

УДК 556.114:556.3/.5(282.256.314:571.5-751)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_95_42-53

В. В. Петров (*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского*), Д. В. Яковлев (*Санкт-Петербургский государственный университет*)

ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРИРОДНЫХ ВОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЗОНЫ БАЙКАЛЬСКОЙ ПРИРОДНОЙ ТЕРРИТОРИИ

Создана объемная цифровая гидрогеохимическая модель территории. В глубокой части разреза Байкальского артезианского бассейна, предположительно, распространены седиментогенные метановые слабосоленые щелочные воды. Выявлена устойчивая ассоциация литофильных компонентов (Li, B, Na, Si, K, Rb, Hf, W) в максимально аномальных концентрациях ($X_{cp} + 3\sigma$) в термальных водах Центральной экологической зоны (ЦЭЗ) озеро Байкал, что позволило выделить территории глубинного питания подземных вод. Показано, что свободные газы в акватории озера Байкал на участках с мощным чехлом осадочных пород кайнозоя имеют метановый и азотно-метановый состав, а в других районах их состав азотный. Изучен изотопный состав природных вод.

Ключевые слова: Байкальский субаквальный артезианский бассейн, гидрогеологический этаж, гидрогеохимическая зональность, природные воды, микрокомпоненты, свободные и растворенные газы.

V. V. Petrov (*A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute*),
D. V. Yakovlev (*St. Petersburg State University*)

GEOCHEMICAL FEATURES OF NATURAL WATERS IN THE CENTRAL ECO-ZONE OF THE BAIKAL NATURE RESERVE

A three-dimensional digital hydrogeochemical model of the area was created. Sedimentogenic methane weakly saline alkaline waters are presumably widespread in the deep part of the section of the Baikal artesian basin. A stable association of lithophilic components (Li, B, Na, Si, K, Rb, Hf, W) in maximum anomalous concentrations ($X_{av} + 3\sigma$) was revealed in the thermal water of the Central Eco-Zone (CEZ) of Lake Baikal, which made it possible to identify areas of deep groundwater recharge. It was shown that free gases in Lake Baikal in areas with a thick cover of Cenozoic sedimentary rocks had a methane and nitrogen-methane composition, while in other places their composition was nitrogen. The isotopic composition of natural waters was studied.

Keywords: Baikal subaqueous artesian basin, hydrogeological stage, hydrogeochemical zonation, natural water, microcomponents, free and dissolved gas.

Для цитирования: Петров В. В., Яковлев Д. В. Геохимические особенности природных вод Центральной экологической зоны Байкальской природной территории // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 95. – С. 42–53. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_95_42-53

Введение. Изучение гидрогеохимических особенностей природных вод Прибайкалья ведется на протяжении многих десятилетий (Басков, Климов, 1963; Плюснин, 2008, 2013 и др.), [6; 7; 10]. Отмеченные исследования касались по большей части азотных терм Байкальской рифтовой зоны. В результате после долгих дискуссий были обоснованы условия формирования этих терм глубинного питания за счет метеогенных жильных вод горного обрамления Байкальской рифтовой зоны, погружающихся на значительные глубины (более 3–4 км).

В то же время, представляется важным сравнение особенностей распределения концентраций макро- и микрокомпонентов химического, газового и изотопного составов разного типа природных вод, распространенных в данном регионе. Наряду

с термальными имеются в виду грунтовые, артезианские и поверхностные воды, включая воды озера Байкал.

Представленная работа выполнена в рамках исследований ФГБУ «ВСЕГЕИ» в 2015–2020 гг. Пробы воды отбирались вдоль всего побережья озера Байкал, из холодных и термальных источников, колодцев и скважин, а также из озер, рек, ручьев и из самого озера. Всего отобрано и проанализировано более 600 проб воды. В настоящее время работы продолжают.

Общая гидрогеохимическая зональность. Данная территория включает часть Байкальской гидрогеологической складчатой области и восточную краевую часть Ангаро-Ленского артезианского бассейна (гидрогеохимия последнего

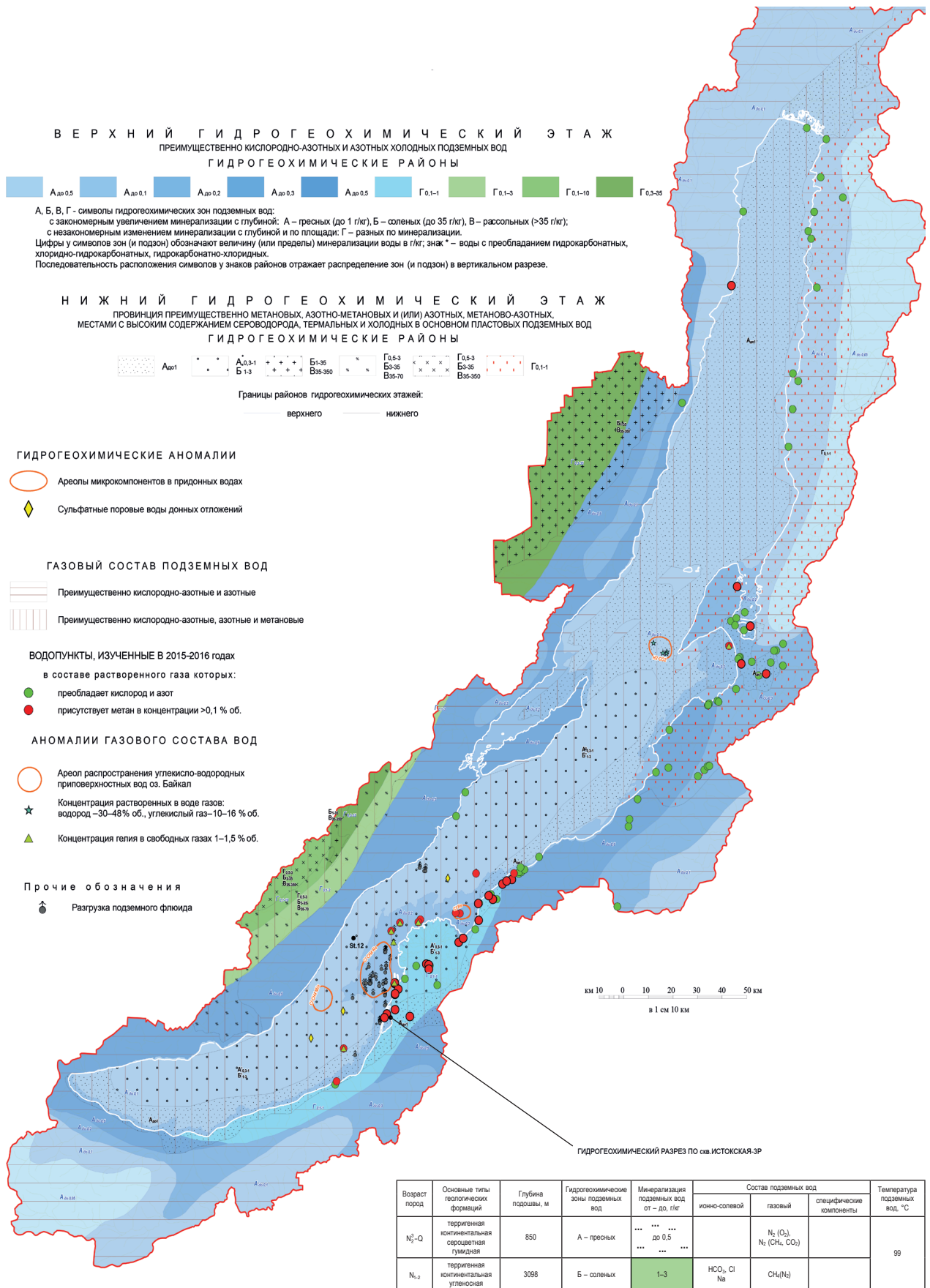


Рис. 1. Схематическая гидрогеохимическая карта Центральной экологической зоны Байкальской природной территории

далее в тексте не рассматривается). Байкальская гидрогеологическая складчатая область осложнена рядом межгорных артезианских бассейнов, в том числе крупным Байкальским межгорным субаквальным артезианским бассейном. Чехол его мощностью до 9 км и более, представленный терригенными отложениями кайнозоя, покрыт водами одноименного озера. Местами по восточному и северному борту чехол бассейна выходит на поверхность. Наибольшая глубина вскрытия чехла бурением (до 3000 м) выполнена в дельте р. Селенга. Благодаря этим работам, получены некоторые сведения по гидрогеологии и гидрогеохимии глубоких горизонтов чехла бассейна. В пределах акватории гидрогеология и гидрогеохимия Байкальского артезианского бассейна практически не изучена.

