

УДК 556.314

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) ПОДЗЕМНЫХ ВОД ТЕРРИТОРИИ ТОРЕЙСКИХ ОЗЕР (ВОСТОЧНОЕ ЗАБАЙКАЛЬЕ)

Лепокурова Олеся Евгеньевна^{1,2},
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Дребот Валерия Витальевна^{1,2},
DrebotVV@ipgg.sbras.ru

¹ Томский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический, 4.

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность работы связана с проблемой дефицита пресных водных ресурсов аридных областей, решение которой невозможно без понимания условий и механизмов формирования состава вод в природной обстановке.

Цель: на основе новых данных о стабильных изотопах воды ($\delta^{18}\text{O}$, δD), растворенного углерода и серы ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) дополнить информацию о генезисе и условиях формирования подземных вод.

Объекты: подземные воды верхней динамической зоны района Торейских озер (Восточное Забайкалье) – родники, колодцы и скважины глубиной до 70 м, частично речные и озерные воды.

Методы: изотопные исследования воды и растворенных С и S были выполнены на масс-спектрометре Finnigan-MAT 252 (Германия) в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН; макрокомпонентный состав вод – современными стандартными методами: титриметрическим, потенциометрическим, фотометрическим, атомно-абсорбционной спектрометрией с пламенной атомизацией и пламенной атомно-эмиссионной спектрометрией в ИПРЭК СО РАН.

Результаты. Приведены новые данные по изотопному составу (H и O) подземных вод верхней гидродинамической зоны района Торейских озер, а также растворенных С и S. Отмечается высотная зональность в их распределении. На основе полученных результатов, а также данных по озерным, частично метеорным водам, сделаны выводы о генезисе и условиях формирования: воды инфильтрационные с небольшим влиянием испарительных процессов (смешение с озерными водами). Отмечен достаточно однородный изотопный состав подземных вод, несмотря на различия в химическом составе. Не выявлены связи между изотопным составом и соленостью, основными ионами и pH в пределах подземных вод, но общая эволюция состава в направлении «атмосферные–подземные–озерные воды» характеризуется увеличением общей минерализации, pH и обогащением изотопами ^{18}O , ^2H , ^{13}C .

Ключевые слова:

Подземные воды верхней динамической зоны, изотопный состав, Торейские озера, Восточное Забайкалье, генезис.

Введение

Проблеме формирования химического состава подземных вод в условиях аридного климата уделяется все больше внимания в связи с дефицитом пресных водных ресурсов и необходимостью рационального их использования, особенно в условиях возрастающей антропогенной нагрузки. Пресные подземные воды зачастую являются единственным питьевым источником в таких регионах. При этом все чаще ученые привлекают для данных целей изотопные исследования, которые позволяют решать различные научные и прикладные задачи, кроме генезиса и возраста вод [1–6] это также: выявление источника засоления [7–9], наличия испарения [10], влияния климатических изменений [11], источника питания или возможности смешения с поверхностными [1, 3, 4, 9, 11–15] и морскими водами [7, 9, 16, 17], влияния взаимодействия системы вода–порода [5, 16], наличия антропогенного загрязнения [10], установление направления и скорости движения вод [13, 18], первоисточников растворенных в воде веществ [4, 12] и т. д., чаще эти задачи вытекают одна из другой, их трудно дифференцировать и они решаются в комплексе [1, 3–5, 9–13].

В качестве объекта исследования нами выбраны подземные воды верхней динамической зоны территории Торейских озер, относительно хорошо уже нами изученные на химический состав [19–21]. Район юго-восточного Забайкалья характеризуется одновременно как резко континентальным засушливым климатом, так и существующей проблемой содового засоления вод, являясь при этом развитым сельскохозяйственным регионом. Кроме того, эта территория широко известна своими многочисленными и разнообразными по составу солёными озерами, химический и изотопный состав которых был детально изучен С.В. Борзенко в работах [22–24]. Однако, как показано в наших предыдущих исследованиях [19, 20], химический состав подземных вод отличается не меньшим разнообразием уже на первых этапах взаимодействия системы вода–порода, начиная с первых метров глубины. Здесь, в пределах сравнительно небольшой площади, благодаря засушливому климату, существующим геолого-геоморфологическим условиям, наличию трещиноватых вулканогенных структур, обеспечивающих смешение вод, при непрерывном взаимодействии системы вода–порода сформировались разные типы подземных вод [20]. Все они

отличаются по химическому составу, pH и солёности, а также степени удаленности от озёр. В рамках исследования условий формирования состава данных вод на первый план встала задача детального изучения стабильных изотопов, ранее здесь не изученных, как наиболее информативных при выявлении генезиса вод, роли испарительного концентрирования, а также наличия смешения с поверхностными и озерными водами.

Таким образом, цель настоящего исследования – уточнение условий и основных процессов, контролирующих формирование подземных вод в аридной зоне юго-восточного Забайкалья на основе данных о стабильных изотопах воды ($\delta^{18}\text{O}$, δD), растворенного углерода и серы ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$).

Методы исследования

Отбор проб был проведен в летние периоды с 2017 по 2019 гг. совместными усилиями сотрудников Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука Сибирского отделения Российской академии наук (ТФ ИНГГ СО РАН) и Института природных ресурсов, экологии и криологии Сибирского отделения Российской академии наук (ИПРЭК СО РАН, г. Чита). При этом основной акцент был сделан на опробовании подземных вод, однако без изучения озёрных и речных вод исследование было бы не полным. Всего на изотопный состав, но не на все виды анализов, отобрано: 1 проба речных вод (р. Борзя), 8 проб озёр и 37 подземных (родники, колодцы и скважины глубиной до 70 м). Также для построения локальной линии метеорных вод использовались данные по пресным поверхностным водам региона из работ [23, 24].

Химический состав вод был определен в аттестованной лаборатории геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН титриметрическим (CO_3^{2-} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-), потенциометрическим (F⁻), фотометрическим (Si, P) методом, а также атомно-абсорбционной спектрометрией с пламенной атомизацией (Ca^{2+} , Mg^{2+}) и пламенной атомно-эмиссионной спектрометрией (Na^+ , K^+). pH, Eh и температура воды определялись на месте *in situ* с помощью мультиметра AMTAST AMT03 (США). Общая минерализация была определена расчетным методом как сумма ионов. Изотопные исследования воды были выполнены в Аналитическом центре Дальневосточного геологического института Дальневосточного отделения Российской академии наук (ДВГИ ДВО РАН) на масс-спектрометре Finnigan-MAT 252 (Германия). Результаты приводятся в промилле (‰) относительно стандарта SMOW для $\delta^{18}\text{O}$, δD ; PDB для $\delta^{13}\text{C}$ и CDT для $\delta^{34}\text{S}$. Погрешность анализа 1σ по кислороду $\pm 0,15\text{‰}$ и по водороду $\pm 1,2\text{‰}$, по углероду и сере $\pm 0,1\text{‰}$. Определены 33 $\delta^{18}\text{O}$ и δD , 32 $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ гидрокарбонат-иона ($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) и 9 $\delta^{34}\text{S}$ в сульфатах (SO_4^{2-}) и 1 в S^2 .

Обзорная карта района исследований со схемой опробования была подготовлена с помощью программного пакета ArcGIS с использованием данных о высотах SRTM.

Объект исследования

Район исследования расположен на юго-востоке Забайкальского края практически на стыке трех стран: России, Монголии и Китая, простираясь в пределах от 49° до 51° с.ш. и от 114° до 117° в.д., и является частью Государственного природного биосферного заповедника «Даурский», который с 2017 г. в составе российско-монгольского объекта «Ландшафты Даурии» внесен в список Всемирного наследия ЮНЕСКО. Рельеф территории в большей степени представлен Торейской впадиной неправильно-изометрической формы, большая часть которой занята бессточными озёрами Барун-и Зун-Торей [25], а также российской частью их водосбора, и охватывает площадь порядка 10000 км^2 . В целом же район является частью Улдза-Торейской высокой равнины восточного Забайкалья, которая простирается за пределы Российской Федерации на территорию Монголии с абсолютными отметками рельефа от 600 м и выше. Участки заповедника, расположенные вблизи Торейских озёр, относятся к Монгольской степной провинции (Восточномонгольская подпровинция) и генетически связаны со степными центрально-азиатскими ландшафтами Монголии [26].

