



Оригинальная статья / Original article

УДК 550.461

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-159-166>



Особенности строения и процессы формирования сложнопостроенного гидрогеохимического разреза в Байкальской рифтовой зоне

© С.Х. Павлов^а

^аИнститут земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Резюме: Целью данной работы являлось исследование влияния органического вещества на формирование ионно-солевого и газового состава азотно-метановых и метановых термальных вод, распространенных в осадочных породах глубоких горизонтов артезианских бассейнов. Объектом исследования стали Тункинский межгорный артезианский бассейн Байкальской рифтовой зоны и Тунгорское газонефтяное месторождение Охотско-Сахалинского бассейна, где в глубоких горизонтах распространены содовые (инверсионные) низко- и высокоминерализованные подземные воды. Работа основана на синтезе результатов традиционного изучения состава природных растворов и количественного исследования физико-химических взаимодействий в системе «вода – порода», проведенного с помощью программного комплекса «Селектор» по степени протекания гидрогеохимического процесса, которая задавалась величиной отношения порода / вода. При взаимодействии использовались химически чистая вода и порода среднего химического состава. Применение физико-химического моделирования позволило проследить процессы формирования состава термальных вод в осадочных породах в зависимости от степени взаимодействия воды с породой и количества органического вещества. В результате установлено определяющее влияние содержащегося в породе органического вещества на интенсивность протекания гидрогеохимического процесса: величину минерализации, соотношение компонентов и количество образующихся метана, азота и углекислоты. Соответствие состава модельных и природных растворов показало возможность формирования различной степени газонасыщенности как низко-, так и высокоминерализованных гидрокарбонатных натриевых подземных вод в пластовых условиях глубоких горизонтов осадочных бассейнов за счет внутренних резервов системы «вода – порода» без привлечения каких-либо компонентов из внешних источников.

Ключевые слова: метановые термы, термодинамическое моделирование, физико-химическое взаимодействие, состав модельных и природных растворов

Для цитирования: Павлов С.Х. Особенности строения и процессы формирования сложнопостроенного гидрогеохимического разреза в Байкальской рифтовой зоне. *Науки о Земле и недропользование*. 2021. Т. 44. № 2. С. 159–166. <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-159-166>

Structural features and formation processes of a complex hydrogeochemical section in the Baikal rift zone

© Sergey Kh. Pavlov^a

^aInstitute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia

Abstract: The purpose of the work is to study the effect of organic matter on the formation of ion-salt and gas composition of nitrogen-methane and methane thermal water occurring in the sedimentary rocks of deep horizons of artesian basins. The object of research is the Tunka intermountain artesian basin of the Baikal rift zone and the Tungor gas and oil field of the Okhotsk-Sakhalin basin, in the deep horizons of which soda (inversion) low- and high-mineralized groundwater is common. The study combines the results of the traditional study of the composition of natural solutions and the quantitative research of physical and chemical interactions in the “water – rock” system conducted using the Selector software package according to the degree of the hydrogeochemical process, which was set by the value of the rock/water ratio. Chemically pure water and rocks of medium chemical composition were used in interaction. With the use of physicochemical modeling the formation of thermal water composition in sedimentary rocks depending on the interaction degree between water and rock and the amount of organic matter was unravelled. As a result, it was determined that the organic matter present in the rock has the dominant influence on the intensity of the hydrogeochemical process determining the amount of mineralization, the ratio of components, and the amount of methane, nitrogen, and carbon dioxide produced. The correspondent compositions of the model and natural solutions showed the possibility to form low- and high-mineralized sodium bicarbonate groundwater of different gas-saturation degree in the conditions of deep horizons of sedimentary basins due to the internal reserves of the “water – rock” system not involving any components from external sources.

Keywords: methane hot springs; thermodynamic modeling; physicochemical interaction; composition of model and natural solutions



For citation: Pavlov SKh. Structural features and formation processes of a complex hydrogeochemical section in the Baikal rift zone. *Nauki o Zemle i nedropol'zovanie = Earth sciences and subsoil use*. 2021;44(2):159–166. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2686-9993-2021-44-2-159-166>

Введение

Весьма сложные гидрогеологические условия существуют даже в верхних горизонтах платформенных структур [1], что же касается рифтовых и рифтоподобных зон, то здесь они отличаются особой сложностью [2], однако по-прежнему продолжают рассматриваться по весьма упрощенным схемам [3, 4 и др.]. В Байкальской рифтовой зоне выявлены весьма сложные гидрогеологические, гидрогеодинамические, гидрогеохимические и гидрогеотермические условия [5]. Здесь, подобно Кавказским минеральным водам, на разных гипсометрических уровнях одного и того же разреза распространены различные химические типы минеральных вод, движущиеся в противоположных направлениях [6], происхождение которых активно обсуждается [7, 8 и др.].