Основные гидрогеохимические закономерности Байкальского межгорного артезианского бассейна и его горного обрамления отражены на схематической гидрогеохимической карте ЦЭЗ Байкальской природной территории (БПТ) масштаба 1 : 1 500 000 (рис.1).

В основу легенды карты положен принцип гидрогеохимической зональности подземных вод, позволяющий расчленять разрез геологических структур до изученных глубин на гидрогеохимические этажи, а в их пределах – на гидрогеохимические провинции, гидрогеохимические районы (пояса) и гидрогеохимические зоны [3].

Гидрогеохимические этажи и провинции выделяются по признаку преобладающего распространения в подземных водах растворенных газов, так как последние являются наиболее определенным показателем направленности гидрогеохимических процессов.

Гидрогеохимические зоны и районы выделяют по признаку преобладающей степени минерализации подземных вод [5 и др.].

Основой составления карты является цифровая Гидрогеохимическая карта России масштаба 1 : 5 000 000, составленная во ВСЕГЕИ и входящая в состав комплекта карт гидрогеологического содержания, созданного во ВСЕГИНГЕО (Куренной, 2008). Субаквальная часть карты составлена на основании немногочисленных гидрогеохимических данных по поровым водам донных отложений [9; 10 и др.], также по материалам, собранным в ходе полевых работ в акватории, в том числе придонных вод и газов из донных отложений. На участках с изобатой менее 300 м мощность современных донных осадков мала (за исключением заливов – соров), здесь придонная вода ассоциировалась с поровой водой дна озера. В более глубоких частях к верхнему гидрогеохимическому этажу отнесены поровые воды окисленных донных отложений. Здесь озерная вода преобразована вследствие различных геохимических и микробиологических процессов [8].

На карте выделены два гидрогеохимических этажа, пояса которых показаны разными способами: верхнего – цветной заливкой, нижнего – при помощи крапа.

Верхний гидрогеохимический этаж расположен в верхней части разреза гидрогеологических структур. Нижняя граница его на суше определяется положением регионального базиса дренирования. Мощность этажа изменяется в широких пределах и зависит в значительной мере от глубины вреза гидрографической сети – от нескольких десятков метров в пределах низменных равнин до нескольких сот метров на всхолмленных равнинах и плоскогорьях и до тысяч метров в пределах высоких гор. В акватории озера Байкал его мощность не превышает 10–15 см.

Для подземных вод этажа характерны кислородно-азотные газы воздушного происхождения. Ионный состав и степень минерализации подземных вод этажа формируются в результате взаимодействия физико-географических и геологических факторов. Анализ карты показывает, что в верхнем этаже наблюдается гидрогеохимическая зональность, определяющаяся высотной поясностью, сводится к росту минерализации воды от более возвышенных горных частей территории, сложенных преимущественно слабообразованными кристаллическими горными породами к понижениям в рельефе от гидрокарбонатных кальциевых вод с минерализацией до 50 мг/дм³ (пояс А – до 0,05 мг/дм³) до 500 мг/дм³ (пояс А – до 0,5 мг/дм³). В пределах глубоких частей акватории озера Байкал (более 300 м) донные образования его в верхнем этаже содержат воду менее минерализованную, чем озерная вода [9]. Она пресная (до 0,1 г/дм³) гидрокарбонатная кальциевая. На меньших глубинах в донных отложениях распространены в основном слабообразованные придонные озерные гидрокарбонатные кальциевые слабощелочные и нейтральные воды с минерализацией до 0,2 г/дм³. На отдельных участках в пределах возвышенностей (грязевые вулканы?) вместе с газогидратами обнаруживаются сульфатные воды с минерализацией до 1 г/дм³ и более [9; 11 и др.]. Формирование этих вод авторы публикации связывают с подтоком из глубоких горизонтов по зонам разломов по аналогии с азотными термами Байкальской гидрогеологической складчатой области, что весьма вероятно.

Нижний гидрогеохимический этаж. По особенностям газового состава здесь выделяются две гидрогеохимические провинции (показаны на карте штриховкой): 1 – преимущественно метановых термальных и холодных в основном пластовых подземных вод и 2 – азотных термальных и холодных трещинно-жильных подземных вод. Провинция первого типа приурочена к чехлу Байкальского субаквального артезианского бассейна. Вторая провинция приурочена к складчатым структурам горного обрамления.

Данный этаж в пределах Байкальской гидрогеологической складчатой области изучен слабо. Он охарактеризован лишь на северо-востоке рассматриваемой территории, где распространены азотные термальные воды, часто выходящие на дневную поверхность в виде источников с сульфатной натриевой пресной (до 1 г/дм³) водой.

По имеющимся представлениям, формирование термальных азотных вод связано с погружением по зонам разломов вод атмосферного питания на глубины порядка 3–4 км и поднимающихся к поверхности земли в разогретом до высоких температур состоянии. В процессе миграции воды обогащаются серой сульфидов и другими компонентами [6; 7; 10]. На карте территория распространения терм характеризуется поясом Г0,1-1.

В Байкальском межгорном субаквально-артезианском бассейне распространены пресные и соленые гидрокарбонатные натриевые, хлоридно-гидрокарбонатные и гидрокарбонатно-хлоридные натриевые подземные воды (пояса $A_{до1}$; $A_{0,3-1}B_{1-3}$). В субаквальной части бассейна гидрогеохимический разрез показан исходя из общих гидрогеохимических закономерностей и сведений в изученных бортовых частях бассейна. По имеющимся данным, до глубин порядка 3000 м в бассейне распространены азотно-метановые пресные воды щелочного состава, ниже обнаружены соленые гидрокарбонатно-хлоридные натриевые воды с минерализацией 3 г/дм³ азотно-метанового газового состава. Литолого-палеогеографические исследования показывают, что в нижних частях разреза чехла Байкальского артезианского бассейна распространены терригенные породы, накопившиеся в озерном бассейне с повышенной соленостью [2]. С этими осадками захоронялись слабосоленые воды, вскрытые в Истокской скважине. Аналогичные по минерализации и составу воды, вероятно, распространены и в более глубоких частях чехла рассматриваемого артезианского бассейна.

Микрокомпонентный состав природных вод. Выполненный в химико-аналитическом центре ВСЕГЕИ масс-спектрометрический анализ

(ICP-MS с использованием масспектрометра Agilent 7700) состава природных вод показал присутствие в водах довольно богатого спектра микрокомпонентов. Наиболее часто встречаемые микрокомпоненты обнаружены в следующих максимально аномальных концентрациях: более 10 мг/дм³ – Si, K, Al, Fe; более 1 мг/дм³ – B, Mn, Sr; более 100 мкг/дм³ – Li, Zn, Rb, Ba, W; более 10 мкг/дм³ – Ni, Cu, As, Mo; более 1 мкг/дм³ – Co, Y, La, Pb, U; более 0,01 – Te, Ag, Cd, Hf, Bi.