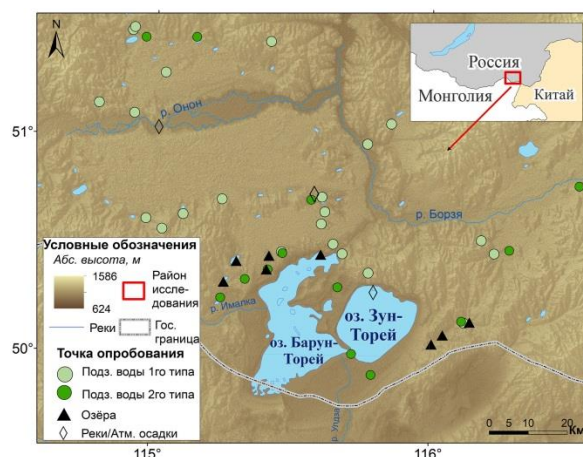


Рис. 1. Обзорная карта района исследования со схемой отбора проб природных вод

Fig. 1. Map showing case study region and sampling locations along with the water type assigned to each sample

Удаленность района от морей и океанов, его положение внутри огромного материка, а также влияние азиатского антициклона зимой и сложная орография определяют континентальность и засушливость климата, а значит на процесс формирования химического состава вод оказывает влияние испарение, ускоряющее процессы взаимодействия воды с породой. К ещё одной особенности Даурского климата можно отнести чередование засушливых и влажных периодов, приводящее в прошлом к почти полному пересыханию Тореев, например, в 1903–1904, 1921–1922 и 1944–1947 гг., а наибольшие наполнения их отмечены в 1963–1965 и 1993–1995 гг. [27]. Предпоследняя фаза аридизации наблюдалась до 1981 г., сменившись затем фазой увлажнения [28]. Все это говорит о высокой степени влияния климатических условий на со-

стояние как поверхностных водных объектов, так и неглубоко залегающих грунтовых вод.

Согласно геологическому строению впадина сложена песчано-глинистыми маломощными отложениями, перекрывающими эффузивно-осадочные меловые породы, выходящие на дневную поверхность в районе озер. Район исследований приурочен к Восточно-Забайкальской гидрогеологической складчатой обла-

сти (структура 2-го порядка). На основе данных о типе циркуляции вод, гидродинамическом режиме и возрасте вмещающих пород выделяются водоносные комплексы с пластово-поровыми подземными водами, а также трещинами, трещинно-пластовыми, трещинно-карстовыми и напорными. Существующая локальная трещиноватость вулканогенных структур обеспечивает смешение озерных, речных и подземных вод.

Таблица 1. Химический состав природных вод района Торейских озер, мг/л

Table 1. Chemical composition of natural waters in the area of Torey lakes, mg/L

Водные объекты Water body	Точка опробования Sampling point	pH	Eh	CO ₂	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	M*
Атм. осадки Precipitation	1P	6,09	145	2,64	<0,3	3,66	0,95	0,87	0,38	0,03	1,49	0,29	0,01
	2P	6,5	–	<0,4	<0,3	9,76	3,1	3,52	0,69	0,7	5,98	0,68	0,03
	3P	6,8	–	<0,4	<0,3	22,2	5,8	6,13	1,48	1,5	11,4	1,05	0,05
	6P	4,98	–	17,4	–	4,28	4,5	1,72	1,03	0,35	0,34	0,73	0,02
р. Онон/Onon river	1R	7,4	155	3,52	<0,3	50,3	10	1,78	11,3	2,2	6,3	1,22	0,09
р. Борзя/Borzya river	2R	8,18	100	0,15	<0,3	298	18,8	6,6	35,7	17,9	49,1	4	0,48
Подземные воды/Groundwaters	I тип, пресные HCO ₃ (Ca, Na, Mg)/I type, fresh waters HCO ₃ (Ca, Na, Mg)												
	3G	8,47	41	<0,4	12	427	21,3	23,9	33,2	40,1	67,4	3,83	0,56
	14G	8,1	–45	<0,4	<0,3	353	39,6	7,3	42,7	27,4	49,6	1,13	0,55
	18G	7,7	110	<0,4	<0,3	310	28	17,1	41,9	28,5	38,6	2,48	0,5
	19G	8	–27	<0,4	<0,3	415	44,9	11,7	22	55,7	52,3	1,58	0,63
	20G	8	67	<0,4	<0,3	361	16,3	11,6	21,8	41,8	35,6	1,07	0,52
	21G	7,9	1,51	<0,4	<0,3	358	47,6	45,4	54,3	37,7	52,4	2,45	0,62
	22G	8,1	–98	<0,4	<0,3	317	26,5	5,9	27,6	28,3	49,6	2,26	0,48
	5G	8,32	–44	<0,4	18	342	65	17,5	25,6	28,7	89,7	3,25	0,51
	6G	8,38	100	<0,4	18	342	20,6	10,1	14	33	68,8	11,7	0,46
	7G	8,34	–73	<0,4	18	305	24,6	21,9	26,8	22,8	73,3	6,72	0,43
	16G	7,9	92	<0,4	<0,3	376	30,4	6,6	24,2	20,5	93	1,45	0,58
	23G	7,78	148	<0,4	<0,3	461	87,1	85,5	93,9	76,2	17,2	3,3	0,85
	24G	7,68	208	<0,4	<0,3	284	5,54	16,1	32,6	19,4	44,2	1,07	0,43
	25G	8,55	–11	<0,4	<0,3	415	163	80,6	56,9	56,2	95,4	1,5	0,78
	29G	7,6	101	9,9	–	310	13,6	5,6	56,4	20	21,5	2,46	0,38
	30G	7,74	122	13	–	517	10,7	5,15	73,2	43,1	29,7	2,66	0,63
	34G	7,9	138	5,5	–	262	10	4,97	38,9	24,5	24,8	0,69	0,28
	35G	7,53	105	17,2	–	412	119	75	79,2	40,7	82,5	2,46	0,72
	36G	7,7	143	6,16	–	370	69,3	23,9	64,7	22,5	74,9	1,8	0,54
	37G	7,46	–15	12,5	–	265	33,5	9,87	62,8	19	14,9	1,69	0,33
	38G	7,41	170	8,8	–	272	19,1	3,5	50,1	22,4	22,6	0,81	0,32
	39G	7,8	102	5,06	–	181	5,03	2,55	46,9	5,96	6,89	0,56	0,17
	II тип, солоноватые HCO ₃ (SO ₄ -Cl) Na/II type, brackish waters HCO ₃ (SO ₄ -Cl) Na												
	1G	8,78	–127	<0,4	12	702	436	160	27	51,9	437	7,3	1,75
	2G	8,74	71	<0,4	12	824	450	343	27,2	75,6	583	12,5	2,25
	4G	8,67	–121	<0,4	36	720	343	207	27,5	38,9	465	13,5	1,8
	8G	8,32	–46	<0,4	6	311	53,8	11,7	4,55	4,64	135	2,66	0,46
	9G	8,7	–130	<0,4	21,1	787	1126	445	116	219	523	1,67	3,15
	10G	8,5	–80	<0,4	15	453	32,6	21,3	26,9	34,1	119	2,3	0,61
	11G	6,18	21	2710	<0,3	1866	15,6	24,3	253	81,6	302	13,5	2,5
	12G	8,3	115	<0,4	<0,3	318	277	178	50,5	80,6	149	19,5	1,11
	13G	8,2	172	<0,4	<0,3	485	117	55	37,4	22,4	181	2,15	0,93
	15G	8,9	19	<0,4	<0,3	1348	890	1034	36,4	52,2	1452	10,7	4,87
	17G	8,1	37	<0,4	<0,3	309	127	81,5	45,7	31,3	114	1,55	0,73
	26G	8,24	–122	7,48	<0,3	394	96,3	65,6	37,9	32,5	137	2,7	0,67
	31G	7,99	100	9,24	–	483	210	23,5	137	42,3	49	10	0,91
	32G	7,8	173	9,46	–	552	49,7	17,9	30,1	34	136	2,78	0,74
	33G	8,3	184	0,44	–	456	78	50,5	34,7	36,1	146	1,83	0,73
Озерные воды/Lakes	2L	9,05	58	<0,4	6	654	125	229	12,5	4,47	423	18,5	1,56
	3L	8,95	84	<0,4	51	779	145	253	7,02	2,99	537	5,11	1,81
	4L	9,03	94	<0,4	21	529	65,7	131	16	10,2	260	40,5	1,08
	5L	9,74	–30	<0,4	3630	4819	5375	6310	1,59	85,3	10910	390	31,6
	6L	9,48	75	<0,4	129	522	176	780	4,57	2,67	863	3,32	2,53
	7L	9,99	–69	<0,4	3240	2775	1263	3287	6,3	3,34	6233	31,3	17,4
	8L	9,74	15	<0,4	5010	4056	8634	12399	3,12	6,6	17410	193	48,1
	9L	9,65	55	<0,4	10560	7320	17916	45650	2,81	3,09	48729	232	131