В Тункинской впадине установлено существование двух водонапорных систем, в которых формирование ресурсов и состава подземных вод происходит принципиально различными путями [5]. В кристаллических породах фундамента впадины широко распространены азотные и углекислые термы, имеющие инфильтрационное происхождение и вместе с пресными водами представляющие единую водонапорную систему, развитие которой определяется динамикой инфильтрационных вод в области питания в Тункинских гольцах. В глубоких же горизонтах осадочной толщи распространены метановые термы седиментационного генезиса. В этой работе были исследованы физико-химические взаимодействия воды с различными породами, слагающими разрез, и прослежены процессы формирования азотных, углекислых и метановых терм.

Процессы формирования азотных и углекислых терм исследовались с реальными породами, в которых наряду с петрогенными были определены содержания летучих элементов, химический же состав осадочных пород реконструировался. Неполный силикатный анализ этих пород, заимствованный из работы [9], последовательно дополнялся

средними величинами летучих элементов из работ [10, 11] с последующей их корректировкой, благодаря чему состав модельных растворов приближался к составу реальных терм. Средние содержания органического углерода (C_{org}) в осадочных породах, которые принимались в расчет, колеблются около 1 % [10, 11], тогда как его концентрации в осадочной толще Тункинской впадины достигают 5–8 % [12].

Материалы и методы исследования

Целью данного исследования являлось выяснение влияния органического вещества на формирование состава подземных вод глубоких горизонтов. Поэтому исследование проведено уже не на примере ограниченных анализов химического состава пород Тункинской впадины, а на основе масштабных обобщений полноценных данных по обширным площадям регионального уровня, для которых рассчитаны средние значения химического состава осадочных пород. С этой целью, как и в работе [5] с помощью программного комплекса «Селектор» [13, 14], были исследованы процессы физико-химических взаимодействий воды с глинистым сланцем [11] по степени протекания гидрогеохимического процесса, когда масса воды, равная 1 кг, остается постоянной на всех этапах взаимодействия, а количество породы увеличивается от 10^{-6} до 10^0 кг с шагом 0,1. В системе, закрытой к атмосфере, температура и давление были постоянными и составляли 50 °C и 70 бар. В модель дополнительно были введены гомологи углеводородов и органические кислоты. Было проведено три серии расчетов для содержаний C_{org} в породе 1, 2 и 3 % [12].

Результаты исследования

Результаты расчетов для величин отношения порода / вода 0,1 и 1 для содержаний углерода 1 и 2 % и 0,04, 0,1, 0,4 и 1 для содержаний углерода 3 % представлены в таблице. Для сравнения в таблицу включены



результаты анализа метановых вод Тункинской впадины [5] и высококарбонатных подземных вод Тунгорского газонефтяного месторождения Охотско-Сахалинского бассейна [15].

Результаты расчетов показывают, что в этих условиях формируются высокощелочные с высокими восстановительными свойствами растворы, минерализация которых увеличивается по мере не только увеличения степени взаимодействия воды с породой, но и повышения содержания органического вещества в породе, причем в последнем случае интенсивнее, и при максимальной степени взаи-

модействия минерализация растворов изменяется от 2,5 до 8,7 и 17,8 г/кг H₂O. Во всех случаях формируются метановые воды содового состава, в которых содержание щелочно-земельных металлов остается на очень низком уровне. Концентрация калия хоть и незначительно, но повышается – как с увеличением степени взаимодействия, так и с увеличением органического вещества в породе. Концентрация аммония многократно превышает содержание этих катионов.