Анализ данных проведен с использованием традиционного статистического метода путем расчета региональных средних концентраций компонентов ($X_{cp.}$) в природных водах и определения величины σ (квадратичное отклонение). При этом средние значения и другие статистики определялись отдельно для поверхностных, грунтовых и термальных вод. Аномальные концентрации компонентов в природных водах региона определялись путем сравнения полученных при анализе значений с величиной $X_{cp.} + \sigma$. За минимально аномальные значения концентраций компонентов принимались значения превышающих величину $X_{cp.} + \sigma$. За максимально аномальную принималась концентрация компонента, превышающая $X_{cp.} + 3\sigma$. Также был построен график распределения компонентов в разных типах вод (рис. 2).

Исследования компонентного состава термальных вод показали устойчивость в выборке большинства указанных выше компонентов (табл. 1). Здесь они обнаружены в аномальных концентрациях. Фоном для выявления аномалий в термальных водах приняты средние значения концентраций компонентов вод разного типа, как термальных, так поверхностных и грунтовых.

При расчетах использованы результаты анализов 162 проб, отобранных из источников, скважин, колодцев, озер, рек и ручьев. Данные, приведенные в табл. 1, показывают, что в уточненный состав

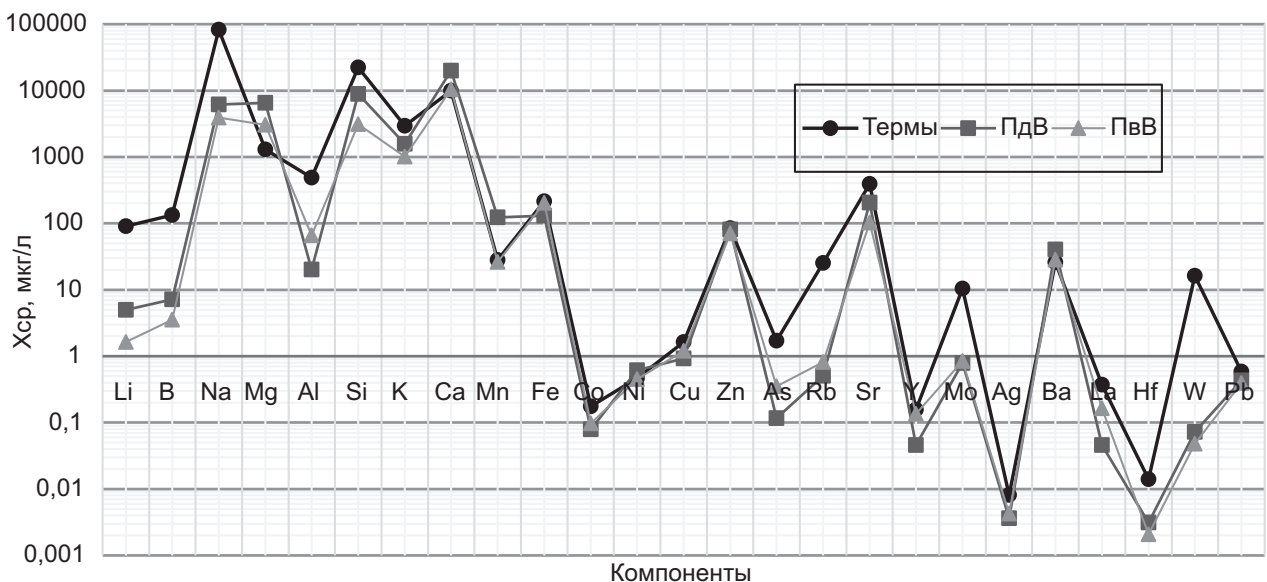


Рис. 2. Распределение концентраций компонентов химического состава природных вод

Концентрации компонентов химического состава термальных вод, в мкг/дм³

№ п/п	Объект	Li	B	Na	Si	K	Rb	Sr	Mo	La	Hf	W
1	Скв. Загза	139	2060	254 000	56 000	7430	43,1	98,7	0,8	0	0,019	29,3
2	Ист. Котельниковский	516	28,6	66 100	37 600	3380	133,0	147,0	40,0	0	0,032	102
3	Ист. Хакусы	34,9	5,3	49 500	15 700	1940	11,7	417,0	34,9	0,01	0,003	7,57
4	Ист. Горячинск	34,9	15,9	110 400	19 400	3050	16,0	540,0	5,4	0,17	0,002	16,2
5	Ист. Фролиха	33,5	4,3	29 800	10 700	1280	2,9	236,0	28,8	0,02	0,02	4,95
6	Руч. Езовка	155	29,3	37 800	9090	889	6,9	180,0	16,4	0,11	0,032	23,8
7	Ист. Давша	163	32,4	92 300	15 000	2550	35,6	493,0	8,1	0,05	0,014	22,5
8	Ист. Змеиный 1	19,6	53,1	80 100	27 300	2060	10,7	26,5	2,4	0,03	0,009	13,8
9	Ист. Змеиный 2	36,5	59,7	83 900	24 900	1810	14,3	77,3	2,0	0	0,008	13,7
10	Скв. Максимиха	75,3	20,3	79 000	9450	1820	1,5	594,0	9,2	0,53	0,023	12,1
11	Ист. Кулиные Болота 1	51,2	58,7	94 900	29 800	1710	23,3	95,9	2,5	0,17	0,031	18,5
12	Ист. Кулиные Болота 2	46,6	59,2	97 700	31 500	1900	24,6	208,0	4,0	0,19	0,012	29,1
13	Скв. Гусиха	165	37,3	140 700	31 500	9080	79,0	1460,0	21,6	0,07	0,029	29,3
14	Ист. Гусиха 1	159	35,2	132 600	26 600	7860	69,8	1200,0	18,8	0,08	0,013	22,2
15	Ист. Золотой кл. 1	140	23,8	88 900	26 100	3600	40,5	368,0	27,3	1,49	0,033	12,4
16	Ист. Золотой кл. 2	86,6	17,4	53700	20 100	2100	23,0	123,0	13,2	2,71	0,016	6,56
17	Ист. Змеиный 3	51,9	194,0	168100	50 700	4040	16,7	88,2	0,1	0,06	0,01	8,48
18	Ист. Кулиные Болота 3	168	303,0	215 100	65 300	6480	22,2	1970,0	0,6	0,05	1E-04	0,45
19	Кулиное Блюдце	55,0	109,0	120 900	43 000	6350	30,4	683,0	0,2	0,07	0,01	0,85
20	Ист. Толстихинский	95,1	99,6	118 600	29 700	3130	16,1	130,0	4,0	1,49	0,01	27,3
21	Ист. Макаров	20,7	88,1	116 800	33 400	3830	0,3	9,2	6,0	0,05	0,01	13,10
22	Ист. Умхейские	104	84,4	125 400	35 800	1640	13,8	133,0	0,2	0,00	0,01	6,16
23	Ист. Кучигерские	71,4	98,8	126 500	40 500	1970	12,8	265,0	0,5	0,73	0,01	3,74
24	Ист. Аллинские	75,9	63,7	106 900	44 400	3060	17,1	353,0	0,4	0,47	0,01	2,56
25	Ист. Питателевский	467	130,0	573 900	41 300	27 400	283,0	9960,0	37,0	0,01	0,01	25,70
Основные статистические характеристики компонентного состава природных вод разного типа												
X_{cp}		4,25	9,00	6441,9	7821,9	1490,9	1,26	171,15	0,92	0,10	0,01	0,09
n		162	162	162	162	162	162	162	162	162	162	162
σ		2,32	5,09	5394,80	4691,66	880,30	1,09	115,89	0,78	0,08	0,01	0,06
V, %		54,51	56,58	83,7	60,0	59,0	87,10	67,71	85,44	82,85	76,55	68,33
3σ		6,95	15,27	16 184,4	14 075,0	2640,9	3,28	347,68	2,35	0,25	0,03	0,18
$X_{cp} + \sigma$		6,56	14,09	11 836,7	12 513,6	2371,2	2,35	287,05	1,70	0,18	0,02	0,14
$X_{cp} + 3\sigma$		11,20	24,27	22 626,3	21 896,9	4131,8	4,54	518,83	3,26	0,35	0,04	0,26

Примечание. 1. Компоненты, выделенные жирным шрифтом и курсивом, обнаружены в аномальных концентрациях. 2. Компоненты, обнаруженные по преимуществу (в 70–90% проб) в концентрациях ниже средних значений (Be, Mg, Al, Ca, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Cd, Ag, As, Ba), в таблицу не включены.

