

ХАРАКТЕРИСТИКА СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ В ПРИРОДНЫХ ВОДАХ БАССЕЙНА РЕКИ ВИТИМ

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

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

Анастасия Алексеевна Максимова

Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, 630090, Россия, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 3/6, инженер, e-mail: rock.nastaya64@gmail.com

В работе представлены первые данные комплексного анализа изотопных отношений водорода, кислорода вод и углерода растворенной углекислоты для одной из крупнейших рек Восточной Сибири – Витим, а также ряда ее притоков. Установлено, что значения δD и $\delta^{18}O$ изученных вод варьируют в диапазоне от -173,0 до -149,1‰ для водорода и от -23,3 до -20,2‰ для кислорода и указывают на метеорное происхождение вод. Содержание водорастворенного CO_2 в изученных водах изменяется со сменой ландшафта, при этом значения $\delta^{13}C_{DIC}$ варьируют от -17,1 до -9,0‰ и свидетельствуют об участии в формировании гидрокарбонат-иона почвенной диффузионной и вегетативной углекислоты.

Ключевые слова: река Витим, поверхностные воды, стабильные изотопы кислорода, водорода, углерода

CHARACTERISTICS OF STABLE ISOTOPES IN NATURAL WATERS OF THE VITIM RIVER BASIN

Aleksandr N. Pyrayev

Institute of Geology and Mineralogy V.S. Sobolev SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3, Akademika Koptyuga Ave., PhD, Researcher, e-mail: pyrayev@igm.nsc.ru

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

Anastasia A. Maksimova

Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics SB RAS, 630090, Russia, Novosibirsk, 3/6, Akademika Koptyuga Ave., engineer, e-mail: rock.nastaya64@gmail.com

In this paper first data of the complex analysis of the hydrogen, oxygen and carbon isotope composition in waters and dissolved inorganic carbon (DIC) of the largest East Siberia river Vitim and some of its inflows are presented. The δD and $\delta^{18}O$ values for waters under investigation indicating meteoric origin of waters and varies from -173,0 to -149,1 ‰ for hydrogen and from -23,3 to -20,2 ‰ for oxygen. Concentration of the DIC in waters depends on the type of landscape while $\delta^{13}C_{DIC}$ values varies from -17,1 to -9,0 ‰ and pointed out the participation of soil diffusion and vegetative CO_2 in formation of hydrocarbonate-ion.

Keywords: Vitim river, surface waters, stable oxygen, hydrogen and carbon isotopes

Река Витим, приток р. Лена, является одной из крупнейших рек Восточной Сибири, бассейн которой охватывает большую территорию (более 7,5 тыс. км²). На текущий момент природные воды сибирских рек и водоемов являются малоизученными с точки зрения стабильной изотопии О и Н вод, а также С растворенной углекислоты - DIC. И воды р. Витим и ее притоков не являются исключением, что следует расценивать как крупное упущение, поскольку вышеперечисленные параметры позволяют изучать историю вод прямыми методами [1-2]. Изотопные отношения кислорода и водорода, а также $\delta^{13}C_{DIC}$, за последние десятилетия зарекомендовали себя как надежный инструмент для решения вопросов генезиса природных вод, взаимодействия в системе «вода-порода-газ-органическое вещество», в исследованиях процессов водосбора, смешения водных потоков, межпластовых перетоков, переноса и седиментации влаги [3-7]. Получаемые изотопные данные позволяют оценить вклады индивидуальных источников в общее питание реки и ее притоков, оценить взаимодействие вод с окружающими породами и органическим веществом [8].

В ходе экспедиционных работ, проведенных в июне-июле 2019 г. было отобрано 20 проб вод как непосредственно из р. Витим, так и из ее притоков. Отбор проб проводился совместно с выполнением сейсморазведочных работ по реке Витим, предварительная пробоподготовка выполнялись в соответствии с общепринятыми методиками. На месте отбора пробы отфильтровывались через целлюлозный фильтр (0,45 мкм) для удаления взвеси с помощью системы вакуумной фильтрации, собирались в герметичные пробирки 50 мл, сверху обматывались парафильмом для минимизации газообмена с окружением при транспортировке и хранении. Точки отбора проб представлены на рисунке 1а. Исследование изотопного состава кислорода, водорода вод, а также углерода водорастворенной углекислоты проводилось в Аналитическом центре МИИ Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН на изотопном масс-спектрометре FinniganTM MAT 253, снабженном приставками пробоподготовки H/Device и GasBench II. Изотопные отношения кислорода и углерода в воде определялись в соответствии с известными методиками [9-12] с применением приставки пробоподготовки GasBench II. Анализ водородных изотопных отношений проводился с помощью приставки пробоподготовки H/Device в соответствии с методикой, представленной в работе [3]. Все измерения проводились относительно материалов сравнения Международного агентства по атомной энергии: NBS-18 и NBS-19 - при измерениях $\delta^{13}C$ в водах; VSMOW2, SLAP2 и GISP – при изме-