В анионной части растворов кроме главных гидрокарбонатных и карбонатных ионов

Величины Eh, pH, минерализации и компонентов модельных растворов, мг/кг H₂O, в системе «вода – глинистый сланец» при температуре 50 °С и давлении 70 бар с различным содержанием органического углерода и величиной отношения порода / вода в сравнении с природными термами
Eh, pH values of salinity and components of model solutions, mg/kg H₂O, in the “water – clay shale” system at the temperature of 50 °С and pressure of 70 bar with the different content of organic carbon and rock/water ratio as compared to natural hot springs

Сорг, %	Порода / вода	Eh, В	pH	Минерализация	NH ₄ ⁺	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	HS ⁻
1	0,1	-0,470	9,41	1345	11	0,5	415	0,5	0	537	154	0,67
	1	-0,459	9,21	2494	103	0,8	677	0,9	0	450	90	0,59
2	0,1	-0,461	9,27	1877	14	0,7	569	0,7	0	887	193	0,81
	1	-0,411	8,66	8702	83	3,2	2598	0,7	0	4738	328	0,64
3	0,04	-0,365	7,95	1322	25	1,4	330	3,5	0,2	876	8	0,12
	0,1	-0,388	8,30	3116	48	6,6	830	1,3	0,1	2033	50	0,28
	0,4	-0,407	8,62	9967	60	3,6	2895	0,5	0	6123	388	0,55
	1	-0,387	8,38	17828	80	6,5	5268	0,2	0,2	10918	428	0,27
P-1* (728–766)		-0,2	8,4	1291	3	2,6	327	25	7,3	840	25	0
(2016–2048)**		–	–	9600	–	2781		20	10	6464		–
(2080–2110)***		–	–	10100	–	3434		14	10	4764		–
Сорг, %	Порода / вода	Cl ⁻	F ⁻	HSiO ₃ ⁻	SiO ₂ ⁰	CO ₂ ⁰	CH ₄ ⁰	N ₂ ⁰	NH ₃ ⁰	Газ, мл/кг H ₂ O		
										N ₂	CO ₂	CH ₄
1	0,1	63	42	30	15	0,2	555	0,7	62	0	0	0
	1	634	121	19	15	0,3	1085	19	366	161	0,04	6364
2	0,1	62	42	22	15	0,5	910	0,8	58	0,5	0	374
	1	634	208	5	15	10	882	14	73	365	4	15488
3	0,04	25	16	1	15	11	725	0,8	5	0	0	0
	0,1	62	41	2	15	10	908	1	21	2	0,3	1276
	0,4	249	166	5	15	15	890	8	47	113	3	8966
	1	636	425	3	14	45	877	10	33	393	30	24492
P-1* (728–766)		75	1	0	33	0"	82"	17"	0"	8"	0,5"	91"
(2016–2048)**		336	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
(2080–2110)***		1830	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. * – химический состав метановых термальных вод из скважины P-1 в интервале 728–766 м в Тункинской впадине; " – содержание растворенных и свободных газов в скважине P-1 в Тункинской впадине выражено в %. **, *** – химический состав подземных вод Тунгорского газонефтяного месторождения Охотско-Сахалинского бассейна в интервале опробования, м: ** – 2016–2048; *** – 2080–2110.

Note. * – chemical composition of methane thermal water from the well R-1 in the range of 728–766 m in the Tunka depression; " – the content of dissolved and free gases in the well R-1 in the Tunka depression is expressed in %. **, *** – chemical composition of groundwater in the Tungor oil and gas field of the Okhotsk-Sakhalin basin in the sampling interval, m: ** – 2016–2048; *** – 2080–2110.



повышенные и даже высокие концентрации имеют ионы хлора и фтора. Весьма примечательной особенностью данной системы является то, что при значительном содержании серы в породе она практически полностью концентрируется в твердой фазе в форме пирита и в микроколичествах присутствует в растворе в форме гидросульфида. Характерной особенностью системы является незначительное присутствие в растворе кремния в форме гидросиликатного иона и кремниевой кислоты.

Благодаря способности углерода к диспропорционированию, интенсивное развитие в системе получили как окисленные, так и восстановленные формы углерода, которые не только присутствуют в растворенной форме, но и формируют газовую фазу. Наряду с гидрокарбонатными и карбонатными ионами в растворе присутствует углекислота. Ее содержание как в растворенной форме, так и в газовой фазе низкое, но имеет устойчивую тенденцию к повышению с увеличением содержания $C_{орг}$ в породе.