Примечания: M* – Минерализация, «–» – данные отсутствуют.

Note: M* – Mineralization of water, «–» – data are not available.

При исследовании химического состава природных вод района установлено [21], что в направлении атмосферные [20]–речные–подземные–озерные воды увеличиваются соленость (от 10 мг/л до 120 г/л) и значение pH (от 5,0 до 9,9), накапливается Si (до 130 мг/л), из макрокомпонентов сначала преобладают Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , затем Na^+ , HCO_3^- и CO_3^{2-} , и далее Na^+ , SO_4^{2-} и Cl. Также в этом направлении увеличиваются концентрации некоторых микрокомпонентов. Общее описание по каждому объекту представим ниже, данные по составу приведены в табл. 1.

Атмосферные осадки района относятся к ультрапресным (10–50 мг/л), слабокислым (pH 5–6,5), сложного катионного и анионного состава водам, но в основном преобладают HCO_3^- и Na^+ .

Речные воды (реки Онон и Борзя) характеризуются низкой минерализацией (10–47 мг/л) и слабощелочной средой (pH 7,4–8,2), по составу гидрокарбонатные кальциево-натриевые.

Подземные воды верхней гидродинамической зоны отличаются большим разбросом значений pH и солёности. Мы выделили условно два типа вод: 1) с минерализацией 0,17–0,85 г/л и pH 7,4–8,5, по составу HCO_3^- , но сложного катионного состава (Ca, Na, Mg) и 2) с минерализацией 0,61–4,87, pH 7,8–8,9, по составу в основном HCO_3^- -Na (резко из катионов преобладает натрий), реже в анионном составе появляются SO_4^{2-} и Cl (HCO_3^- - SO_4^{2-} -Na, HCO_3^- -Cl-Na).

Озерные воды отличаются еще большим разбросом солёности – от 1 до 131 г/л, но достаточно узким диапазоном pH – от 8,9 до 9,9. Состав при этом очень разнообразен: анионный варьирует – HCO_3^- , Cl- SO_4^{2-} , SO_4^{2-} -Cl, Cl, в катионном преобладает всегда Na.

Подробнее состав воды представлен в [20].

Результаты исследования и их обсуждение

В питании подземных вод могут участвовать воды различного генезиса: прежде всего, метеорные (атмосферные и речные), а также, среди поверхностных, озерные, кроме того, седиментационные, магматогенные и прочие. В изучаемых условиях можно исключить глубинные источники. Интерес больше представляет вклад озерных вод в питание подземных.

Величины δD и $\delta^{18}\text{O}$ подземных вод варьировали в достаточно узком интервале значений – от –101 до –70 ‰ и от –13,7 до –8 ‰ соответственно (табл. 2). Хотя мы по химическому составу и разделили воды на два типа, по изотопному составу особые отличия не были выявлены, и даже средние значения практически идентичны. Диапазон вариаций изотопного состава озерных вод отличный от подземных – от –4,3 до 1,5 ‰ для кислорода и от –49 до –18 ‰ для водорода.

При нанесении полученных данных на график зависимости δD и $\delta^{18}\text{O}$ (рис. 2) можно сделать следующие выводы. Большая часть подземных вод территории имеет метеорный генезис, о чем свидетельствуют их распределение вдоль локальной (LMWL) [29] и глобальной (GMWL) линий метеорных вод (на этом участке они практически совпадают).

Таблица 2. Изотопный состав природных вод района Торейских озер и водорастворенных веществ, ‰

Table 2. Isotopic composition of natural waters in the Torey Lakes area and water soluble substances, ‰

Водные объекты Water body	Точка отбора Sampling point	Вода Water		Гидрокарбонат-ион Hydrocarbonate ion		Сульфат-ион Sulfate ion
		$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta\text{D}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$	$\delta^{34}\text{S}_{\text{CDT}}$
р. Борзя Borzya river	2R	–	–	–13,2	21,9	–
Подземные воды/Groundwaters	I тип, пресные HCO_3^- (Ca, Na, Mg) I type, fresh waters HCO_3^- (Ca, Na, Mg)					
	3G	–12,7	–95	–	–	–
	14G	–	–	–9,6	19,1	–
	18G	–	–	–12,3	18,4	–
	19G	–	–	–11	19,5	–
	20G	–	–	–10,7	19,2	–
	21G	–	–	–12,2	18,1	–
	22G	–	–	–11	19,5	–
	5G	–12,3	–92	–	–	–
	6G	–8	–72	–	–	–
	7G	–12	–95	–	–	–
	16G	–	–	–10,2	19	–
	23G	–	–	–12,2	19	–
	24G	–	–	–12,1	18,1	–
	25G	–12,1	–96	–	–	–
	29G	–11,9	–83	–13,7	20,8	8,3
	30G	–11	–79,1	–9,2	22,2	–
	34G	–13,1	–98,6	–10,1	19,3	–
	35G	–13,6	–101,4	–8,9	17,8	–
	36G	–13,7	–100,7	–9,3	18,4	–
	37G	–12,4	–89,1	–13	19,1	–
	38G	–12,5	–89,6	–10,7	19,4	–
	39G	–12,7	–91	–10,8	19,3	–
	II тип, солоноватые HCO_3^- (SO_4 -Cl) Na II type, brackish waters HCO_3^- (SO_4 -Cl) Na					
	1G	–11,1	–85	–	–	–
	2G	–11,3	–89	–	–	–
	4G	–11,4	–88	–	–	–
	8G	–11,9	–90	–	–	–
	9G	–11,9	–96	–	–	–
	10G	–11,9	–97	–	–	–
	11G	–12,1	–95	–	–	–
	12G	–	–	–13,8	19,8	–
	13G	–	–	–9,1	20,2	–
	15G	–	–	–9,5	19,6	–
	17G	–	–	–9,9	19,5	–
	26G	–12,4	–98	–	–	–
	31G	–8,9	–69,8	–13,6	24,3	–
	32G	–13,7	–96,5	–10,6	18,8	–
	33G	–13,2	–92,8	–8,5	20,1	–
Озерные воды/Lakes	2L	–2,8	–30	–	–	–
	3L	–1,7	–28	–7,6	27	3,5
	4L	–4,3	–49	–6,6	26,3	–
	5L	–1,48	–44	2,1	27,6	8,9
	6L	–2,4	–34	–6,9	26,8	11,1
	7L	1,46	–18	–2,2	29,3	14,5
	8L	–1,4	–32	–1,5	27,2	3,3
	9L	–1,28	–37	–0,6	28,4	7,1

Примечания: «–» – данные отсутствуют.