рениях δD и $\delta^{18}O$ в водах [13]. Погрешность измерений не превышала 0,1 ‰ при анализе изотопного состава углерода, 0,2 ‰ – кислорода и 2 ‰ – водорода.

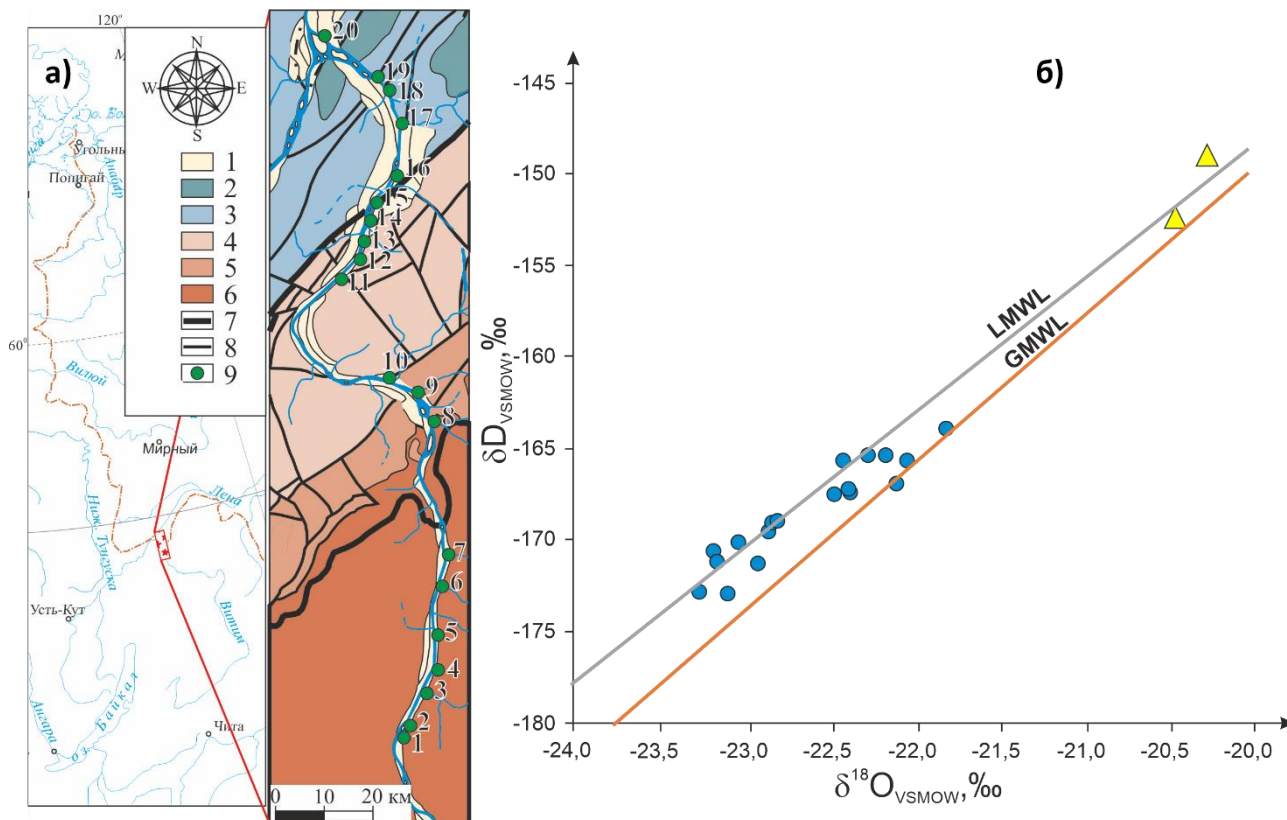


Рис. 1: а – карта-схема отбора проб (описание представлено в таблице), Отложения: 1 – четвертичные; 2 – ордовикские; 3 – кембрийские; 4 – вендские; 5 – рифейские; 6 – чуйско-нечерский гранитоидный комплекс; 7 – надвижки; 8 – разломы; 9 – точки отбора проб воды: 1 – р. Витим, 2 – ручей №4, 3 – р. Максимиха, 4 – ручей №2, 5 – ручей №1, 6 – р. Иваниха, 7 – р. Барщиха, 8 – р. Верхняя Язовая, 9 – р. Корюха, 10 – ручей №4, 11 – р. Теплая, 12 – р. Желтовская, 13 – ручей №5, 14 – р. Коробова, 15 – руч. Мысовой, 16 – р. Пыдриха, 17 – р. Быстрая, 18 – руч. Силинский, 19 – р. Дурная, 20 – устье р. Витим; б – Значения δD и $\delta^{18}O$ для природных вод р. Витим (треугольники) и ее притоков (кружки) относительно GMWL и LMWL

В таблице представлены данные по значениям δD и $\delta^{18}O$ изученных природных вод, а на рисунке 1 б они построены относительно глобальной (GMWL – Global Meteoric Water Line) [14] и локальной (LMWL – Local Meteoric Water Line) [15] линий метеорных вод. Локальная линия метеорных вод приведена для ближайшей точки наблюдений из представленных в Wiseg – для города Иркутска, находящегося в 500 км юго-восточной исследуемого района. Из представленных данных видно, что δD и $\delta^{18}O$ для изученных природных вод варьируют в широком интервале значений: от -173,0 до -149,1 ‰ для водорода и от -23,3 до -20,2 ‰ для кислорода. При этом для вод р. Витим характерны существенно более тяжелые изотопные отношения кислорода и водорода, что выделяет их в отдель-

ную группу (треугольники на рис. 1б). Полученные изотопные данные хорошо согласуются с трендом LMWL: большинство точек размещается в диапазоне значений между глобальной и локальной линиями метеорных вод, что указывает на превалирующее метеорное питание исследованных рек и ручьев. Климатические условия для источника влаги, выпадающей в виде осадков в исследованном районе, следует рассматривать