С такой же закономерностью в системе происходит увеличение метана, содержание которого в отличие от углекислоты высокое и очень высокое. Содержание растворенного метана в разных растворах $C_{орг}$ из-за низкой его растворимости при одинаковой степени взаимодействия колеблется около средней величины, тогда как в газовой фазе его содержание многократно увеличивается и достигает 6,4; 15,5 и 24,5 л/кг H_2O . В газовой фазе в незначительном количестве появляется также этан, содержание которого увеличивается от сотых до первых единиц десятых долей мг/кг H_2O . Азот присутствует в форме аммония, аммиака и азота в растворенной и газовой фазах. С появлением газовой фазы начинается перераспределение азота между раствором и газовой фазой в пользу последней.

В растворах породы, содержащей 1 и 2 % $C_{орг}$, появляются карбоксильная группа и ион уксусной кислоты, а в растворах породы с 3 % $C_{орг}$ добавляется еще и ацетат натрия. Содержания их невелики, максимальные значения достигают десятых долей и первых мг/кг H_2O . Однако здесь нужно учитывать, что это соответствует условиям полного равновесия,

тогда как при более высоком уровне метастабильности количество их было явно выше [16]. Тем не менее важно то, что они образуются и что при увеличении концентрации органического вещества отмечается их рост, а это является одним из важных факторов интенсификации гидрогеохимического процесса. Физико-химические процессы взаимодействия в геохимических системах, включающих углерод и воду, очень сложны. Особая, можно сказать, уникальная роль углерода заключается в том, что в системах «газ – водный раствор – минералы – органическое вещество» он является тем реагентом, который относительно легко переходит от одной степени окисления к другой на пути необратимой эволюции этой системы от метастабильного к полному или близкому к полному термодинамическому равновесию. Глубокое понимание и объяснение значения этих процессов в геохимических системах, содержащих углерод и воду, приводится в работах [17–22].

Обсуждение полученных результатов

Сравнение модельных растворов с реальными термами показывает следующее. Величине минерализации метановых терм Тункинской впадины наиболее близки модельные растворы, сформировавшиеся при величинах отношения порода / вода 0,1 для 1 % $C_{орг}$ и 0,04 для 3 % $C_{орг}$. Тем не менее наиболее близок к природному состав второго модельного раствора. Почти идентичны природным в нем количества щелочных и гидрокарбонатных ионов, сопоставимы значения хлора и кремния, а также присутствует азотно-метановый газ. Значительные отличия имеют щелочноземельные металлы и фтор. Поведение щелочноземельных металлов является слабым звеном модельных растворов на данном этапе применения моделирования. Что же касается фтора, то здесь явно проявляется эффект геологической неоднородности относительно химического состава пород, который достаточно убедительно раскрыт в работе [23].

Два анализа высококарбонатных вод по величине минерализации достаточно близки друг другу и соответствуют модельному раствору с 3 % $C_{орг}$ в породе при величине



отношения порода / вода 0,4. Однако по ионно-солевому составу наиболее близка модельному раствору вода с минерализацией 9,6 г/кг H₂O. Связано это прежде всего с величиной иона хлора, которая в обоих растворах очень близка, соответственно, и концентрации карбонатных ионов и натрия практически равны. Во втором анализе незначительное увеличение минерализации природной воды до 10,1 г/кг H₂O сопровождается почти восьмикратным повышением концентрации иона хлора и существенным уменьшением концентрации гидрокарбонатных ионов, что приводит к значительному различию с составом модельного раствора. Здесь важно то, что в первом случае соответствие состава модельного раствора и природной воды достигнуто при взаимодействии породы среднего химического состава с повышенным содержанием $S_{орг}$ с химически чистой водой без участия дополнительных источников хлора. Известно, что колебания содержаний химических элементов в породе от их средних значений могут иметь достаточно широкий интервал, поэтому и здесь вполне реально допущение того, что повышенное содержание хлора в термальной воде связано прежде всего с его повышенным относительно среднего значения содержанием в породе.