устойчивой ассоциации компонентов термальных вод региона входят Li, B, Na, Si, K, Rb, Sr, Mo, W.

Рассмотрим соотношение концентраций компонентов в водах разного типа. Обратимся к графику (рис. 2). На графике можно видеть, что, во-первых, общая тенденция распределения концентраций компонентов в водах довольно однородна. Содержания одних и тех же компонентов в водах разного типа незначительно отличаются друг от друга. Прежде всего это характерно для поверхностных (ПвВ) и подземных (ПдВ) вод. Второй особенностью распределения компонентов в водах разного типа является значительное превышение концентрации ряда компонентов термальных вод (термы) над водами других типов. Так, концентрации Li, B, Na, Rb, Mo на один порядок выше, чем в поверхностных и грунтовых водах. Концентрация W превышена на два порядка. Третьей особенностью распределения концентраций компонентов в водах разного типа являются близкие концентрации халькофильных (Cu, Zn, Ag, Pb), сидерофильных (Fe, Mn, Co, Ni), некоторых литофильных (Ca, Mg, K, Sr, Ba) и редких (Y, La, Hf) элементов.

Возвращаясь к упомянутой выше устойчивой ассоциации компонентов (Li, B, Na, Si, K, Rb, Sr, Mo, W), отметим, что она присуща азотным термам Байкальской рифтовой зоны. Часто ее дополняют группы халькофильных и сидерофильных элементов. Такие воды выносят источники: Котельниковский, Фролихинский, Хакуссский, Давшинский, Змеиный, Гусихинский, Горячинский, Золотой Ключ. Кроме того, воды с данной ассоциацией компонентов характерны для источников на Кулином болоте, скважинам с термальной водой в селе Максимиха, курорт Сухая Загаза, оз. Бормашево, скважина в ур. Лемасово. Также в группу водопунктов, содержащих воду с отдельными представителями компонентов данной ассоциации (Si, Rb, K, Hf, W), входят опробованные оз. Духовое, Котокельское, холодные воды в скважинах в селе Гусиха, у Посольского монастыря и в шурфах у села Ранжурово, колодцы и скважины вдоль берега озера Байкал в селах Мишиха, Прибой, Кедровая, Выдрино, Танхой, Култук и др. Наличие отдельных представителей данной ассоциации компонентов в природных водах района дает возможность предположить влияние вод глубоких горизонтов на воды верхнего гидрогеологического этажа и прогнозировать миграцию к поверхности природных углеводородов на данных участках (рис. 3). Данное предположение часто подтверждается. В селе Култук воды с данной ассоциацией фиксируют региональный разлом, проходящий через Байкальскую и Тункинскую впадины.

Анализ данных по микрокомпонентному составу природных вод региона позволил выявить ряд участков с проявлениями глубинного питания этих вод (рис. 3) в районе Баргузино-Чивыркуйского перешейка (ист. Змеиный; грифоны на Кулиных болотах; озера Бормашевые, село Максимиха, в долине р. Турка (ист. Золотой Ключ), в котловине оз. Котокель, в районе сел Ранжурово, Исток, Посольское и ряда других.

К ним также относятся участки в районе села Култук, протяженная зона от села Выдрино до села Мишиха, а также вдоль правого берега р. Селенга (села Шигаево, Творогово, Колесово).

Газовый состав природных вод. Отобрано и проанализировано порядка 200 проб свободного (СГ) и водорастворенного газа (ВРГ), выделенных методом термодезгазации (рис. 4). В составе растворенного газа в основном преобладают воздушные компоненты азот (60–80 %) и кислород (10–35 %) с небольшой примесью углекислого газа (0–7 %). Такое соотношение содержаний компонент в газе довольно распространено и выдержано на территории ЦЭЗ БПТ и может являться средним (фоновым) для последующего сравнения и выявления аномалий. Соответственно, в Усть-Селенгинском районе, дельте р. Баргузин, пос. Котокель, пос. Танхой и береговой полосе на участке от ж/д ст. Паньковка до пос. Слюдянка, т. е. в зонах развития кайнозойских осадочных образований местами выявляется повышенное содержание углекислоты (10–70 %), в районах развития кристаллических пород такие аномалии не выявлены.

Метан в составе ВРГ присутствует в виде следов (0–0,5 %), лишь местами выявлены аномальные его концентрации: скважины в селах Творогово ($\text{CH}_4 \sim 10\%$), Исток ($\text{CH}_4 \sim 4\text{--}9\%$), пос. Нов. Энхэлук (31 %), Посольск ($\sim 5\text{--}27\%$), ур. Лемасово ($\sim 45\%$), ур. Загаза (15–50 %), дер. Сухая ($\sim 6\%$), Энхэлук ($\sim 8\text{--}24\%$), пос. Танхой ($\sim 4,4\%$); колодцы в селах Шигаево ($\text{CH}_4 \sim 2,6\%$), Танхой ($\sim 5\%$); акватория у причала в пос. Ключевка ($\sim 13\%$).

Как видно, даже без явных источников поступления УВ, ВРГ этих объектов содержит в себе значительное количество метана, связываемого, по-видимому, с углеводородами, генерируемыми осадочными кайнозойскими породами. Стоит отметить, что аномалии метана так же, как и углекислого газа, отсутствуют в районах с маломощным (до 50–100 м) чехлом отложений кайнозоя.

При этом наблюдается и еще более яркая картина состава ВРГ в том случае, когда в непосредственной близости или прямо в точке отбора воды происходит разгрузка свободно выделяющегося УВ газа. Так, в пробе, отобранной у газовых грифонов в зал. Малый Посольский $\text{C}_{\text{орг}}$ концентрация CH_4 составила 42_{об.} % В группе углеводородных компонент изученных проб ВРГ совершенно отсутствуют гомологи метана или же их содержание настолько мало ($\sim 0\text{--}0,1\%$), что вполне может приниматься за «следы».