как более холодный относительно усредненных условий, для которых построена глобальная зависимость $\delta D = 8 \times \delta^{18}O + 10$. Обогащение вод дейтерием относительно GMWL в природных водах при понижении климатической температуры источника влаги является активно обсуждаемым и многократно зафиксированным фактом [3, 16-17].

Положительные отклонения (кислородный сдвиг) значений $\delta^{18}O$ в изученных водах относительно LMWL могут быть обусловлены проявлением эффектов испарения вод уже на месте (сайтовых вод – site water), приводящего к обеднению кислородных изотопных отношений легким изотопом ^{16}O [4, 7]. Согласно [18], величина сдвига определяется внешними условиями и может достигать +4 ‰ при малых глубинах водоемов и высоких температурах окружения.

Таблица 1

Характеристика стабильных изотопов Н, О и С для природных вод
р. Витим и ее притоков

№ пробы на карте	Описание пробы	δD , ‰	$\delta^{18}O$, ‰	HCO_3^- , моль/л	$\delta^{13}C_{DIC}$, ‰
1	р. Витим	-149,1	-20,2	299	-14,2
2	Безымянный ручей № 3, приток р. Витим	-168,9	-22,8	115	-10,7
3	устье р. Максимиha, приток р. Витим	-170,1	-23,0	172	-10,4
4	Безымянный ручей № 2, приток р. Витим	-169,5	-22,8	77	-10,9
5	Безымянный ручей № 1, приток р. Витим	-169,0	-22,8	126	-10,5
6	р. Иваниха, приток р. Витим	-167,5	-22,5	140	-17,1
7	р. Барщиха, приток р. Витим	-170,6	-23,2	140	-14,4
8	р. Верх-Язoвая, приток р. Витим	-172,8	-23,3	140	-9,0
9	р. Корюха, приток р. Витим	-171,2	-23,2	267	-11,6
10	Безымянный ручей № 4, приток р. Витим	-173,0	-23,1	1149	-12,2
11	р. Тёплая, приток р. Витим	-165,6	-22,0	966	-9,0
12	р. Желтовская, приток р. Витим	-165,3	-22,1	1287	-12,7
13	Безымянный ручей № 5, приток р. Витим	-167,4	-22,4	1517	-14,1
14	р. Коробова, приток р. Витим	-165,7	-22,4	1011	-12,4
15	ручей Мысовой, приток р. Витим	-163,9	-21,8	1678	-11,6
16	р. Пыдриха, приток р. Витим	-165,4	-22,3	1126	-11,0
17	р. Быстрая, приток р. Витим	-167,2	-22,4	1057	-10,1
18	ручей Силинский, приток р. Витим	-171,3	-22,9	2299	-12,0
19	р. Дурная, приток р. Витим	-166,9	-22,1	1069	-14,8
20	Устье р. Витим	-152,5	-20,4	230	-11,6