Note: «–» – data are not available.

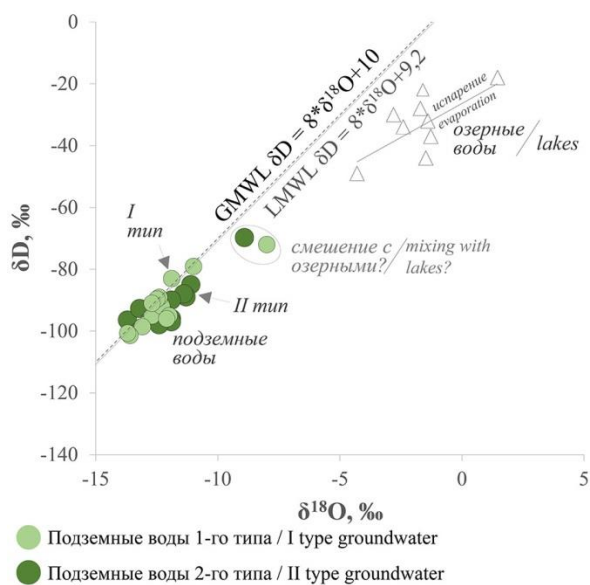


Рис. 2. Распределение изотопов H и O в подземных и озерных водах района

Fig. 2. Distribution of H and O isotopes in groundwater and lakes of the study region

Исключение составляют две фигуративные точки, отклоненные по линии метеорных вод вверх, и одна даже с небольшим (1,4 ‰) кислородным сдвигом. Объяснение этого будет чуть ниже. Если исключить эти точки, то диапазон изменений величин δD и $\delta^{18}\text{O}$ для подземных вод будет еще уже: от -101 до -79 ‰ и от $-13,7$ до $-11,1$ ‰ соответственно.

Озерные воды, несмотря на питание их метеорными водами, в результате испарительных процессов, а именно изотопно-обменных реакций при фазовом переходе «вода–пар», приобретают тяжелый изотопный состав, при этом линия тренда имеет более пологий наклон (рис. 2), т. е. величина $\delta^{18}\text{O}$ больше утяжеляется, чем δD . Этот уклон характерен для открытых водоемов, склонных к испарению [29], в результате которого в пар переходят более легкие изотопы воды.

Две выше описанные аномальные фигуративные точки подземных вод как раз попадают на линию смешения метеорных и озерных вод (рис. 2). При этом данные пробы отличаются относительно невысокими значениями минерализации (0,46 и 0,91 г/л) и pH (8,4 и 8,0).

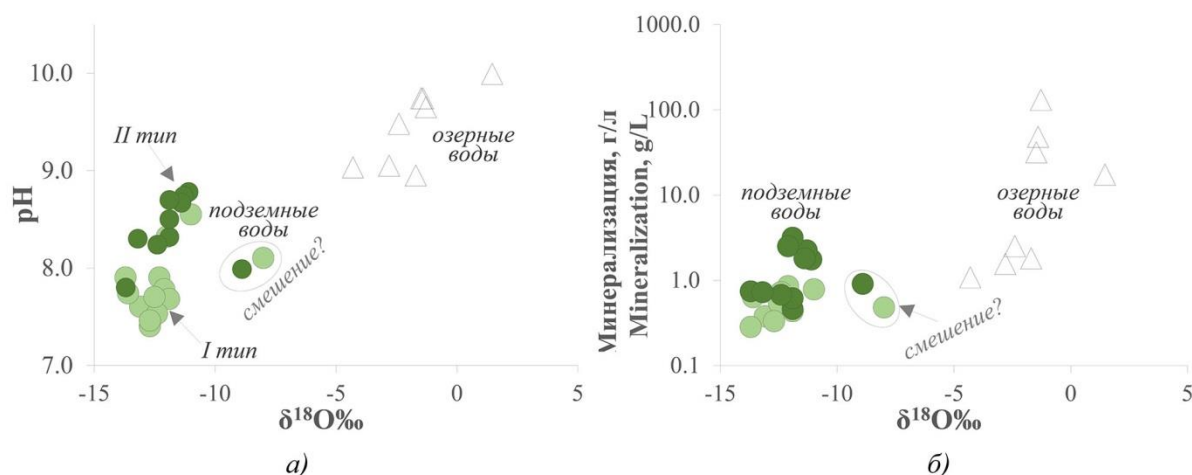


Рис. 3. Соотношение $\delta^{18}\text{O}$ природных вод района Торейских озер с их pH (а) и соленостью (б) (условные обозначения – на рис. 2)

Fig. 3. Ratio of $\delta^{18}\text{O}$ of natural waters of the Torey Lakes region with pH (a) and salinity (b) (for legend see Fig. 2)

Если, в принципе, сравнивать величину $\delta^{18}\text{O}$ (можно и δD , но первая будет более выразительна) всех вод с показателями общей солености и кислотности-щелочными условиями, то можно увидеть следующую картину (рис. 3). При общей эволюции «воды зоны активного водообмена – озерные воды» тенденция очевидна: увеличивается минерализация и pH вод, утяжеляется изотопный состав воды. Однако, если рассматривать только подземные воды, такая зависимость не так очевидна, видимо, из-за недостаточной представительности выборки. При этом на графиках опять выделяются две аномальные точки, попадающие на линию смешения с озерными водами (рис. 3), но только по $\delta^{18}\text{O}$, по δD несильно выделяются.

Были исследованы зависимости изотопного состава вод от их пространственного расположения. Латеральная зональность ничего не показала, поскольку террито-

рия небольшая и расположены водные объекты достаточно близко. Немного проявилась высотная изотопная зональность. В предыдущих работах указывалось [23], что с уменьшением высоты и продвижением вод от областей питания в сторону озер увеличивается соленость и щелочность. Соответственно в этом же направлении увеличиваются значения $\delta^{18}\text{O}$ и δD (рис. 4).

Изотопный состав углерода гидрокарбонат-иона указывает на генезис водорастворенного углерода, особенно это актуально для широко здесь распространенных содовых вод. Источник может быть атмосферный (~ от -11 до -5 ‰), биогенный (~ от -30 до -12 ‰), в результате разложения карбонатный пород (~ от -2 до 2 ‰), мантийный и магматический (~ от -4 до -8 ‰) (интервалы значений $\delta^{13}\text{C}$ варьируют у разных исследователей, здесь приведены наиболее встречаемые по мнению авторов).

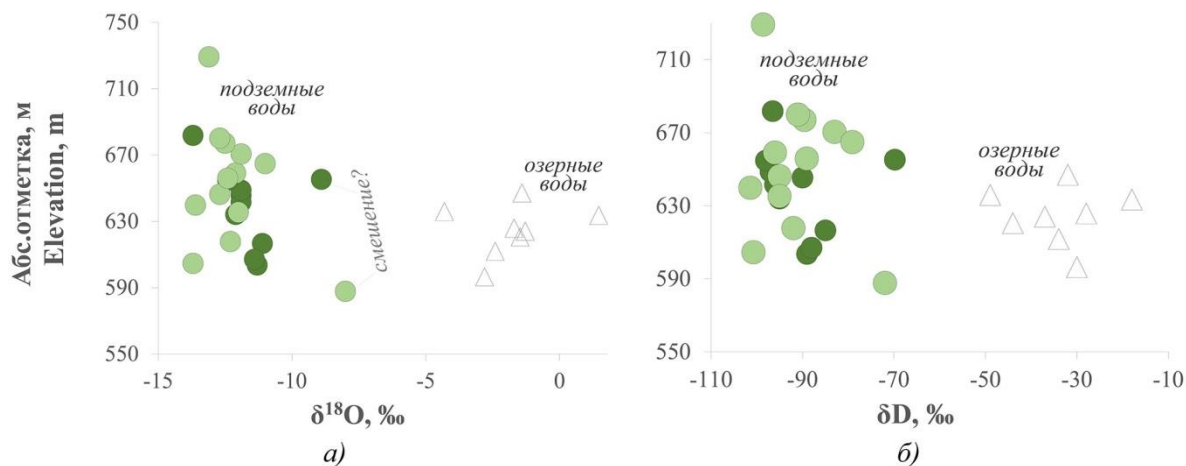


Рис. 4. Соотношение изотопного состава кислорода (а) и водорода (б) воды с гипсометрическим положением водных объектов района Торейских озёр (условные обозначения – на рис. 2)

