The host rocks are clay shales of dark gray (to black), sometimes gray, with a small admixture of silt, sand and silt material. In the host rocks, the isotopic composition of the calcite is characterized by close values: $\delta^{13}\text{C}$ varies from -3.1 to -2.7 ‰ and $\delta^{18}\text{O}$ - from 17.2 to 18.4 ‰. The content of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ in weathered shales decreases to -11.0 ‰ and 13.9, respectively. According to the results of geochemical studies, these samples are characterized by a significant decrease (several times) in the content of all impurity elements (except for uranium). This indicates the active manifestation of processes in the water - rock system.

ВВЕДЕНИЕ

Выявление механизмов взаимодействия в системе вода – горная порода с учетом всестороннего изучения подземных вод и вмещающих их пород является одной из наиболее актуальных фундаментальных проблем современной геохимии. Методы и подходы к решению поставленных в настоящей работе задач были определены новыми теоретическими положениями, разработанными в недрах Сибирской гидрогеохимической школы профессором С.Л.

Шварцевым [8]. Ключевую роль воде в геологических процессах и, как составной части минералов, играющей немаловажную роль в процессах их формирования и трансформации, отводил основатель гидрогеохимии – академик В.И. Вернадский [1]. Воды, независимо от генезиса и состава с момента попадания в осадочный бассейн вступают в сложнейшую цепь геохимических процессов в системе «вода – порода – газ – органическое вещество», которая но-

сит четко выраженный равновесно-неравновесный характер [7].

В августе 2019 года во время полевых работ, связанных с изучением радоновых вод Новосибирской городской агломерации (НГА) в результате последующих лабораторных исследований были выявлены повышенные концентрации радона в четырех естественных выходах природных вод (источниках) в долине реки Иня (рис. 1а). Источники были повторно опробова-

ны в ноябре этого же года. Активность радона (^{222}Rn) составила до 149 Бк/дм³. Интересным фактом является то, что впервые установленное проявление слаборадоновых вод «Инские источники» расположено вдали от известных гранитных массивов города Новосибирска и его окрестностей, с которыми связаны более десяти месторождений минеральных радоновых вод – «Заельцовское», «Горводолечебница» и другие [2, 4-5, 12].

Рис. 1. Местоположение изученных объектов (а), изотопный состав δD и $\delta^{18}\text{O}$ (б), $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ (в) в природных водах НГА и $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ (г) в природных водах и породах Инских источников.

Границы: 1 – административные, 2 – Инских источников; аномалий: 3 – U в рыхлых отложениях, 4 – Rn, U гидрогеохимических; Геохимические типы вод: 5 – грунтовые воды покровных карбонатных отложений (группа I): 1 – колодец; 6 – воды зоны региональной трещиноватости (группа II): карьер Борок; 2 – техногенное озеро №1, 3 – техногенное озеро №2, 4 – техногенное озеро №3, 5 – источник №1, 6 – источник №2 (водопад), 7 – источник №3 (водопад), 8 – источник №4 (водопад), 9 – источник №5 (водопад), 10 – Святой источник, с. Верх-Тула; Инские источники: 11 – источник №1, 11 – источник №2, 13 – источник №3, 14 – источник №4, 15 – скважина глубиной 80 м; 7 – трещинно-жильные воды гранитоидов (группа III): 16 – скважина в Городской больнице №34, г. Новосибирск; 8 – трещинно-жильные воды гранитоидов в условиях антропогенного влияния (группа IV): 17 – скважина глубиной 18 м в Покровском Александро-Невском женском монастыре, р.п. Колывань; 9 – поверхностные воды (группа V): 18 – протока р. Оби, 19 – р. 2-я Ельцовка, 20 – Озеро Х, истоки р. 2-я Ельцовка, 21 – р. Иня; 10 – поверхностные воды, подверженные влиянию процессов континентального засоления (группа VI): 22 – р. 2-я Ельцовка, зарегулированное русло по ул. Георгия Колонда; 11 – поверхностные воды в условиях антропогенного влияния (группа VII): 23 – р. Обь, Заельцовский бор; 24 – р. Иня, напротив источника №4; 25 – р. Иня, ниже источника №1; 26 – р. Иня, ближе к источнику №1. Инские источники: 12 – №1, 13 – №2, 14 – №3, 15 – №4, 16 – колодец, 17 – скважина, 18 – р. Иня, напротив источников; вмещающие породы: 19 – кальцитизированный сланец, 20 – известковый туф, 21 – сланец, 22 – выветрелый сланец