Наглядно проявление этого эффекта можно увидеть при сравнении значений δD и $\delta^{18}O$, характеризующих воды р. Витим в начале и в конце маршрута исследования (то есть, для проб № 1 и 20, соответственно). Несмотря на близкие значения кислородных и водородных изотопных отношений в этих пробах, из рисунка 1б видно, что для вод, отобранных в конце маршрута, достигается максимальное проявление испарения вод. Наблюдается положительный кислородный сдвиг относительно LMWL, несмотря на то, что картина несколько смазана изменением самой пары значений δD и $\delta^{18}O$ ввиду их обогащения легкими изотопами 1H и ^{18}O от вод притоков.

В целом, для притоков р. Витим характерны более легкие кислородные и водородные изотопные отношения, что позволяет предположить смещение акцента их питания к осадкам более холодного времени года. Обогащение δD и $\delta^{18}O$ сайтовых метеорных вод легкими изотопами при понижении климатической температуры является хорошо изученным фактом, что было наглядно продемонстрировано в работе [19] для антарктических снегов.

Отдельного внимания заслуживают углеродные изотопные отношения в водорастворенной углекислоте. В таблице 1 и на рисунке 2а приведена изотопно-концентрационная характеристика DIC для изученных вод. Из представленных данных видно, что исследованные воды можно подразделить на 2 большие группы: низкоуглеродистые (с содержанием HCO_3^- менее 300 $\mu\text{моль/л}$), отмеченные на рисунке 2 серыми ромбами и высокоуглеродистые (содержание HCO_3^- более 900 $\mu\text{моль/л}$), - отмеченные серыми звездами. Здесь важно отметить, что при стандартных условиях (25 °С, рН = 5,5 и нормальной концентрации CO_2 в воздухе 360 ppmv), содержание углекислоты в метеорных водах (в основном, в виде HCO_3^-), поглощенной исключительно из атмосферной двуокиси углерода, не превышает 10 $\mu\text{моль/л}$ [20]. В нашем случае превышение концентрации водорастворенной углекислоты составляет от 8 до 230 раз. Соответственно, в большинстве случаев CO_2 , поглощенный водами исключительно из атмосферы может рассматриваться как несущественный. С точки отбора №10 (после р. Корюха), концентрация гидрокарбонат-иона в водах притоков р. Витим существенно возрастает (рис. 2б), что, обусловлено появлением обнажений карбонатных пород на площадях водосбора указанных водных потоков, поскольку окружающий ландшафт изменяется с гористого на пологий равнинный.

Кроме вышеописанной особенности возрастания содержания гидрокарбонат-иона в водах, для разных водотоков характерны индивидуальные тренды возрастания концентрации иона HCO_3^- : постепенное нарастание в случае рек Теплая, Коробова, Пыдриха, Быстрая, Дурная и ручья №5 (прерывистая линия на рис. 2б), и резкое – для реки Желтовская и ручьев №4, Мысового, Силинского (светло-серая линия на рис. 2б). Указанные особенности вполне закономерны. Известно, что насыщение вод DIC в большей степени проявляется для небольших потоков с малой скоростью и крупными площадями водосбора с активной биогенной/вегетативной деятельностью [21].