Fig. 4. Ratio of water oxygen (a) and hydrogen (b) isotopic composition with the elevation of water bodies in the Torey Lakes region (for legend see Fig. 2)

Тяжелым $\delta^{13}\text{C}$ выделяются озерные воды территории от $-7,6$ до $2,1$ ‰, что указывает на основной вклад атмосферной CO_2 . Данные подтверждают полученную ранее информацию по изотопному составу углерода соседних озёр [23] и близость их состава к морским водам [30, 31]. В то время как гидрокарбонат рек легче ($-13,2$ ‰) и характерен для пресноводных водоемов [32, 33]. Значения $\delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3^-)$ подземных вод варьируют в интервале от $-13,8$ до $-8,5$ ‰, что указывает на биогенный источник, но с некоторым утяжелением из-за еще имеющегося влияния атмосферного CO_2 (воды неглубокие), а возможно, и озерных вод. Разные по химическому составу два ги-

па подземных вод по $\delta^{13}\text{C}$ идентичны. В общей эволюции с увеличением концентрации иона HCO_3^- возрастает величина $\delta^{13}\text{C}$, т. е. утяжеляется изотопный состав углерода (рис. 5, а).

Гидрокарбонат-ион всех природных вод района обогащен ^{18}O в среднем на 20–30 ‰: для подземных вод в интервале от 17,8 до 24,3 ‰ (чуть тяжелее для II типа), для озёр – от 26,3 до 29,3 ‰. Очевидно, что при его формировании происходит фракционирование кислорода с переходом тяжелого изотопа в карбонатные ионы, а затем и во вторичные карбонаты. При этом, как видно из рисунка 5, б, $\delta^{18}\text{O}(\text{HCO}_3^-)$ наследует изотопный состав воды.

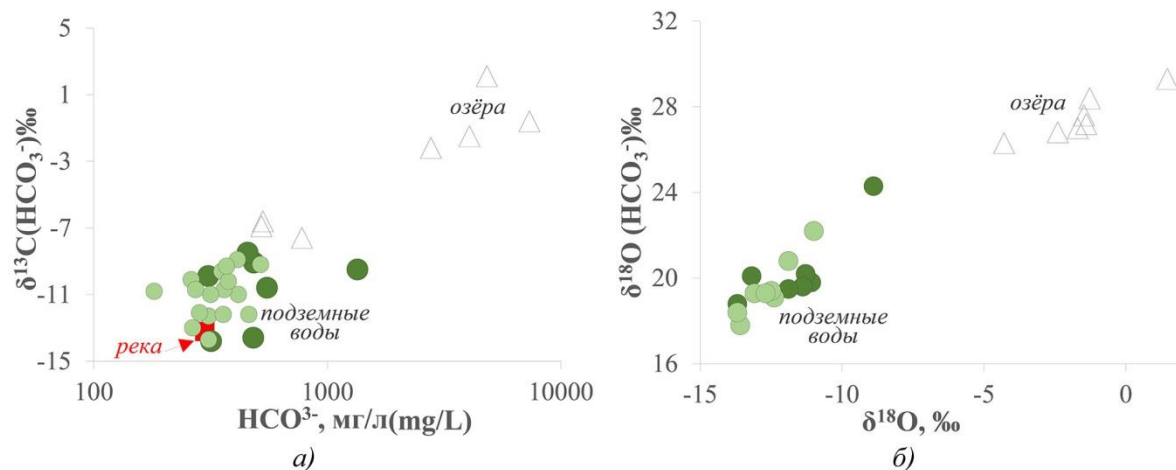


Рис. 5. Зависимость $\delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3^-)$ природных вод района Торейских озёр от содержания HCO_3^- (а) и $\delta^{18}\text{O}(\text{HCO}_3^-)$ от $\delta^{18}\text{O}$ (б) (условные обозначения – на рис. 2)

Fig. 5. Dependence of $\delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3^-)$ of natural waters of the Torey Lakes region on the content of HCO_3^- (a) and $\delta^{18}\text{O}(\text{HCO}_3^-)$ on $\delta^{18}\text{O}$ (b) (for legend see Fig. 2)

Изотопные определения сульфатных форм серы позволяют оценить различные биогеохимические процессы, происходящие в водах [34–36]. Более широкие вариации $\delta^{34}\text{S}$ сульфатов (от 3,3 до 17,5 ‰) – в озёрах, и в среднем большее обогащение тяжелым изотопом ^{34}S указывает на наличие бактериальной

редукции сульфата, которая в континентальных водоемах сопровождается существенным разделением изотопов серы крайних членов цепи ее превращения [37, 38]. Для подземных вод характерны достаточно однородные (от 5,8 до 8,8 ‰) и легкие значения $\delta^{34}\text{S}$, что указывает на отсутствие сульфатредукции.

Таким образом, интерпретация результатов изотопных анализов всегда необходима в комплексе с другими исследованиями, например, как в данном случае, геолого-гидрогеологическими и геохимическими данными. По изотопным данным воды и водорастворенной серы на состав подземных вод верхней динамической зоны процессы испарения и смешения с озерными водами не оказывают сильного влияния, за исключением двух точек отбора (т. е. менее 10 %). Однако по химическому составу вод мы уже наблюдаем эти процессы: воды более минерализованы (до 5 г/л), разнообразны по составу, в основном преобладает сода. Изотопный состав водорастворенного углерода гидрокарбонат-иона оказался более чувствителен к процессу смешения с поверхностными водами, очевидно, с озерными (другие источники здесь невозможны, учитывая геолого-гидрогеологические условия). Значения $\delta^{13}\text{C}(\text{HCO}_3^-)$ значительно тяжелее, чем характерно для атмосферных и речных вод региона. Поэтому мы можем утверждать, что на формирование состава подземных вод по изотопно-геохимическим данным оказывают влияние и процессы испарительного концентрирования, и процессы смешения с озерными водами (т. е. водами, подвергающимися испарению) в начальной стадии. А в целом воды имеют типичный для подземных вод верхней зоны инфильтрационный генезис.

Выводы

Проведенные исследования по изотопному составу подземных вод верхней динамической зоны (до 70 м) района Торейских озер позволили детализировать генезис и условия их формирования. Результаты оказались следующими.

1. Значения δD и $\delta^{18}\text{O}$ подземных вод в условиях аридного климата варьируют в узком интервале, большинство: от -101 до -79 ‰ и от $-13,7$ до $-11,1$ ‰ соответственно, что указывает на метеогенный или инфильтрационный генезис (точки полностью ложатся на локальную линию метеорных вод). Только менее 10 % исследованных проб попадают на линию смешения с более утяжеленными (особенно по кислороду) озерными водами, в образовании которых активное участие принимают процессы испарительного концентрирования.
2. Высотная зональность проявилась в утяжелении значений δD и $\delta^{18}\text{O}$ при продвижении подземных вод от областей питания в сторону разгрузки – Торейских озер. В этом же направлении увеличивается соленость и щелочность вод. Латеральная зональность в силу небольшой площади территории не проявилась.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Use of multiple age tracers to estimate groundwater residence times and long-term recharge rates in arid southern Oman / T. Müller et al. // Appl. Geochemistry. – 2016. – V. 74. – P. 67–83.
2. Understanding the salinisation process for groundwater in an area of south-eastern Australia, using hydrochemical and isotopic