Заключение

Таким образом, количественное исследование физико-химических взаимодействий в

системе «вода – глинистый сланец», в которой глинистый сланец имеет средний химический состав и содержит различное количество органического вещества, показало следующее. Присутствие в породе органического вещества и его количество является основным фактором активности гидрогеохимического процесса, который многократно увеличивает его интенсивность. В результате взаимодействия формируются щелочные и высокощелочные с высокими восстановительными свойствами бессульфатные метановые воды содового состава, в которых образуется газовая фаза весьма значительного объема. Средний состав породы обеспечивает формирование растворов, которые имеют высокую сходимость как с низко-, так и с высокоминерализованными природными термальными водами. Наряду с этим четко проявилась хорошо выраженная в природе геологическая неоднородность, в данном случае по химическому составу пород. Этот фактор формирования состава подземных вод требует пристального внимания при исследовании гидрогеохимических процессов, без учета которых процессы формирования состава подземных вод нельзя считать раскрытыми. Высокоминерализованные (инверсионные) гидрокарбонатные натриевые воды, достаточно широко распространенные во многих артезианских бассейнах, формируются внутри системы «вода – порода» без привлечения каких-либо компонентов из внешних источников.

Список литературы

1. Шестаков В.М. Учет геологической неоднородности – ключевая проблема гидрогеодинамики // Вестник Московского университета. Геология. 2003. № 1. С. 29–28.
2. Карцев А.А., Абукова Л.А. Нефтегазовая гидрогеология на современном этапе // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. 1998. № 4. С. 12–17.
3. Плюснин А.М., Замана Л.В., Шварцев С.Л., Токаренко О.Г., Чернявский М.К. Гидрогеохимические особенности состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 5. С. 647–664.
4. Шварцев С.Л., Замана Л.В., Плюснин А.М., Токаренко О.Г. Равновесие азотных терм Байкальской рифтовой зоны с минералами водовмещающих пород как основа для выявления механизмов их формирования // Геохимия. 2015. № 8. С. 720–733. <https://doi.org/10.7868/S0016752515060084>
5. Павлов С.Х., Чудненко К.В., Голубева В.А., Оргильянов А.И., Бадминов П.С., Крюкова И.Г. Геологические факторы и физико-химические процессы формирования подземных вод Тункинской впадины // Геодинамика и тектонофизика. 2018. Т. 9. № 1. С. 221–248. <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0346>
6. Кавказские минеральные воды / отв. ред. В.В. Иванов. М.: Изд-во ЦНИИКФ, 1972. 158 с.
7. Лаврушин В.Ю., Лисенков А.Б., Айдаркожина А.С. Генезис Ессентукского месторождения углекислых вод (Северный Кавказ) // Геохимия. 2020. Т. 65. № 1. С. 77–91. <https://doi.org/10.31857/S0016752520010082>
8. Абрамов В.Ю., Вавичкин А.Ю. Особенности формирования термогазохимического состава минеральных вод Ессентукского месторождения // Разведка и охрана недр. 2010. № 10. С. 27–32.



9. Мазиллов В.Н., Кашик С.А., Ломоносова Т.К. Олигоценные отложения Тункинской впадины (Байкальская рифтовая зона) // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 8. С. 81–87.

10. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. № 7. С. 555–571.

11. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 182 с.

12. Логачев Н.А. Кайнозойские континентальные отложения впадин байкальского типа // Известия Академии наук СССР. Серия геологическая. 1958. № 4. С. 18–29.

13. Карпов И.К. Физико-химическое моделирование на ЭВМ в геохимии. Новосибирск: Наука, 1981. 247 с.

14. Чудненко К.В. Термодинамическое моделирование в геохимии: теория, алгоритмы, программное обеспечение, приложения. Новосибирск: Гео, 2010. 287 с.

15. Киреева Т.А., Всеволожский В.А. Инверсионные гидрокарбонатно-натриевые воды как показатель нефтегазоносности глубоких частей геологического разреза // Глубинная нефть. 2013. Т. 1. № 2. С. 234–245 [Электронный ресурс]. URL: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-1-2-2013/7_Kireeva-Vsevolozhskiy_1-2-2013.pdf (10.02.2021).

16. Павлов С.Х., Карпов И.К., Чудненко К.В. Диспропорционирование и фракционирование углерода в системе «углерод – вода – газ» // Геохимия. 2006. № 7. С. 797–800.