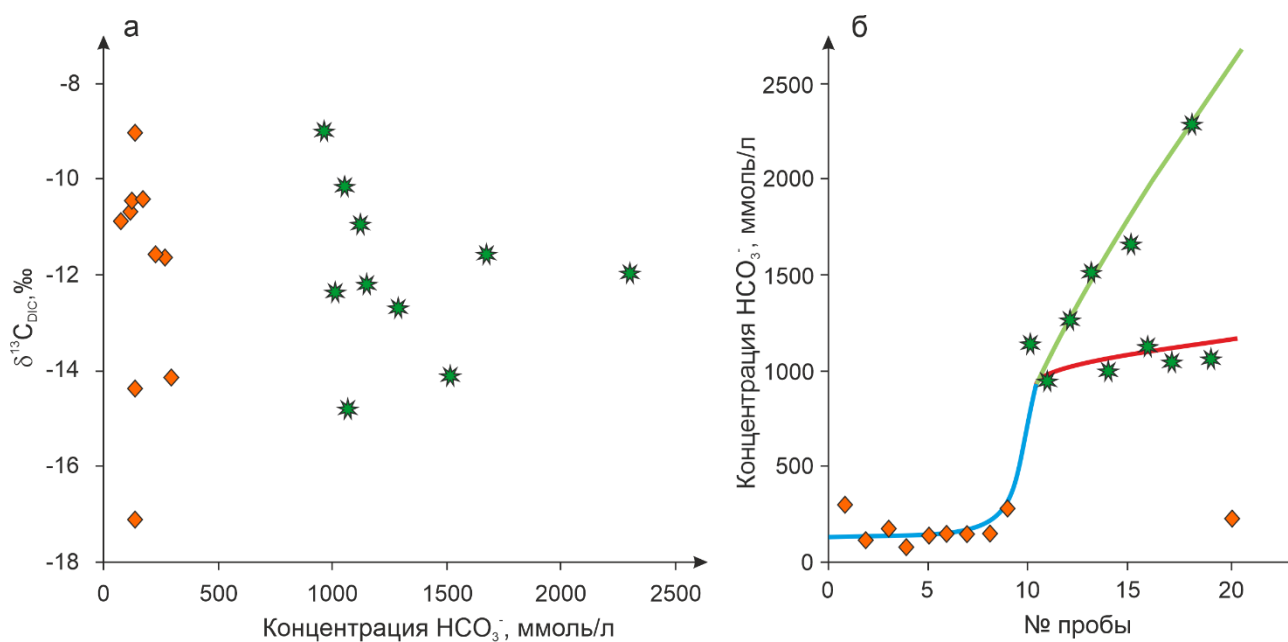


Рис. 2: а - изотопно-концентрационная характеристика DIC изученных вод;
 б – вариация концентраций иона HCO_3^- в исследованных водах.
 Пояснения см. в тексте

Содержание углекислоты в изученных водах явно указывает на участие в ее формировании почвенной углекислоты, которая, в свою очередь, может быть образована по диффузионному и биогенному механизму для верхних слоев почв [20]. Диффузионная почвенная углекислота наследует изотопный состав атмосферного CO_2 (около $-8,0$ ‰), в то время как изотопный состав биогенной определяется типом фотосинтеза растений, перерабатывающих воздушную двуокись углерода.

Для растений с фотосинтезом C_3 значения $\delta^{13}\text{C}$ составляют $-27,8 \pm 2$ ‰ [20] и углекислота, высвобождаемая при распаде останков таких растений, обогащена легкими изотопами.

Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в изученных водах варьируют от $-17,1$ до $-9,0$ ‰. Четкой корреляции между содержанием углекислоты в водах и изотопными отношениями углерода DIC не наблюдается. Очевидно, это обусловлено многообразием источников водорастворимой формы углерода в исследованных водах. В целом, полученные значения углеродных дельт и содержания водорастворенного CO_2 в водах явно свидетельствуют об участии в его формировании почвенной углекислоты от диффузионной (то есть поглощенной почвами из атмосферы) для изотопно-тяжелых значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ до вегетативной (то есть, произведенной при участии растений с фотосинтезом типа C_3) – для изотопно-легких значений $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ [20].

Таким образом, в настоящей работе было установлено метеорное питание вод р. Витим и ее притоков. Вклад притоков в изученном регионе в общий изотопный состав реки – несущественный, воды последней отличаются более тяже-

лыми изотопными отношениями кислорода и водорода, что указывает на смещение акцента питания вод реки осадками теплого времени года. Содержание DIC в водах изученных рек и ручьев возрастает с переходом от гористого на равнинный ландшафт. Значения $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ в изученных водах варьируют от -17,1 до -9,0 ‰ и свидетельствуют об участии в его формировании почвенной диффузионной и вегетативной углекислоты.