Наибольший интерес и наглядность для изучения газовых флюидов озера Байкал представляют свободно выделяющиеся газы. Проявления такого типа фиксируются в толще воды либо на ее поверхности в виде характерного бурления в летнее время (в зимнее время также сопровождается образованием «пропарин» во льду), либо в толще воды, отображаясь на экране эхолота (за счет создания акустической аномалии на границах сред вода–газ). Эти газы первого

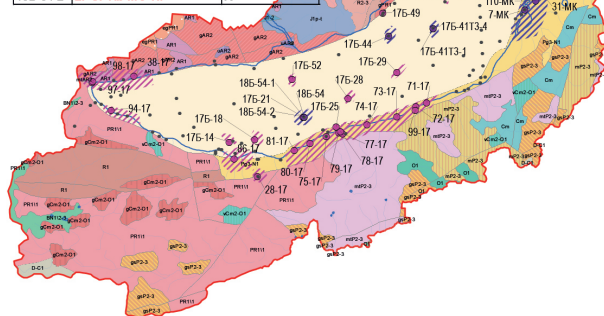
Ассоциации микрокомпонентов подземных вод берегов озера Байкал в аномальных концентрациях, в точках с возможной разгрузкой вод глубинного питания

№	Max_anom	Min_anom
23-2-16	W	Mo
4-2-16	Na B K Rb W	Li Si HF
5-2-16	Na B K Rb W	Li Si HF
6-2-16	Li Na B K Rb HF W	
74-17	B Na Rb	
79-17	Rb	B K
110-MK	B Na K Mo HF W	Si
77-17	B Na K Rb	
78-17	B K Rb	Si
31-MK	Na Mo W	
99-17	Li Na Mo W	B
Д1-15	Li Na Rb Mo W	
Д1-37	Li W	Mo
10-2-16	Li W	
32-2-16	W	Mo
26-MK	B Na Si K Rb W	
6-16-1	B Na Si Rb W	K
17-16-1	Li Rb Mo W	Si
9I-16-2	Li Na Rb Mo W	B Si K
Д1-12	Na Mo W	Rb
Д1-22	Li B Na Rb Mo W	
Д1-23	Li B Na Rb Mo W	Si K
Д1-29	Li B Na Si Rb W	Mo
Д1-30	Li B Na Si Rb W	Mo
Д1-36	Li Na Mo W	
13-2-16	Li B Na Si Rb W	Mo HF
14-2-16	Li B Na Si Rb Mo W	
21-2-16	Li B Na Si K Rb Mo W	HF
22-2-16	Li B Na Si K Mo	
33-2-16	Li Na Si Rb Mo W	B K
35-2-16	Li Na Rb Mo W	B Si
Д1-30-1I	Li B Na Si Rb W	K
K1-17	Li B Na Si K Rb W	

№	Max_anom	Min_anom
4-418	Li B Na Si K Rb	
5-418	Li B Na Si Rb W	K Mo
6-418	Li Na Si K Rb Mo W	B
МАК-418	Na	Li B Si K Mo W
14-618	Li B Na Si Rb HF W	K Mo
15-618	Li B Na Si Rb HF W	K
16-618	Li B Na Si Rb HF W	
30-618	K Rb Mo HF	Na
110-618	Li B Na Si K Mo	HF
111-618	Li Na Si K Rb Mo	
112-618	Na K Mo HF	Li B Si
114-618	K	Mo HF
115-618	Na K Rb Mo HF	Li B
122-618	Li Na K Rb	Ba HF
132-618	B Na K Mo	Rb Ba HF

Ассоциации микрокомпонентов придонных вод озера Байкал в аномальных концентрациях, в точках с возможной разгрузкой вод глубинного питания

№	Max_anom	Min_anom
156-45	Si Rb	Li
156-53		Li Si Rb
166-16		Li Rb
166-22	Li Rb	Si
166-27	W	Si Rb Mo
166-30		Li Si Rb
166-36	Rb	Li Si Mo
166-54		Si Rb
166-59		Si Rb
166-2	Na Mo HF W	B Si K
166-56	Li B Si K Rb Mo HF W	
166-63	Na HF W	B Rb
166-64	Rb Mo HF W	Li K
166-21	Li Rb	B Si
166-25		Li Rb
166-35	Li Rb	B
166-62		Li Rb
176-14	Li	Si K Rb
176-28		Li Si Rb
176-29	HF	Li Si K Rb
176-44	W	Li Na Si Mo HF
176-49	Li Si K Rb	
176-52		Li Si Rb
176-41T3	Li Na Si K Rb Mo HF W	
176-41T3	Li Si K Rb Mo HF W	B Na
186-54	Li Si K Rb	
186-76r-1	Na Si Mo HF	Rb
186-76r-2	Na K Mo	Li Si Rb
186-46	Li Si Rb HF	Na K Mo
186-54-1	Li Na K Rb	Si Mo
186-54-2	Li Si Rb Mo HF	K



Участки точечного проявления природных вод глубинного питания

- выявленные
- предполагаемые

Пункты опробования и их номера с природными водами аномального микрокомпонентного состава с гидрогеохимическими ассоциациями, характерными для вод

- глубинного питания
- близких по составу водам глубинного питания
- прочие пункты опробования

Рис. 3. Схема участков глубинного питания природных вод ЦЭЗ БПТ. Масштаб 1 : 2 000 000 (в качестве геологической основы использована геологическая карта Байкальского региона)