ГЕОХИМИЯ ПРИРОДНЫХ ВОД

Изученные воды четырех Инских источников умеренно пресные HCO_3 Mg-Ca состава с величиной общей минерализации от 389 до 536 мг/дм³, содержанием органического углерода 0,3-1,5 мг/дм³ и концентрацией кремния 4,14-8,61 мг/дм³. Отмечается рост величины общей минерализации от августа к ноябрю по всем изученным источникам на 24-89 мг/дм³, за исключением № 2, который оказался сухим. Геохимические параметры (рН, Eh и O_2) контролируются в первую очередь условиями залегания природных вод и характером их водообмена, что хорошо иллюстрируется полученными данными. Воды характеризуются рН от нейтральных до слабощелочных (7,1 – 8,4) с окислительной геохимической обстановкой с Eh +205,3 – +231,8 мВ и содержанием O_2 раств. 6,24 – 12,26 мг/дм³. В источнике № 3 выявлена значительная связь с поверхностными водами, что проявляется слабощелочными рН 8,3-8,4 и содержанием O_2 раств. до 12,26 мг/дм³.

Анализ геохимических коэффициентов (Ca/Na, Ca/Mg, Ca/Si, Mg/Si, Na/Si, Si/Na, rNa/rCl и SO_4/Cl) позволил отнести четыре Инских источника к водам зоны региональной трещиноватости. Трещинно-жильные радоновые воды Новосибирского гранитоидного массива характеризуются средними отношениями Ca/Na = 3,6; Ca/Mg = 2,9; Ca/Si = 14,0; Mg/Si = 4,9; Na/Si = 3,9; Si/Na = 0,3; rNa/rCl = 1,7 и SO_4/Cl = 2,0. Источники же значительно отличаются по величинам всех геохимических коэффициентов. Так, Ca/Na = 13,2; Ca/Mg = 6,3; Ca/Si = 13,7; Mg/Si = 2,2; Na/Si = 1,1; Si/Na = 1,0; rNa/rCl = 2,0 и SO_4/Cl = 2,5. Более чем 10-ти кратное пропорциональное превышение концентраций кальция и натрия над концентрациями кремния в водах источников свидетельствует об алюмосиликатном составе водовмещающих отложений. По результатам геофизических исследований (метод сопротивлений в модификации электротомографии) установлена ослабленная трещиноватая зона между источниками №№ 2 и 3, а также высокоомный объект со значениями УЭС 1000-4000 Ом·м, что может предполагать наличие дайки спессартитов, кварцевых монцодиорит-порфириров, широко развитых в изучаемом районе.

В сравнении с ними в Святом источнике в с. Верх-Тула, также приуроченном к отложениям юргинской свиты (D_3jur) концентрации кальция только вдвое превышают концентрации натрия при соизмеримых отношениях натрия и магния к кремнию. Его отличают следующие значения коэффициентов: Ca/Na = 2,7; Ca/Mg = 2,4; Ca/Si = 15,9; Mg/Si = 7,2; Na/Si = 6,0; Si/Na = 0,2; rNa/rCl = 22,3 и SO_4/Cl = 3,0. Воды Святого ис-

точника можно считать фоновыми. Они собственно пресные HCO_3 Na-Mg-Ca состава с величиной общей минерализации от 587 до 686 мг/дм³, содержанием органического углерода 0,4-1,7 мг/дм³ и концентрацией кремния 4,07-6,62 мг/дм³. Воды нейтральные рН (7,4-7,5) с восстановительными условиями геохимической среды с Eh -66,7 – -44,9 мВ и содержанием O_2 раств. 0,54 – 2,54 мг/дм³.

Изучение микроэлементного состава вод Инских источников показало их унаследованный характер по сравнению с вмещающими породами и корреляцию всех основных положительных и отрицательных пиков, за исключением урана и палладия. На спектре распределения микроэлементов в водах наиболее высокие содержания отмечаются у (мг/дм³): Sr (до 0,54), Fe (до 0,18), В (до 0,03), Ва (до 0,02), Al (до $7,9 \cdot 10^{-2}$), Br (до $5,6 \cdot 10^{-2}$), I (до $8,1 \cdot 10^{-3}$), U (до $4,1 \cdot 10^{-3}$), а наиболее низкие у Pd (до $8,4 \cdot 10^{-6}$), Tm (до $1,2 \cdot 10^{-6}$), In (до $7,6 \cdot 10^{-7}$) и Bi (до $6,1 \cdot 10^{-7}$). В августе наблюдался рост концентраций от первого источника к четвертому по (мг/дм³): Br до $4,2 \cdot 10^{-2}$, Li до $7,6 \cdot 10^{-3}$, U до $4,1 \cdot 10^{-3}$, Cu до $3,9 \cdot 10^{-4}$ и Th до $3,6 \cdot 10^{-6}$. В ноябре отмеченная тенденция сохраняется у Br, Li и U.