Исследования проводились при финансовой поддержке проекта ФНИ № 0331-2019-0025 и РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-70074 «Ресурсы Арктики».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 8th edition. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. – 460 p.
2. Stefánsson A., Arnorsson S., Sveinbjörnsdóttir A.E., Heinemaier J. Isotope ($\delta\text{D}, \delta^{18}\text{O}, ^3\text{H}, \delta^{13}\text{C}, ^{14}\text{C}$) and chemical (B, Cl) Constrains on water origin, mixing, water-rock interaction and age of low-temperature geothermal water // Applied Geochemistry. – 2019. – V. 108. – 104380.
3. 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.
4. Chafouq D., Mandour A.El, 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. – V. 139. – P. 1-13.
5. Mickler P.J., Carlson P., Banner J.L., Breecker D.O., Stern L., Guilfoyle A. Quantifying carbon isotope disequilibrium during in-cave evolution of drip water along discrete flow paths. Geochimica et Cosmochimica Acta. – 2019. – V. 244. – P. 182-196.
6. Mora G., Blaser L. Effect of catchment lithology on dissolved inorganic carbon budgets in suburban streams of Baltimore, Maryland, during rainfall minima / Geosciences Journal. – 2020. – V. 24. – № 1. – P. 85-96.
7. 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. – 106445. – 15 p.
8. Новиков Д.А., Максимова А.А., Пыряев А.Н., Ян П.А. Первые изотопно-гидрогеохимические данные по природным водам юго-восточного склона кряжа Чекановского (Арктические районы Сибирской платформы) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 11. – С. 157–167.
9. Epstein S., Mayeda T. // Geochimica et Cosmochimica Acta. – 1953. – V. 4. – P. 213-224.
10. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analyzed by continuous flow methods // Rapid Commun. Mass Spectrom. – 2000. – V. 14. – P. 1044-1046.
11. Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczebak D., Jedrysek M.-O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO_2 // Environmental Pollution. – 2011. – V. 159. – P. 294-301.
12. Evans, M. N., Selmer, K. J., Breeden III, B. T., Lopatka, A. S., and Plummer, R. E. Correction algorithm for online continuous flow $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ carbonate and cellulose stable isotope analyses / Geochem. Geophys. Geosyst. – 2016. – 17. – C. 3580–3588.

13. [Электронный ресурс] URL:<https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx>.
14. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
15. [Электронный ресурс] URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>
16. Andreo B., Linan C., Carrasco F., Jimenez de Cisneros C., Caballero F., Mudry J. 27. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition (^{18}O and ^2H) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain) // *Applied Geochemistry*. – 2004. – V. 19. – P. 561–574.
17. Bagheri R., Bagheri F., Karami G. H., Jafari H. Chemo-isotopes (^{18}O & ^2H) signatures and HYSPLIT model application: Clues to the atmospheric moisture and air mass origins // *Atmospheric Environment*. – 2019. – V. 215. – article 116892.
18. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil–vegetation–atmosphere system: Stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration // *Physics and Chemistry of the Earth*. – 2010. – V. 35. – P. 565–570.
19. Ma T., Li L., Li Y., An C., Yu J., Ma H., Jiang S., Shi G. Stable isotopic composition in snowpack along the traverse from a coastal location to Dome A (East Antarctica): Results from observations and numerical modeling // *Polar Science*. – 2020. – V. 24. – 100510.
20. 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. – Issues 1–2. – P. 419–429.
21. Deirmendjian L., Anschutz P., Morel C., Mollier A., Augusto L., Loustau D., Cotovicz L.C., Jr, Buquet D., Lajaunie K, Chaillou G, Voltz B., Charbonnier C., Poirier D., Abril G. Importance of the vegetation-groundwater-stream continuum to understand transformation of biogenic carbon in aquatic systems - a case study based on a pine-maize comparison in a lowland sandy watershed (Landes de Gascogne, SW France) *Science of the Total Environment*. – 2019. – V. 661. – P. 613–629.