3. Изотопный состав водорастворенной серы $\delta^{34}\text{S}$ подземных вод достаточно однородный (от 5,8 до 8,8 ‰) и легкий и указывает лишь на отсутствие сульфатредукции, характерной для озерных вод.
4. Величина $\delta^{13}\text{C}$ гидрокарбонат-иона подземных вод оказалась более чувствительна к выявлению смешения с поверхностными озерными водами. Значения варьируют в интервале от $-13,8$ до $-8,5$ ‰ и явно указывают на участие в формировании HCO_3^- двух источников углекислоты: легкой биогенной и утяжеленной атмосферной (других источников по геолого-гидрогеологическим условиям не должно быть). По имеющимся изотопным данным атмосферных, речных и озерных вод территории все указывает на участие в формировании HCO_3^- последних.
5. Диапазон изменения концентрации ^{18}O в гидрокарбонат-ионе – от 17,8 до 24,3 ‰, что тяжелее водного на 20–30 ‰. При формировании HCO_3^- иона происходит фракционирование кислорода с переходом тяжелого изотопа в карбонатные ионы, а затем и во вторичные карбонаты. В целом величина $\delta^{18}\text{O}(\text{HCO}_3^-)$ всех природных вод территории наследует изотопный состав воды, что еще раз говорит об инфильтрационном генезисе и отсутствии влияния глубинных вод или карбонатных пород на формирование состава вод.
6. Несмотря на достаточно разнообразный химический состав подземных вод, по изотопному составу они оказались практически идентичными. При этом каких-либо зависимостей от солености, химического состава, pH в пределах подземных вод не было четко выявлено (возможно, выборка недостаточно представительная). Однако при совместном рассмотрении с озерными водами видна общая эволюция состава природных вод региона: при движении вод от областей питания в сторону озер утяжеляются значения $\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, параллельно с ростом солености и pH.
7. При рассмотрении генезиса и условий формирования подземных вод аридного климата нельзя опираться только на изотопные данные, необходима комплексная изотопно-гидрогеохимическая оценка, которая предоставит наиболее достоверные результаты.

Авторы выражают благодарность и.о. заведующего лабораторией геоэкологии и гидрогеохимии ИПРЭК СО РАН д.г.-м.н. Светлане Владимировне Борзенко за помощь в организации полевых исследований и научные консультации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90040 и проекта фундаментальных научных исследования Российской академии наук № 0331-2019-0026.

evidence / D.A. Bennetts et al. // J. Hydrol. – 2006. – V. 323. – № 1–4. – P. 178–192.

3. Identifying sources of groundwater in the lower Colorado River valley, USA, with $\delta^{18}\text{O}$, δD , and 3H : implications for river water accounting / B.E. Guay et al. // Hydrogeol. J. – 2006. – V. 14. – № 1–2. – P. 146–158.

4. Geochemical and isotopic evolution of groundwater in the Wadi Watir watershed, Sinai Peninsula, Egypt / M.A. Eissa et al. // *Environ. Earth Sci.* – 2014. – V. 71. – № 4. – P. 1855–1869.
5. Abdeldjebbar T., Mohammed H., Messoud H. Origin and age of the surface water and groundwater of the Ouargla basin-Algeria // *Energy Procedia.* – 2019. – V. 157. – № 2018. – P. 111–116.
6. Environmental isotopic study on the recharge and residence time of groundwater in the Heihe River Basin, northwestern China / Z. Chen et al. // *Hydrogeol. J.* – 2006. – V. 14. – № 8. – P. 1635–1651.
7. A hydrogeochemistry and multi-isotope (Sr, O, H, and C) study of groundwater salinity origin and hydrogeochemical processes in the shallow confined aquifer of northern Yangtze River downstream coastal plain, China / Q. Zhao et al. // *Appl. Geochemistry.* – 2017. – V. 86. – P. 49–58.
8. Identifying the seasonal variability in source of groundwater salinization using deuterium excess- a case study from Mewat, Haryana, India / G. Krishan et al. // *J. Hydrol. Reg. Stud.* – 2020. – V. 31. – P. 1–15.
9. Genesis of salinized groundwater in Quaternary aquifer system of coastal plain, Laizhou Bay, China: geochemical evidences, especially from bromine stable isotope / Y. Du et al. // *Appl. Geochemistry.* – 2015. – V. 59. – P. 155–165.
10. Geochemical and isotope evidence for groundwater mineralization in a semi-arid river basin, Sri Lanka / S. Senarathne et al. // *Appl. Geochemistry.* – 2021. – V. 124. – P. 1–10.
11. Zhu B.Q., Ren X.Z., Rioual P. Geological control on the origin of fresh groundwater in the Otindag Desert, China // *Appl. Geochemistry.* – 2019. – V. 103. – P. 131–142.
12. Delineation of groundwater flow and estimation of lake water flushing time using radium isotopes and geochemistry in an arid desert: the case of Badain Jaran Desert in western inner Mongolia (CHN) / Y. Lixin et al. // *Appl. Geochemistry.* – 2020. – V. 122. – P. 1–9.
13. Aggarwal P.K., Gat J.R., Froehlich K.F.O. Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science. – Springer Science & Business Media, 2006. – 382 p.
14. Hydrochemical and isotopic assessment for characterizing groundwater quality and recharge processes under a semi arid area: Case of the Haouz plain aquifer (Central Morocco) / S. Kamal et al. // *J. African Earth Sci.* – 2021. – V. 174. – P. 1–17.
15. Origin of the Crescent Moon Spring in the Gobi Desert of northwestern China, based on understanding groundwater recharge / C. Su et al. // *J. Hydrol.* – 2020. – V. 580. – P. 1–13.
16. Groundwater recharge and salinization in the arid coastal plain aquifer of the Wadi Watir delta, Sinai, Egypt / M.A. Eissa et al. // *Appl. Geochemistry.* – 2016. – V. 71. – P. 48–62.
17. Herczeg A.L., Dogramaci S.S., Leaney F.W.J. Origin of dissolved salts in a large, semi-arid groundwater system: Murray Basin, Australia // *Mar. Freshw. Res.* – 2001. – V. 52. – P. 41–52.
18. Multi-tracer approach for assessing complex aquifer systems under arid climate: case study of the River Tata catchment in the Moroccan Anti-Atlas Mountains / L. Heiß et al. // *Appl. Geochemistry.* – 2020. – V. 120. – P. 1–17.
19. Borzenko S., Drobot V., Fedorov I. Chemical composition and formation conditions of NaHCO_3 type of waters in the eastern Transbaikalia // *E3S Web of Conferences.* – 2019. – V. 98. – 01005.
20. Borzenko S.V., Drobot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: a case study from south-eastern Transbaikalia region (Russia) // *Appl. Geochemistry.* – 2020. – V. 123. – P. 1–16.
21. Дребот В.В., Лепокурова О.Е. Оценка подвижности химических элементов в системе базальты – природные воды – вторичные отложения территории Торейских озер (Восточное Забайкалье) // *Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием.* – Улан-Удэ, 17–20 Августа 2020. – Улан-Удэ: БНЦ СО РАН, 2020. – P. 335–338.
22. Борзенко С.В. Основные условия формирования химического состава вод соленых и солоноватых озер восточного Забайкалья // *Геохимия.* – 2020. – V. 65. – № 12. – P. 1212–1230.
23. Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia) // *Appl. Geochemistry.* – 2019. – V. 103. – P. 72–84.
24. Борзенко С.В. Изотопный состав вод солёных озёр восточного Забайкалья // *Доклады Академии наук.* – 2019. – V. 488. – № 2. – P. 176–180.
25. Синица С.М. Торейская и Восточно-Торейская впадины (стратиграфия, палеонтология, палеорекострукции) // *Ученые записки Забайкальского государственного университета.* – 2015. – V. 1. – № 60. – P. 129–138.
26. Биосферный заповедник «Даурский» / О.К. Кирилук и др. / под ред. О.К. Кирилук. – Чита: Экспресс-издательство, 2009. – 104 p.
27. Замана Л.В., Борзенко С.В. Гидрохимический режим соленых озер юго-восточного Забайкалья // *География и природные ресурсы.* – 2010. – № 4. – P. 100–107.
28. Баженова О.И. Современная динамика озерно-флювиальных систем Онон-Торейской высокой равнины (Южное Забайкалье) // *Вестник Томского государственного университета.* – 2013. – V. 371. – P. 171–177.
29. Ферронский В., Поляков В.А. Изотопия гидросферы Земли. – М.: Научный Мир, 2009. – 632 p.
30. Clark I. Groundwater geochemistry and isotopes // *Groundwater Geochemistry and Isotopes.* – Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015. – 456 p.
31. Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Соотношения изотопов углерода в стратифицированной биосфере: четыре сценария // *Биосфера.* – 2010. – V. 2. – № 2. – P. 231–246.
32. Галимов Э.М. Геохимия стабильных изотопов углерода. – М.: Недра, 1968. – 226 p.
33. Гуцало Л.К. Формирование подземных вод и газов земной коры по изотопным данным: автореф. дис. ... д-ра. наук. – СПб., 1997. – 98 p.
34. Sulfur cycling in a stratified euxinic lake with moderately high sulfate: Constraints from quadruple S isotopes / A.L. Zerkle et al. // *Geochim. Cosmochim. Acta.* – 2010. – V. 74. – № 17. – P. 4953–4970.
35. Insight into the mechanisms of denitrification and sulfate reduction coexistence in cascade reservoirs of the Jialing River: Evidence from a multi-isotope approach / G. Cui et al. // *Sci. Total Environ.* – 2020. – V. 749. – P. 141682.
36. A multiple isotope (H, O, N, C and S) approach to elucidate the hydrochemical evolution of shallow groundwater in a rapidly urbanized area of the Pearl River Delta, China / X. Li et al. // *Sci. Total Environ.* – 2020. – V. 724. – P. 137930.
37. Борзенко С.В., Замана Л.В. Восстановленные формы серы в рапе содового озера Доронинское (восточное Забайкалье) // *Геохимия.* – 2011. – № 3. – P. 268–276.
38. Borzenko S.V., Zippa E.V. Isotopic composition and origin of sulfide and sulfate species of sulfur in thermal waters of Jiangxi Province (China) // *Aquat. Geochemistry.* – 2019. – V. 25. – № 1–2. – P. 49–62.