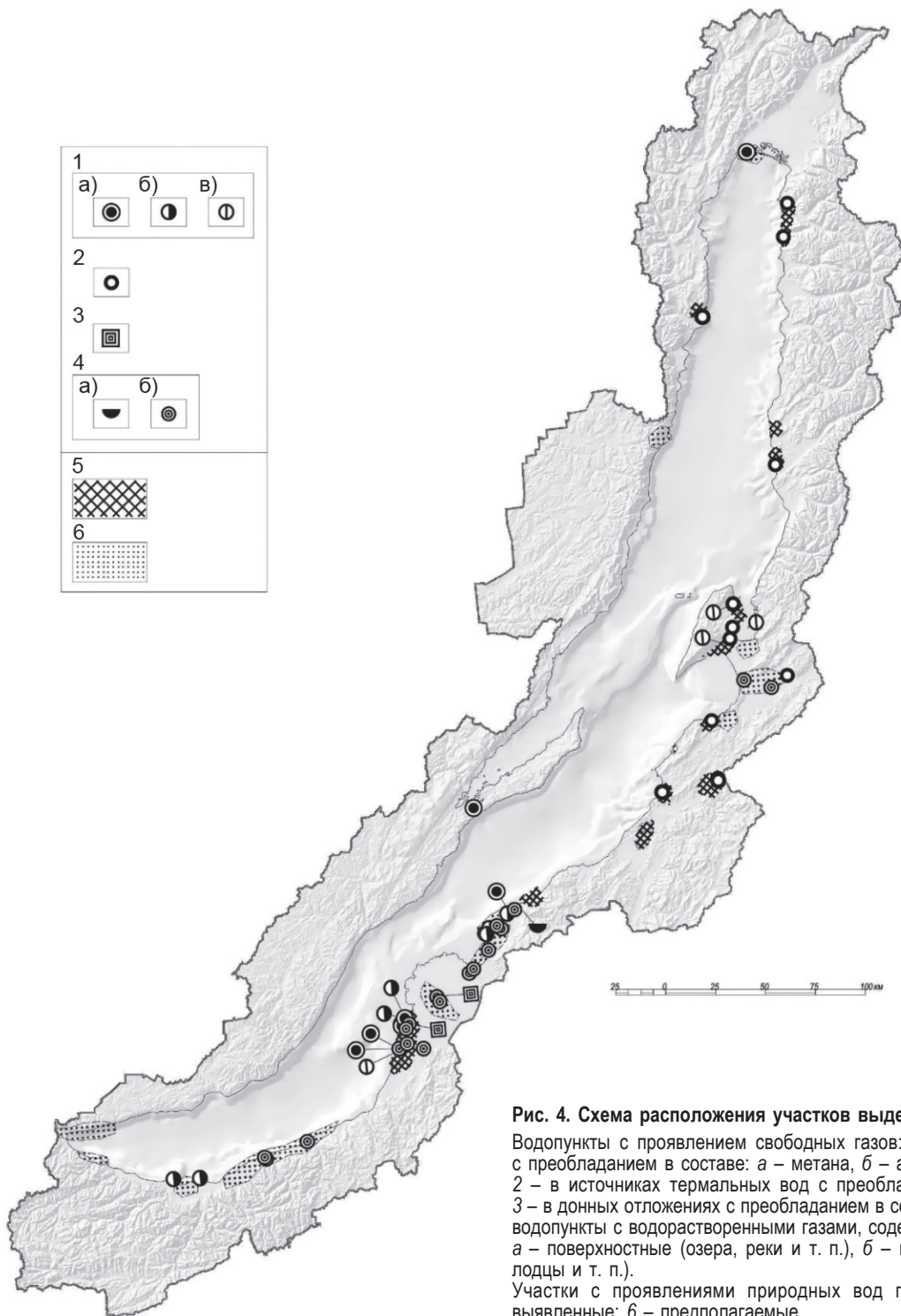


Рис. 4. Схема расположения участков выделения природных газов

Водопункты с проявлением свободных газов: 1 – в газовых грифонах с преобладанием в составе: а – метана, б – азота и метана, в – азота; 2 – в источниках термальных вод с преобладанием в составе азота; 3 – в донных отложениях с преобладанием в составе азота и метана; 4 – водопункты с водорастворенными газами, содержащими метан >0,1_{об.} %: а – поверхностные (озера, реки и т. п.), б – подземные (скважины, колодцы и т. п.).

Участки с проявлениями природных вод глубинного питания: 5 – выявленные; 6 – предполагаемые

типа можно условно разделить на три группы. I группа метановых газов характеризуется следующим составом: $\text{CH}_4 \sim 81\text{--}94,5\%$, $\text{N}_2 \sim 1,8\text{--}16\%$, $\text{O}_2 \sim 0,7\text{--}6,3\%$, CO_2 не постоянно. Во II группу преимущественно азотно-метановых попадают газы с объемным соотношением компонент $\text{CH}_4 \sim 72\%$, $\text{N}_2 \sim 16\text{--}32\%$, $\text{O}_2 \sim 7\text{--}11\%$, CO_2 не постоянно. Эти газы проявляются в акватории озера с мощным осадочным чехлом. К III группе относятся азотные газы. Они выходят в акватории Чивыркуйского залива, образуя «пропарины» во льду. Здесь мощ-

ность молодых осадочных образований мала или они практически отсутствуют.

Ко второму типу можно отнести азотные газы термальных источников (Котельниковский, Змеиный, Кулиные Болота). Это азотные газы с характерным устойчивым объемным соотношением компонент смеси $\text{CH}_4 \sim 0,1\text{--}1,2\%$, $\text{N}_2 \sim 90\text{--}98,8\%$, $\text{O}_2 \sim 0,5\text{--}4,5\%$, $\text{CO}_2 \sim 0,1\text{--}0,4\%$.

Третий тип СГ представляет собой газ, отбираемый методом «ворошения» (т. е. нарушения целостности структуры залегания) осадка

Изотопный состав природных вод

№ п/п	Тип водопункта	Местоположение	Шифр пробы	dD, ‰	dO, ‰
1	Скважина	Село Энхалук	ПН 2	-130,3	-18,4
2	Скважина, самоизл.	Село Энхалук	18-И	-130,9	-17,8
3	Скважина, 80 м	Село Энхалук	19-И	-125,9	-17,2
4	Скважина, 200 м	Село Энхалук	20-И	-139,5	-19,1
5	Скважина	Дер. Сухая	24-И	-131,3	-17,8
6	Скважина	Село Дулан	28-И	-150,4	-20,7
7	Скважина	Село Исток	ПН 4	-122,0	-16,6
8	Скважина	Село Танхой	ПН 13	-123,8	-17,3
9	Скважина, 200 м	Село Колесово	29-И	-129,8	-17,4
10	Скважина, терм.	Ур. Загза	ПН1	-132,7	-16,2
11	Скважина, терм.	Ур. Загза	26-И	-135,4	-15,7
12	Скважина, терм.	Дер. Гусиха	21_02_2016	-157,5	-21,1
13	Скважина, терм.	Кур. Горячинск	9Г-16-2	-159	-21,8
14	Источник	Дер. Тонта	ТН 6	-133,7	-18,7
15	Источник	Тажеранский	ТН 19	-99,5	-12,5
16	Источник	Заречный	21-И	-142,6	-19,9
17	Источник	Князький	Д1-2	-118,5	-16,6
18	Источник	Глазной, Фролиха	Д1-15	-157,2	-21,7
19	Источник	Берёзовый, дол. р. Турка	33-2-16	-158,7	-21,5
20	Источник Святой	Гора Слюдянка	35-17	-119,9	-16,5
21	Источник, терм.	Змеиный 2	ПН 10	-131,6	-17,7
22	Источник, терм.	Змеиный 2	ПН 10	-163,8	-22,6
22	Источник, терм.	Змеиный 3	Д1-29	-167,5	-22,9
23	Источник, терм.	Давша	Д1-23	-160,9	-21,7
24	Источник, терм.	Хакусы	17-16-1	-160,1	-21,8
25	Источник, терм.	Котельниковский	6-16-1	-157,5	-20,7
26	Источник, терм.	Гусихинский	22_2_16	-157,9	-21,4
27	Источник, терм.	Золотой Ключ	35-2-16	-150,9	-20,9
46	Источник, терм.	Оз. Кулиное Блюдце	14-618	-151,3	-19,6
47	Источник, терм.	Кулиное Болото	16-618	-163,5	-22,5
48	Источник, терм.	Кулиное Болото	14-2-16	-157,0	-20,5
49	Источник, терм.	Кулиное Болото	ПН 11	-124,0	-15,6
28	Вода газогидратов	Озеро Байкал	17Б-41Т3-1	-110,3	-13,9
29	Вода газогидратов	Озеро Байкал	17Б-41Т3-4	-112,8	-14,9
30	Вода газогидратов	Озеро Байкал	18Б-7-1	-115,5	-15,2
31	Вода газогидратов	Озеро Байкал	18Б-7-2	-113,6	-14,5
32	Вода газогидратов	Озеро Байкал	18Б-46	-111,4	-13,9
33	Вода газогидратов	Озеро Байкал	18Б-54-1	-110,2	-13,9
34	Вода газогидратов	Озеро Байкал	18Б-54-2	-112,8	-13,7
35	Озеро	Кулиное	ТО 6	-98,9	-10,8
36	Озеро	Байкал у Листвянки	42-17	-122,8	-16,2
37	Озеро	Байкал	27-И	-115,9	-15,3
38	Озеро	Лосиное	Д1-19	-98,9	-9,8

№ п/п	Тип водопункта	Местоположение	Шифр пробы	dD, ‰	dO, ‰
39	Озеро	Арангатуй	Д1-23	-160,9	-21,7
40	Озеро	Теплое	28-17	-102,6	-12,2
41	Озеро	Изумрудное	29-17	-116,0	-14,2
42	Озеро	Сказка	30-17	-97,1	-10,6
43	Озеро, сол.	Халюя-Нур	111-618	-64,2	-5,1
44	Озеро, сол.	Бормашево	ТН 22	-94,7	-10,4
45	Озеро	Кулиное Блюдце	114-618	-89,6	-9,2
50	Колодец	У платформы «Прибой»	ПН 12	-116,0	-16,7
51	Шурф	Берег Кулиного озера	ПН 6	-105,8	-13,4
52	Шурф	Мыс Облом	ПН 7	-105,6	-13,7
53	Шурф	Берег Байкала, Мурино	ПН 14	-117,7	-15,2
54	Река	Сухая у моста	24-И	-151,4	-21
55	Река	Гусиха у терм. источника	23-2-16	-154,3	-21,6
56	Река	Турка	34-2-16	-153,0	-20,9
57	Река	Слюдянка	34-17	-129,2	-18,0
58	Ручей тепл.	Фролиха	Д1-12	-156,2	-21,5
59	Ручей тепл.	Фролиха	Д1-14	-160,7	-21,9
60	Ручей тепл.	Езовка	Д1-22	-160,1	-21,9