Активность ^{222}Rn в Инских источниках изменяется в диапазоне от 7 до 149 Бк/дм³. Вариация активности радона в источниках имеет следующий вид (Бк/дм³): № 1 (66-112), № 2 (47-56), № 3 (7-20), № (65-149). Подтверждается связь с поверхностными водами в источнике № 3 низкой активностью радона. Суммарная α активность вод составляет 3-4 мБк/дм³, а β -активность 11-15 мБк/дм³. Природные радионуклиды содержатся в водах в следующих пределах (мг/дм³): ^{238}U от $2,83 \cdot 10^{-3}$ до $4,13 \cdot 10^{-3}$; ^{232}Th от $2,39 \cdot 10^{-6}$ до $1,16 \cdot 10^{-5}$ и ^{226}Ra от $3,83 \cdot 10^{-10}$ до $4,93 \cdot 10^{-10}$. $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение в водах варьирует в интервале от $8,85 \cdot 10^{-4}$ до $3,61 \cdot 10^{-3}$, а в породах составляет 0,3-27,8, при среднем значении 14,0. Активность изотопов составляет у (мБк/дм³): ^{234}U (117-124), ^{238}U (38-48), ^{226}Ra (14-18) и ^{228}Ra (5,7-7,4). Уранизотопное отношение (γ) $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в Инских источниках варьирует в интервале от 2,6 до 3,2, что говорит о неглубокой циркуляции этих вод по сравнению с водами Святого источника в с. Верх-Тула, в которых $\gamma = 1,3$.

Использование стабильных изотопов ($\delta^{18}\text{O}$, δD и $\delta^{13}\text{C}$) завоевало широкую популярность при исследовании динамики природных вод, их генезиса и гидрогеохимических эффектов при взаимодействии воды и пород [6]. При интерпретации данных по стабильной изотопии кислорода и водорода обычно оперируют глобальной (Global Meteoric Water Line - GMWL) и локальной (Local Meteoric Water Line - LMWL)

линиями метеорных вод. Первая, предложенная Г. Крейгом [9], описывает глобальное среднегодовое соотношение между изотопными отношениями δD и $\delta^{18}O$ (рис. 3а) в природных метеорных водах уравнением $\delta D = 8.0 \cdot \delta^{18}O + 10$. Линия LMWL, представляющая соотношение указанных изотопов в заданной области, может существенно отличаться от GMWL. На момент исследования, данные по изотопным соотношениям δD и $\delta^{18}O$ вод НГА очень ограничены [13-14]. Они могут быть описаны уравнением $\delta D = 7.5 \cdot \delta^{18}O - 5$. Изотопный анализ отобранных образцов вод показал довольно широкую вариацию изотопных отношений δD (от -139 ‰ до -113 ‰) и $\delta^{18}O$ (от -19 ‰ до -15 ‰). Тем не менее, из рис. 1б хорошо видно, что для всех исследованных вод пара изотопных отношений δD - $\delta^{18}O$ располагается между локальной и глобальной линиями метеорных вод. Это позволяет сделать вывод об инфильтрационном происхождении природных вод исследуемого региона.

Данные по изотопному составу растворенного неорганического углерода (dissolved inorganic carbon – DIC) вод, $\delta^{13}C_{DIC}$, позволяют сделать выводы о взаимодействии вод с окружающей средой, обнаружить вероятные источники гидрокарбонат-иона в водах, среди которых можно выделить гидролиз карбонат-содержащих пород, так называемый почвенный CO_2 , атмосферный диоксид углерода, а также органическую (биогенную) угольную кислоту [10-11]. Изотопные отношения $\delta^{13}C_{DIC}$ исследованных вод НГА варьируют в диапазоне от -9,0 ‰ до -14,0 ‰ (см. рис. 1в). Согласно данным [3], значение $\delta^{13}C$ атмосферного CO_2 в широтах Новосибирской области, в зависимости от времени года, колеблется от -8,0 до -9,0 ‰. С учетом этого значения и обеднения соотношения $\delta^{13}C$ тяжелым изотопом на 1,2 ‰ за счет фракционирования при переходе из атмосферного CO_2 в гидрокарбонат-ион [15], ожидаемое значение $\delta^{13}C_{DIC}$ дождевой воды должно варьировать в диапазоне от -9,2 до -10,2 ‰. Очевидно, что ряд образцов (область I), представленных в настоящей работе, попадает в эти рамки и происхождение гидрокарбонат-иона этих вод, по видимому, носит атмосферный характер.