REFERENCES

1. Hoefs J. Stable isotope geochemistry. 8th edition. Springer Textbooks in Earth Sciences, Geography and Environment. Springer International Publishing AG, part of Springer Nature, 2018. – 460 p.
2. Stefánsson A., Arnorsson S., Sveinbjörnsdóttir A.E., Heinemaier J. Isotope ($\delta\text{D}, \delta^{18}\text{O}, \delta^3\text{H}, \delta^{13}\text{C}, \delta^{14}\text{C}$) and chemical (B, Cl) Constrains on water origin, mixing, water-rock interaction and age of low-temperature geothermal water // *Applied Geochemistry*. – 2019. – V. 108. – 104380.
3. Kopecký, 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.
4. Chafouq D., Mandour A.El, 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. – V. 139. – P. 1–13.
5. Mickler P.J., Carlson P., Banner J.L., Breecker D.O., Stern L., Guilfoyle A. Quantifying carbon isotope disequilibrium during in-cave evolution of drip water along discreet flow paths. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. – 2019. – V. 244. – P. 182–196.
6. Mora G., Blaser L. Effect of catchment lithology on dissolved inorganic carbon budgets in suburban streams of Baltimore, Maryland, during rainfall minima / *Geosciences Journal*. – 2020. – V. 24. – № 1. – P. 85–96.
7. 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. – 106445. – 15 p.

8. Novikov D.A., Maksimova A.A., Pyrjaev A.N., Jan P.A. Pervye izotopno-gidrogeohimicheskie dannye po prirodnyim vodam jugo-vostochnogo sklona krjazha Chekanovskogo (Arkticheskie rajony Sibirskoj platformy) // *Izvestija Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov.* – 2020. – T. 331. – № 11. – S. 157–167.
9. Epstein S., Mayeda T. // *Geochimica et Cosmochimica Acta.* – 1953. – V. 4. – P. 213-224.
10. Nelson S.T. A simple, practical methodology for routine VSMOW/SLAP normalization of water samples analyzed by continuous flow methods // *Rapid Commun. Mass Spectrom.* – 2000. – V. 14. – P. 1044-1046.
11. Górka M., Sauer P.E., Lewicka-Szczebak D., Jedrysek M.-O. Carbon isotope signature of dissolved inorganic carbon (DIC) in precipitation and atmospheric CO₂ // *Environmental Pollution.* – 2011. – V. 159. – P. 294-301.
12. Evans, M. N., Selmer, K. J., Breeden III, B. T., Lopatka, A. S., and Plummer, R. E. Correction algorithm for online continuous flow δ¹³C and δ¹⁸O carbonate and cellulose stable isotope analyses / *Geochem. Geophys. Geosyst.* – 2016. – 17. – C. 3580– 3588.
13. [Jelektronnyj resurs] URL:<https://nucleus.iaea.org/sites/ReferenceMaterials/Pages/Stable-Isotopes.aspx>.
14. Craig H. Isotopic variations in meteoric waters. *Science.* – 1961. – V. 133. – P. 1702–1703.
15. [Jelektronnyj resurs] URL: <https://nucleus.iaea.org/wiser/index.aspx>
16. Andreo B., Linan C., Carrasco F., Jimenez de Cisneros C., Caballero F., Mudry J. 27. Influence of rainfall quantity on the isotopic composition (¹⁸O and ²H) of water in mountainous areas. Application for groundwater research in the Yunquera-Nieves karst aquifers (S Spain) // *Applied Geochemistry.* – 2004. – V. 19. – P. 561–574.
17. Bagheri R., Bagheri F., Karami G. H., Jafari H. Chemo-isotopes (¹⁸O & ²H) signatures and HYSPLIT model application: Clues to the atmospheric moisture and air mass origins // *Atmospheric Environment.* – 2019. – V. 215. – article 116892.
18. Wenninger J., Beza D.T., Uhlenbrook S. Experimental investigations of water fluxes within the soil–vegetation–atmosphere system: Stable isotope mass-balance approach to partition evaporation and transpiration // *Physics and Chemistry of the Earth.* – 2010. – V. 35. – P. 565–570.
19. Ma T., Li L., Li Y., An C., Yu J., Ma H., Jiang S., Shi G. Stable isotopic composition in snowpack along the traverse from a coastal location to Dome A (East Antarctica): Results from observations and numerical modeling // *Polar Science.* – 2020. – V. 24. – 100510.
20. 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. – Issues 1–2. – P. 419-429.
21. Deirmendjian L., Anschutz P., Morel C., Mollier A., Augusto L., Loustau D., Cotovicz L.C., Jr, Buquet D., Lajaunie K, Chaillou G, Voltz B., Charbonnier C., Poirier D., Abril G. Importance of the vegetation-groundwater-stream continuum to understand transformation of biogenic carbon in aquatic systems - a case study based on a pine-maize comparison in a lowland sandy watershed (Landes de Gascogne, SW France) *Science of the Total Environment.* – 2019. – V. 661. – P. 613-629.

© А. Н. Пырjаев, Д. А. Новиков, А. А. Максимова, 2021