Поступила 15.07.2021 г.

Информация об авторах

Лепокурова О.Е., доктор геолого-минералогических наук, директор и ведущий научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Дребот В.В., младший научный сотрудник Томского филиала Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН; аспирант, инженер-исследователь отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.314

ISOTOPIC COMPOSITION ($\delta^{18}\text{O}$, δD , $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$) OF GROUNDWATERS IN THE AREA OF TOREY LAKES (EASTERN TRANSBAIKAL REGION)

Olesya E. Lepokurova^{1,2},
LepokurovaOY@ipgg.sbras.ru

Valeriia V. Drebot^{1,2},
DrebotVV@ipgg.sbras.ru

¹ Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum-Gas Geology and Geophysics of SB RAS,
4, Akademicheskaya avenue, Tomsk, 634055, Russia.

² National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

The relevance of the work is associated with the problem of fresh water resources shortage in arid regions, the solution of which is impossible without understanding the conditions and mechanisms of water's chemical composition formation in the natural environment.

The aim of the research is to supplement information on the origin and conditions of groundwater's formation using the basis of new data on water's stable isotopes ($\delta^{18}\text{O}$, δD) and dissolved carbon and sulfur ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{34}\text{S}$).

Study objects are groundwaters of the upper dynamic zone of the Torey Lakes (eastern Transbaikalian region) – springs, boreholes and wells depth (no more than 70 m), partly rivers' and lake's waters.

Methods. Isotopic studies of water and dissolved C and S were carried out using an isotope mass spectrometer Finnigan-MAT 252 (Germany) at the FEG FEB RAS Analytical Centre; water's chemical composition – using modern standard methods: potentiometric titration, atomic absorption, flame emission, potentiometric method, titration method at the INREC SB RAS.

Results. New data on the isotopic composition (H and O) of groundwater in the upper dynamic zone of the Torey Lakes area, as well as dissolved C and S are presented. Altitudinal zonality is noted in isotope's distribution. The conclusions related to the origin and formation conditions were presented based on the results obtained, as well as the data on partially lake's and meteoric waters: water of infiltration with little influence of evaporation processes (mixing with lake waters). A fairly uniform isotopic composition of groundwater was noted, despite the differences in chemical composition. No relationships were found between isotopic composition and salinity, basic ions and pH within groundwater, however, the general evolution of the composition in the direction of «atmospheric-groundwaters-lake waters» is characterized, in addition to the increase in salinity and pH, by enrichment in isotopes ^{18}O , ^2H , ^{13}C .

Key words:

Upper dynamic zone groundwater, isotopic composition, Torey lakes, eastern Transbaikalian region, origin.

The authors appreciate Svetlana V. Borzenko, Dr. Sc., acting for the head of the laboratory of geoecology and hydrogeochemistry at the IEREC SB RAS, for assistance in field works and scientific advice.

The research was financially supported by the RFBR within the scientific project no. 20-35-90040 and the project of fundamental scientific researches of the Russian Academy of Sciences no. 0331-2019-0026.

REFERENCES

- Müller Th., Osenbrück K., Strauch G., Pavetich S., Al-Mashaikhi K.S., Herb C., Merchel S., Rugel G., Aeschbach W., Sanford W. Use of multiple age tracers to estimate groundwater residence times and long-term recharge rates in arid southern Oman. *Applied Geochemistry*, 2016, vol. 74, pp. 67–83.
- Bennetts D.A., Webb J. A., Stone D.J.M., Hill D.M. Understanding the salinisation process for groundwater in an area of south-eastern Australia, using hydrochemical and isotopic evidence. *Journal of Hydrology*, 2006, vol. 323, no. 1–4, pp. 178–192.
- Guay B.E., Eastoe C.J., Bassett R., Long A. Identifying sources of groundwater in the lower Colorado River valley, USA, with $\delta^{18}\text{O}$, δD , and 3H : implications for river water accounting. *Hydrogeology Journal*, 2006, vol. 14, no. 1–2, pp. 146–158.
- Eissa M.A., Thomas J.M., Hershey R.L., Dawoud M.I., Pohl G., Dahab K.A., Gomaa M.A., Shabana A.R. Geochemical and isotopic evolution of groundwater in the Wadi Watir watershed, Sinai Peninsula, Egypt. *Environmental Earth Sciences*, 2014, vol. 71, no. 4, pp. 1855–1869.
- Abdeldjebbar T., Mohammed H., Messoud H. Origin and age of the surface water and groundwater of the Ouargla basin-Algeria. *Energy Procedia*, 2019, vol. 157, no. 2018, pp. 111–116.
- Chen Z., Nie Zh., Zhang G., Wan Li., Shen J. Environmental isotopic study on the recharge and residence time of groundwater in the Heihe River Basin, northwestern China. *Hydrogeology Journal*, 2006, vol. 14, no. 8, pp. 1635–1651.
- Zhao Qi, Su X., Kang Bo, Zhang Yan, Wu X., Liu M. A hydrogeochemistry and multi-isotope (Sr, O, H, and C) study of groundwater salinity origin and hydrogeochemical processes in the shallow confined aquifer of northern Yangtze River downstream coastal plain, China. *Applied Geochemistry*, 2017, vol. 86, pp. 49–58.
- Krishan G., Prasad G., Anjali Kumar C.P., Patidar N., Yadav B.K., Kansal M.L., Singh S., Sharma L.M., Bradley A., Verma S.K. Identifying the seasonal variability in source of groundwater salinization using deuterium excess- a case study from Mewat, Haryana, India. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2020, vol. 31, pp. 1–15.
- Du Ya., Ma T., Chen L., Shan H., Xiao C., Lu Yu, Liu C., Cai H. Genesis of salinized groundwater in Quaternary aquifer system of coastal plain, Laizhou Bay, China: geochemical evidences, especially from bromine stable isotope. *Applied Geochemistry*, 2015, vol. 59, pp. 155–165.
- Senarathne S., Jayawardana J.M.C.K., Edirisinghe E.A.N.V., Chandrajith R. Geochemical and isotope evidence for groundwater mineralization in a semi-arid river basin, Sri Lanka. *Applied Geochemistry*, 2021, vol. 124, pp. 1–10.
- Zhu B.Q., Ren X.Z., Rioual P. Geological control on the origin of fresh groundwater in the Otindag Desert, China. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 103, pp. 131–142.
- Lixin Yi, Xinyan Lu, Zhenlong N., Hongpeng W., Ke Ch., Yongpeng Ya., Luxuan Li. Delineation of groundwater flow and estimation of lake water flushing time using radium isotopes and