Между тем, большая часть представленных вод имеет более легкие изотопные отношения $\delta^{13}C_{DIC}$ (область II). Наиболее вероятным источником легких изотопов углерода в поверхностных водах представляется почвенная угольная кислота, сформированная как при проникновении атмосферного CO_2 в почвы, так и в ходе биогенного распада углерод-содержащих органических остатков (в основном, растительного происхождения), содержащихся в почвах. В

зависимости от доминирования растений с определенным типом фотосинтеза (C3 или C4) в исследуемом ареале, изотопный состав углерода остатков этих растений может сильно варьировать. Согласно данным [33, 40], значения $\delta^{13}C_{DIC}$ в диапазоне от -9 до -14 ‰ характерны для вод, взаимодействующих с силикатными и карбонатными породами, содержащими остатки растений типа C3.

ГЕОХИМИЯ ВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Вмещающие породы представлены глинистыми сланцами темно-серого (до черного), иногда серого (более светлые разновидности выветрелого облика) цвета, с небольшой примесью алевроитового, песчано-алевритового материала (от первых % до 15%) и тонко-микрокристаллического кальцита (от первых % до 35-40%). В разной степени (в основном незначительно) проявлены тонкодисперсное ОВ и пирит. Встречаются редкие включения окислов-гидроокислов железа и пятнистое ожелезнение вдоль плоскостей сколов. Характерны субплоскостные и наклонные тонкие трещинки, vyplненные кальцитом. По данным рентгенофазового анализа в составе сланцев преобладающая глинистая часть представлена хорошо окристаллизованными слюдой мусковитового типа и, вероятно, парагонитом (от 25 до 45%), Mg, иногда Fe-Mg хлоритом (5-20%), установлены также кварц (20-35%), полевые шпаты (10-25%), кальцит. В качестве незначительных примесей отмечаются сидерит (?), пирит, пирротин, псиломелан (?), гранат, амфибол, цеолит (филипсит).

Второй тип вмещающих пород представлен известняком (известковым туфом) светлым коричневато-серым, участками белесым, сильно пористым, натечной текстуры, микритовым, участками яснокристаллическим, с неравномерно распределенной незначительной примесью мелкоалевритового материала. По результатам электронномикроскопических исследований в составе примеси установлены альбит, калиевый полевой шпат, кварц, амфибол, апатит, эпидот, рутил, титанит, ильменит, магнетит, хлорит. Кальцит в почковидных микритовых образованиях имеет чистый состав, а в яснокристаллических участках в нем появляется небольшая примесь Mg. В известковом сланце в кальците отмечена примесь Fe, Mg, Mn, Sr.

Изученный изотопный состав C и O кальцита вмещающих пород характеризуется близкими значениями для большей части образцов: $\delta^{13}C$ варьирует в узких пределах – от -3,1 до -2,7 ‰, $\delta^{18}O$ – от 17,2 до 18,4 ‰ (см. рис. 1г). Лишь для образца выветрелого глинистого сланца (№ 816) отмечено облегчение изотопного состава