в болотах, реках, ручьях или даже на песчаном побережье озера Байкал (Карга Лемасово, мыс Облом, оз. Кулиное). Данный тип газов условно можно разделить на две группы. Так, к I группе газов метано-азотного состава ($\text{CH}_4 \sim 40\text{--}49\%$, $\text{N}_2 \sim 48\text{--}53\%$, $\text{O}_2 \sim 0,8\text{--}4\%$, CO_2 не постоянно) относятся пробы газа, отобранные на отмели у песчаного побережья методом «ворошения» близ обнаружения газовых грифонов в заливах Сор-Черкалово и Провал. Несмотря на удаленность мест отбора, но имея в виду явную схожесть морфологии и типа проявления, составы газов оказываются довольно близки. Аналогичная ситуация наблюдается в II группе ($\text{CH}_4 \sim 12\text{--}16\%$, $\text{N}_2 \sim 65\text{--}82\%$, $\text{O}_2 \sim 0,3\text{--}0,4\%$, $\text{CO}_2 \sim 0,4\text{--}3,6\%$) преимущественно азотных газов, в которую вошли три пробы, отобранные методом «ворошения» илистых осадков в протоке близ села Шигаево и оз. Кулиное.

Таким образом, по особенностям проявления и состава установлено три типа свободно выделяющихся газов: 1 – метановые газы грифонов акватории озера Байкал, 2 – азотные газы гидротерм, 3 – метаново-азотные и азотно-метановые газы илистых донных отложений водопунктов суши и берегов озера Байкал.

Изотопный состав природных вод. За время проведения работ с 2015 до 2020 год было опробовано и проанализировано на изотопный анализ воды более 60 водопунктов (табл. 2). Пробы воды анализировались в Центре изотопных исследований ВСЕГЕИ. При изучении изотопного состава

природных вод в рассматриваемом регионе исследователи обращали особое внимание на изотопию азотных терм Прибайкалья [6; 7; 10].

Опробованные воды имеют метеогенное происхождение (рис. 5). Можно выделить пять основных групп природных вод региона.

В первую группу входят наиболее легкие по изотопному составу воды. К ней относятся как азотные термы источников и скважин (Горячинск, Котельнический, Хакусы и др.), так и поверхностные воды рек и ручьев и воды источников подземных холодных вод (реки Сухая, Турка, Гусиха и др.). Ко второй группе можно отнести сравнительно утяжеленные по изотопному составу воды термальной скважины курорта Загза и один из источников на Кулиных болотах. В эту группу также входят подземные холодные воды источников и скважин, а также вода озера Байкал. К третьей группе отнесены остаточные воды газогидратов со дна озера Байкал и воды его. Четвертая группа вод характеризуется более тяжелым изотопным составом, это воды ряда пресных озер (Теплое, Изумрудное, Сказка). Пятая группа включает наиболее тяжелые по изотопному составу воды озера с солеными водами (Бормашево, Халюя-Нур). Утяжеление изотопного состава происходит и в озере с термальными водами (оз. Кулиное Блюдце).

Сходство изотопного состава термальных и холодных поверхностных и грунтовых вод (первая группа) указывает на смешение этих вод в приповерхностных условиях. Сравнительно утяжеленный по отношению к водам первой

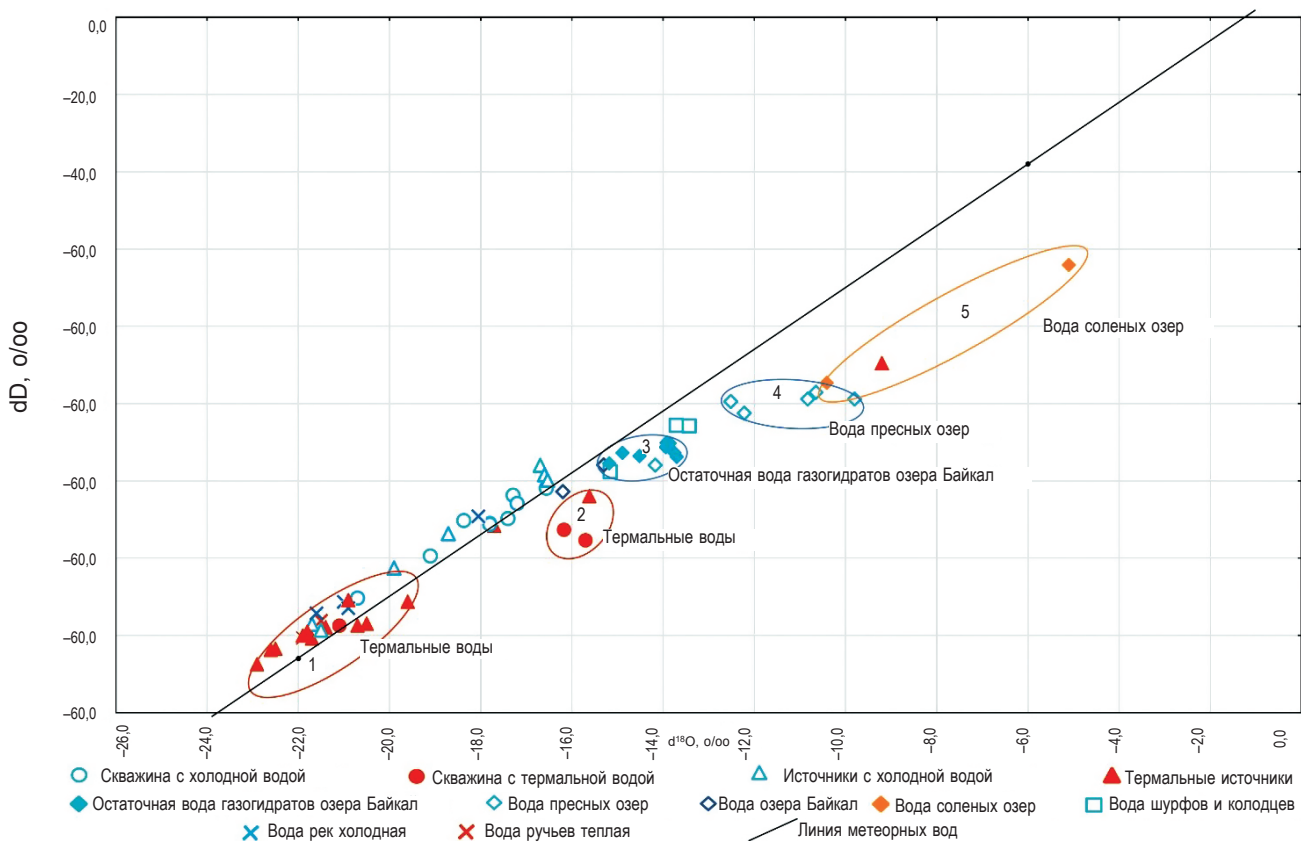


Рис. 5. Изотопный состав природных вод Байкала и его побережий

группы изотопный состав подземных холодных и термальных вод, вскрытых скважинами (вторая группа), тоже предполагает смешение пластовых подземных вод осадочного чехла с трещинно-жильными водами фундамента. Следует отметить, что в эту группу входят и воды озера Байкал, что может указывать на взаимодействие подземных вод и вод озера. Сравнительно утяжеленный изотопный состав имеют остаточные воды газогидратов (третья группа). Сходная с ними по изотопному составу вода озера Байкал указывает на то, что эта вода была основой газогидратов. В озерных водах за счет испарения происходит накопление изотопов воды, что приводит к утяжелению ее изотопного состава, это происходит и в случае питания озера термальными водами (четвертая и пятая группы).