17. Helgeson H.C., Knox A.M., Owens C.E., Shock E.L. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocar-

bon reservoirs // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1993. Vol. 57. Iss. 14. P. 3295–3339. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90541-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90541-4)

18. Karpov I.K., Chudnenko K.V., Kulik D.A. Modeling chemical mass transfer in geochemical processes: thermodynamic relations, conditions of equilibria, and numerical algorithms // *American Journal of Science*. 1997. Vol. 297. Iss. 8. P. 767–806. <https://doi.org/10.2475/ajs.297.8.767>

19. Karpov I.K., Chudnenko K.V., Kulik D.A., Bychinskii V.A. The convex programming minimization of five thermodynamic potentials other than Gibbs energy in geochemical modeling // *American Journal of Science*. 2002. Vol. 302. Iss. 4. P. 281–311. <https://doi.org/10.2475/ajs.302.4.281>

20. Palandri J.L., Reed M.H. Reconstruction of in situ composition of sedimentary formation waters // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. Vol. 65. Iss. 11. P. 1741–1767. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00555-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00555-5)

21. Plyasunov A.V., Shock E.L. Standard state Gibbs energies of hydration of hydrocarbons at elevated temperatures as evaluated from experimental phase equilibria studies // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000. Vol. 64. Iss. 16. P. 2811–2833. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00401-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00401-4)

22. Price L.C., DeWitt E. Evidence and characteristics of hydrolytic disproportionation of organic matter during metasomatic processes // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001. Vol. 65. Iss. 21. P. 3791–3826. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00762-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00762-1)

23. Павлов С.Х., Чудненко К.В., Хромов А.В. Моделирование формирования фторидных азотных терм в системе «вода – кристаллическая порода» // Геодинамика и тектонофизика. 2020. Т. 11. № 2. С. 378–396. <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0481>

References

1. Shestakov V.M. Account of geological heterogeneity as a major problem of hydrogeodynamics. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Geologiya*. 2003;1:29–28. (In Russ.)

2. Kartsev A.A., Abukova L.A. Petroleum hydrology at present stage. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Neft' i gaz = Oil and Gas Studies*. 1998;4:12–17. (In Russ.)

3. Plyusnin A.M., Zamana L.V., Shvartsev S.L., Tokarenko O.G., Chernyavskii M.K. Hydrogeochemical peculiarities of the composition of nitric thermal waters in the Baikal Rift Zone. *Geologiya i geofizika*. 2013;54(5):647–664. (In Russ.)

4. Shvartsev S.L., Zamana L.V., Plyusnin A.M., Tokarenko O.G. Equilibrium of nitric springs of the Baikal rift zone with the minerals of water-bearing rocks as a basis for their formation mechanism identification. *Geokhimiya*. 2015;8:720–733. <https://doi.org/10.7868/S0016752515060084>

5. Pavlov S.K., Chudnenko K.V., Golubev V.A., Orgilyanov A.I., Badminov P.S., Kryukova I.G. Geological factors and physicochemical processes of groundwater formation in the Tunka depression. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2018;9(1):221–248. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0346>

6. Ivanov V.V. *Caucasian mineral waters*. Moscow: Central Research Institute of Balneology and Physiotherapy; 1972. 158 p. (In Russ.)

7. Lavrushin V.Y., Aidarkozhina A.S., Lisenkov A.B. Genesis of the Essentuki deposit of carbonate water (North Caucasus). *Geokhimiya*. 2020;65(1):77–91. (In Russ.) <https://doi.org/10.31857/S0016752520010082>

8. Abramov V.Yu., Vavichkin A.Yu. Formation features of the thermogasochemical composition of mineral water of the Essentuki deposit. *Razvedka i okhrana nedr = Prospect and Protection of Mineral Resources*. 2010;10:27–32. (In Russ.)

9. Mazilov V.N., Kashik S.A., Lomonosova T.K. Oligocene deposits in the Tunka depression (Baikal rift zone). *Geologiya i geofizika*. 1993;34(8):81–87. (In Russ.)

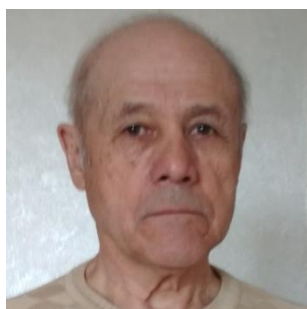
10. Vinogradov A.P. Average contents of chemical elements in the main types of igneous rocks of the crust. *Geokhimiya*. 1962;7:555–571. (In Russ.)

11. Ronov A.B., Yaroshevskii A.A., Migdisov A.A. *Chemical composition of the Earth's crust and the geochemical balance of the main elements*. Moscow: Nauka; 1990. 182 p. (In Russ.)