- geochemistry in an arid desert: the case of Badain Jaran Desert in western inner Mongolia (CHN). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 122, pp. 1–9.
13. Aggarwal P.K., Gat J.R., Froehlich K.F.O. *Isotopes in the water cycle: past, present and future of a developing science*. Springer Science & Business Media, 2006. 382 p.
 14. Kamal S., Sefiani S., Laftouhi N.E., Mandour A. El, Moustadraf J., Elgettafi M., Himi M., Casas A. Hydrochemical and isotopic assessment for characterizing groundwater quality and recharge processes under a semi arid area: case of the Haouz plain aquifer (Central Morocco). *Journal of African Earth Sciences*, 2021, vol. 174, pp. 1–17.
 15. Su Ch., Wang Y., Ge Sh., Li Zh., Li J. Origin of the Crescent Moon Spring in the Gobi Desert of northwestern China, based on understanding groundwater recharge. *Journal of Hydrology*, 2020, vol. 580, pp. 1–13.
 16. Eissa M.A., Thomas J.M., Pohl G., Shouakar-Stash O., Hershey R.L., Dawoud M. Groundwater recharge and salinization in the arid coastal plain aquifer of the Wadi Watir delta, Sinai, Egypt. *Applied Geochemistry*, 2016, vol. 71, pp. 48–62.
 17. Herczeg A.L., Dogramaci S.S., Leaney F.W.J. Origin of dissolved salts in a large, semi-arid groundwater system: Murray Basin, Australia. *Marine and Freshwater Research*, 2001, vol. 52, pp. 41–52.
 18. Heiß L., Bouchaou L., Tadoumant S., Reichert B. Multi-tracer approach for assessing complex aquifer systems under arid climate: case study of the River Tata catchment in the Moroccan Anti-Atlas Mountains. *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 120, pp. 1–17.
 19. Borzenko S., Drebot V., Fedorov I. Chemical composition and formation conditions of NaHCO₃ type of waters in the eastern Transbaikalia. *E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 98, pp. 1–5.
 20. Borzenko S.V., Drebot V.V., Fedorov I.A. Main formation conditions of soda-type groundwater: A case study from south-eastern Transbaikalia region (Russia). *Applied Geochemistry*, 2020, vol. 123, pp. 1–16.
 21. Drebot V., Lepokurova O. Otsenka podvizhnosti khimicheskikh elementov v sisteme bazalty – vtorichnye otlozheniya territorii Toreyskikh ozer (Vostochnoe Zabaikale) [Assessment of the mobility of chemical elements in the basalt-natural waters-secondary deposits system in the Torey lakes area (Eastern Transbaikalia)]. *Geologicheskaya evolyutsiya vzaimodeystviya vody s gornymi porodami. Materialy IV Vserossiyskoy nauchnoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Water-rock interaction: geological evolution. Proc. of the fourth all-Russian scientific conference with international participation]. Ulan-Ude, BSC SB RAS Publ., 2020. pp. 335–338.
 22. Borzenko S.V. Principal parameters controlling water composition in saline and brackish lakes in eastern Transbaikalia. *Geochemistry international*, 2020, vol. 58, no. 12, pp. 1356–1373.
 23. Borzenko S.V., Shvartsev S.L. Chemical composition of salt lakes in East Transbaikalia (Russia). *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 103, pp. 72–84.
 24. Borzenko S.V. Isotopic composition of water of salt lakes in eastern Transbaikalia. *Doklady akademii nauk*, 2019, vol. 488, no. 2, pp. 176–180. In Rus.
 25. Sinita S.M. Toreyand East-Torey Basins (Stratigraphy, Paleontology, Paleoreconstruction). *Scholarly Notes of Transbaikalia State University*, 2015, vol. 1, no. 60, pp. 129–138. In Rus.
 26. Kirilyuk O.K., Kirilyuk V.E., Goroshko O.A., Sarayeva L.I., Sinita S.M., Borodina T.I., Tkachenko E.E., Brinikh V.A. *Biوسفery zapovednik «Dauryski»* [State nature biosphere reserve «Dauryski»]. Chita, Express-publishing house, 2009. 104 p.
 27. Zamana L.V., Borzenko S.V. Hydrochemical regime of saline lakes in the southeastern Transbaikalia. *Geography and Natural Resources*, 2010, vol. 31, no. 4, pp. 370–376.
 28. Bazhenova O.I. Current dynamics of fluvio-lacustrine systems of Onon-Torei high plain (southern Transbaikalia). *Tomsk State University Journal*, 2013, vol. 371, pp. 171–177. In Rus.
 29. Ferronsky V.I., Polyakov V.A. *Izotopiya gidrosfery Zemli* [Isotops of the Earth's hydrosphere]. Moscow, Nauchny Mir Publ., 2009. 632 p.
 30. Clark I. *Groundwater geochemistry and isotopes*. Boca Raton, CRC Press, Taylor & Francis Group Publ., 2015. 456 p.
 31. Yudovich Ya.E., Ketris M.P. Relationships of carbon isotopes in the sedimentary shell and the biosphere: four scenarios. *Biosfera*, 2010, vol. 2, no. 2, pp. 231–246. In Rus.
 32. Galimov E.M. *Geokhimiya stabilnykh izotopov ugleroda* [Geochemistry of stable isotopes of carbon]. Moscow, Nedra Publ., 1968. 226 p.
 33. Gutsalo L.K. *Formirovaniye podzemnykh vod i gazov zemnoy kory po izotopnym dannym*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Formation of groundwater and gases of the earth's crust according to isotopic data. Cand. Diss. Abstract]. St-Petersburg, 1997. 98 p.
 34. Zerkle A.L., Kamyshny A., Kump L.R., Farquhar J., Oduro H., Arthur M.A. Sulfur cycling in a stratified euxinic lake with moderately high sulfate: Constraints from quadruple S isotopes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, vol. 74, no. 17, pp. 4953–4970.
 35. Cui G., Li X., Yang M., Ding Sh., Li Q., Wang Y., Yang Zh., Ding Hu. Insight into the mechanisms of denitrification and sulfate reduction coexistence in cascade reservoirs of the Jialing River: Evidence from a multi-isotope approach. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 749, pp. 1–10.
 36. Li X., Tang Ch., Cao Y., Li D. A multiple isotope (H, O, N, C and S) approach to elucidate the hydrochemical evolution of shallow groundwater in a rapidly urbanized area of the Pearl River Delta, China. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 724, pp. 1–13.
 37. Borzenko S.V., Zamana L.V. Reduced forms of sulfur in the brine of saline-soda lake Doroninskoe, eastern Transbaikalia region. *Geochemistry International*, 2011, vol. 49, no. 3, pp. 253–261.
 38. Borzenko S.V., Zippa E.V. Isotopic composition and origin of sulfide and sulfate species of sulfur in thermal waters of Jiangxi Province (China). *Aquatic Geochemistry*, 2019, vol. 25, no. 1–2, pp. 49–62.

Received: 15 July 2021.

Information about the authors

Olesya E. Lepokurova, Dr. Sc., head of laboratory, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS; professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Valeriia V. Drebot, junior research associate, Tomsk Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of SB RAS; postgraduate student, research engineer, National Research Tomsk Polytechnic University.