как по углероду (до -11,0 ‰), так и по кислороду (до 13,9 ‰). Также этот образец по результатам геохимических исследований характеризуется существенным снижением (в несколько раз) содержания всех элементов-примесей (кроме U), свидетельствующим об активном проявлении процессов выщелачивания на отдельных участках разреза. В остальных образцах содержания элементов-примесей достаточно выдержаны. Спектры РЗЭ (нормирование относительно хондритовых метеоритов) характеризуется слабым отрицательным наклоном, фиксирующим относительное снижение тяжелых РЗЭ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Резюмируя вышесказанное можно сделать следующие выводы: 1) Установлено, что воды Инских источников умеренно пресные $\text{HCO}_3^- \text{Mg-Ca}$ состава с величиной общей минерализации от 389 до 536 мг/дм³, содержанием органического углерода 0,3-1,5 мг/дм³ и концентрацией кремния 4,14-8,61 мг/дм³. Они характеризуются рН от нейтральных до слабощелочных (7,1 – 8,4), окислительной геохимической обстановкой с Eh +205,3 – +231,8 мВ и содержанием O_2 раств. 6,24 – 12,26 мг/дм³. 2) Активность ^{222}Rn в Инских источниках изменяется в диапазоне от 7 до 149 Бк/дм³. Природные радионуклиды содержатся в водах (мг/дм³): ^{238}U ($2,83 \cdot 10^{-3}$ – $4,13 \cdot 10^{-3}$); ^{232}Th ($2,39 \cdot 10^{-6}$ – $1,16 \cdot 10^{-5}$) и ^{226}Ra ($3,83 \cdot 10^{-10}$ – $4,93 \cdot 10^{-10}$). $^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$ отношение в водах составляет $8,85 \cdot 10^{-4}$ – $3,61 \cdot 10^{-3}$. $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ в Инских источниках составляет от 2,6 до 3,2, что говорит о неглубокой циркуляции этих вод по сравнению с водами Святого источника в с. Верх-Тула, в которых $\gamma = 1,3$. 3) По изотопному составу воды имеют инфильтрационное происхождение. Диапазон значений $\delta^{18}\text{O}$ в водах меняется от -17,1 до -16,7‰ со значениями δD от -128,4 до -126,2‰ и вариацией $\delta^{13}\text{C}$ в интервале -13,1 – -10,3‰.

Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025 и Российского фонда фундаментальных исследований и Правительства Новосибирской области в рамках научного проекта № 19-45-540004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Вернадский В.И. История минералов земной коры. История природных вод. – Л.: Госхимтехиздат, 1933. – Т. II. Часть 1. Вып. 1 – 202 с.
- 2 Гусев В.К., Вериге Е.К. Радоновые воды Колывань-Томской складчатой зоны, их использование и охрана // Изменение природных условий под влиянием деятельности человека, 1984. – С. 99–107.
- 3 Лаборатория глобальных наблюдений <http://www.cmdl.noaa.gov/ccgg/iadv/>
- 4 Новиков Д.А., Сухорукова А.Ф., Корнеева Т.В. Гидрогеология и гидрогеохимия Засельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод (юг Западной Сибири) // Геодинамика и тектонофизика, 2018. – Т. 9. – № 4. – С. 1255–1274.
- 5 Новиков Д.А., Деркачев А.С., Сухорукова А.Ф. Гидрогеохимия Засельцовско-Мочищенского проявления радоновых вод // Интерэкспо Гео-Сибирь, 2019. – Т. 2. – № 1. – С. 125–132.
- 6 Ферронский В.И., Поляков В.А. Изотопия гидросферы. – М.: Научный мир, 2009. – 632 с.
- 7 Шварцев С.Л. Взаимодействие воды с алюмосиликатными горными породами. Обзор // Геология и геофизика – № 12. – 1991. – С.16-50.
- 8 Шварцев С.Л. Прогрессивно самоорганизующиеся абиогенные диссипативные структуры в геологической истории Земли // Литосфера – № 1. – 2007. – С. 65-89.
- 9 Craig H. Isotopic variations in meteoric waters // Science. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
- 10 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.
- 11 Deirmendjian L., Abril G. Carbon dioxide degassing at the groundwater-stream-atmosphere interface: isotopic equilibration and hydrological mass balance in a sandy watershed // Journal of Hydrology. – 2018. – V. 558. – P. 129-143.
- 12 Novikov D.A., Korneeva T.V. Microelements in radon waters of the Zaelsovsky field (the southern part of West Siberia) // Journal of Physics: Conference Series, 2019. – V. 1172. № 012096.
- 13 Shemelina O., Sanchaa A., Faguet A. Isotopic characteristics ($\delta^{18}\text{O}$ and δD) of surface and groundwater as an additional tool for searching quality drinking water (Western part of Novosibirsk Region, Russia) // E3S Web of Conferences. – 2019. – V. 98. – № 12019.
- 14 The GNIP Database. <https://nucleus.iaea.org/wiser>
- 15 Zhang J., Quay P.D., Wilbur D.O. Carbon isotope fractionation during gas-water exchange and dissolution of CO_2 // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1995. – V. 59. – Issue 1. – P. 107-114.