12. Logachev NA. Cenozoic continental deposits in Baikal type depressions. *Izvestiya Akademii nauk SSSR. Seriya geologicheskaya*. 1958;4:18–29. (In Russ.)
13. Karpov IK. *Physico-chemical computer modeling in geochemistry*. Novosibirsk: Nauka; 1981. 247 p. (In Russ.)
14. Chudnenko KV. *Thermodynamic modeling in geochemistry: the theory, algorithms, the software, applications*. Novosibirsk: Geo; 2010. 287 p. (In Russ.)
15. Kireeva TA, Vsevolozhsky VA. Contrails sodium bicarbonate-water oil and gas as an indicator of the deeper parts of the geological section. *Glubinnaya neft'*. 2013;1(2):234–245. Available from: http://journal.deepoil.ru/images/stories/docs/DO-1-2-2013/7_Kireeva-Vsevolozhskiy_1-2-2013.pdf [Accessed 10th February 2021]. (In Russ.)
16. Pavlov SKh, Karpov IK, Chudnenko KV. Carbon disproportionation and fractionation in the “carbon – water – gas” system. *Geokhimiya*. 2006;7:797–800. (In Russ.)
17. Helgeson HC, Knox AM, Owens CE, Shock EL. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1993;57(14):3295–3339. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(93\)90541-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(93)90541-4)
18. Karpov IK, Chudnenko KV, Kulik DA. Modeling chemical mass transfer in geochemical processes: thermodynamic relations, conditions of equilibria, and numerical algorithms. *American Journal of Science*. 1997;297(8):767–806. <https://doi.org/10.2475/ajs.297.8.767>
19. Karpov IK, Chudnenko KV, Kulik DA, Bychinskii VA. The convex programming minimization of five thermodynamic potentials other than Gibbs energy in geochemical modeling. *American Journal of Science*. 2002;302(4):281–311. <https://doi.org/10.2475/ajs.302.4.281>
20. Palandri JL, Reed MH. Reconstruction of in situ composition of sedimentary formation waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001;65(11):1741–1767. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00555-5](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00555-5)
21. Plyasunov AV, Shock EL. Standard state Gibbs energies of hydration of hydrocarbons at elevated temperatures as evaluated from experimental phase equilibria studies. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2000;64(16):2811–2833. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(00\)00401-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(00)00401-4)
22. Price LC, DeWitt E. Evidence and characteristics of hydrolytic disproportionation of organic matter during metasomatic processes. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2001;65(21):3791–3826. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(01\)00762-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(01)00762-1)
23. Pavlov SK, Chudnenko KV, Khromov AV. Modeling the formation of fluoride nitrogen-rich hot springs in the water – crystalline rock system. *Geodinamika i tektonofizika = Geodynamics & Tectonophysics*. 2020;11(2):378–396. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2020-11-2-0481>

Сведения об авторе / Information about the author



Павлов Сергей Харитонович,

кандидат геолого-минералогических наук,
старший научный сотрудник Лаборатории гидрогеологии,
Институт земной коры СО РАН,
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия,
✉ e-mail: spavlov@crust.irk.ru

Sergey Kh. Pavlov,

Cand. Sci. (Geol. & Mineral.),
Senior Researcher of the Hydrogeology Laboratory,
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
128 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,
✉ e-mail: spavlov@crust.irk.ru

Заявленный вклад автора / Contribution of the author

Автор по итогам количественного изучения процессов физико-химических взаимодействий в системе «вода – порода – газ – органическое вещество» проследил процессы формирования содовых метановых термальных вод в глубоких горизонтах артезианских бассейнов в зависимости от концентрации органического вещества в породе. На основании полученных результатов провел обобщение, подготовил рукопись к печати.

Having conducted a quantitative study of the physical and chemical interaction processes in the “water – rock – gas – organic matter” system, the author traced the formation processes of soda methane thermal waters in the deep horizons of artesian basins depending on organic matter concentration in rock. On the basis of the results obtained he made a generalization and prepared the copyright for publication.

Конфликт интересов / Conflict of interests

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.
The author declares no conflicts of interests.



*Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.
The final manuscript has been read and approved by the author.*

Информация о статье / Information about the article

Статья поступила в редакцию 04.03.2021; одобрена после рецензирования 06.04.2021; принята к публикации 10.05.2021.

The article was submitted 04.03.2021; approved after reviewing 06.04.2021; accepted for publication 10.05.2021.