Заключение. В результате исследований создана цифровая объемная гидрогеохимическая модель Байкальского межгорного субаквального артезианского бассейна и его обрамления. Здесь в верхнем гидрогеологическом этапе в водоносных зонах трещиноватости кристаллических пород распространены в основном азотные гидрокарбонатные магниевые, кальциево-магниевые воды, а в водоносных комплексах песчано-глинистых пород кайнозоя в долине р. Баргузин развиты сульфатно-гидрокарбонатные магниево-кальциевые, в дельте р. Селенга – сульфатно-гидрокарбонатные смешанные по катионам воды метаново-

азотного и азотно-метанового состава. В нижнем этапе показано широкое распространение здесь пресных и слабосоленых содовых подземных вод. Среди газов преобладают азот и метан.

В микрокомпонентном составе природных вод региона уточнен состав устойчивой ассоциации литофильных, редких и рассеянных элементов (Li, B, Na, Si, K, Rb, Sr, Mo, W), характерных для азотных терм Байкальской рифтовой зоны, имеющих глубинное питание. Выявление компонентов, входящих в эту ассоциацию в аномальных концентрациях в других типах вод (поверхностных, подземных холодных), позволяют прогнозировать участие в их питании глубинных вод. Второй важный вывод сводится к тому, что источник формирования химического состава природных вод региона, включая азотные термы, один для всех, а именно воды атмосферного питания и вмещающие горные породы.

Подтверждено взаимодействие на отдельных участках подземных вод и газов (в том числе углеводородных) верхнего и нижнего гидрогеологического этажей. На это обстоятельство указывают также особенности изотопного состава вод. Вероятно, термальные воды формируются в результате смешения глубинных жильных, грунтовых и поверхностных вод атмосферного питания, а нагрев вод происходит кондуктивно [4] при контакте жильных вод зон разломов с прогретыми вмещающими породами. Прогрев пород происходит за счет высокого теплового потока [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Атлас гидрогеологических и инженерно-геологических карт СССР. – М., 1983.

2. Атлас литолого-палеогеографических карт СССР. Т. IV. Палеогеновый, неогеновый и четвертичный периоды / гл. ред. А. П. Виноградов. – М. : Мингео СССР, 1967.

3. Гидрогеохимическая карта территории СССР масштаба 1 : 10 000 000 с объяснительной запиской / ред. Е. А. Басков, С. В. Егоров, И. К. Зайцев. – Л. : ВСЕГЕИ, 1981. – 92 с.

4. Голубев В. А. Павлов С. Х. Высокотемпературный неглубокозалегающий резервуар термальных вод в районе залива Провал на Байкале // Докл. РАН. – 2008. – Т. 418, № 1. – С. 101–105.

5. Зайцев И. К. Принципы и методы составления гидрогеохимической карты СССР масштаба 1 : 5 000 000. Объяснительная записка. – М. : Госгеолтехиздат, 1958. – 92 с.

6. Замана Л. В. О происхождении сульфатного состава азотных терм Байкальской рифтовой зоны // Докл. РАН. – 2000. – Т. 372, № 3. – С. 361–363.

7. Ломоносов И. С. Геохимия и формирование современных гидротерм Байкальской рифтовой зоны. – Новосибирск : Наука, 1974. – 168 с.

8. Мизандровцев И. Б. К геохимии грунтовых растворов // Динамика Байкальской впадины. – Новосибирск : Наука, 1975. – С. 203–230.

9. Особенности химического состава поровых вод донных отложений различных районов озера Байкал / Т. В. Погодаева, Т. И. Земская, Л. П. Голобокова, О. М. Хлыстов и др. // Геология и геофизика. – 2007. – Т. 48, № 11. – С. 1144–1160.

10. Писарский Б. И. Закономерности формирования подземного стока бассейна озера Байкал. – Новосибирск : Наука, 1987. – 157 с.

11. Погодаева Т. В. Поровые воды донных отложений оз. Байкал в районах накопления и разгрузки углеводородов // Автореф. дисс. канд. геол.-минерал. наук. – Владивосток, 2008. – 21 с.

T. IV. Paleogene, Neogene and Quaternary periods. Ch. ed. A. P. Vinogradov. Moscow, Mingeo USSR, 1967.

3. Gidrogeokhimicheskaya karta territorii SSSR mash-taba 1 : 10 000 000 s ob'yasnitel'noy zapiskoy [Hydro-geochemical map of the territory of the USSR scale 1 : 10,000,000 with an explanatory note]. Eds. E. A. Baskov, S. V. Egorov, I. K. Zaitsev. Leningrad, VSEGEI, 1981.

4. Golubev V. A. Pavlov S. K. Vysokotemperaturnyy ne-glubokozalegayushchiy rezervuar termal'nykh vod v rayone zaliva Proval na Baykale [High-temperature shallow reservoir of thermal waters in the area of the Proval Bay on Lake Baikal]. *Doklady Rossiyskoy Akademii nauk*, 2008, vol. 418, no. 1, pp. 101–105.

5. Zaitsev I. K. Printsipy i metody sostavleniya gidro-geokhimicheskoy karty SSSR masshtaba 1 : 5 000 000. Ob'yasnitel'naya zapiska [Principles and methods of compiling a hydrogeochemical map of the USSR at a scale of 1 : 5,000,000. Explanatory note]. Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1958, 92 p.

6. Zamana L. V. O proiskhozhdenii sul'fatnogo sostava azotnykh term Baykal'skoy riftingovoy zony [On the origin of the sulfate composition of nitrogen waters in the Baikal rift zone]. *Doklady Rossiyskoy Akademii nauk*, 2000, vol. 372, no. 3, pp. 361–363.

7. Lomonosov I. S. Geokhimiya i formirovanie sovremennykh gidroterm Baykal'skoy riftingovoy zony [Geochemistry and formation of modern hydrotherms of the Baikal rift zone]. Novosibirsk, The Science, 1974, 168 p.

8. Mizandrovtssev I. B. K geokhimii gruntovykh rastvorov [On the geochemistry of soil solutions]. *Dynamics of the Baikal depression. Novosibirsk, The Science*, 1975, pp. 203–230.

9. Pogodaeva T. V., Zemskaya T. I., Golobokova L. P. et al. Osobennosti khimicheskogo sostava porovykh vod donnykh otlozheniy razlichnykh rayonov ozera Baykal [Peculiarities of the chemical composition of the pore waters of bottom sediments in various regions of Lake Baikal]. *Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 11, pp. 1144–1160.

10. Pisarsky B. I. Zakonomernosti formirovaniya podzemnogo stoka basseyna ozera Baykal [Patterns of underground runoff formation in the Baikal basin]. Novosibirsk, The Science, 1987, 157 p.

11. Pogodaeva T. V. Porovye vody donnykh otlozheniy oz. Baykal v rayonakh nakopleniya i razgruzki uglevodorodov [Pore waters of bottom sediments of the lake. Baikal in areas of accumulation and discharge of hydrocarbons]. *Abstract of diss. for an apprenticeship step. cand. geol.-mineral. sciences. Vladivostok*, 2008, 21 p.

REFERENCES

1. Atlas gidrogeologicheskikh i inzhenerno-geologicheskikh kart SSSR [Atlas of hydrogeological and engineering-geological maps of the USSR]. Moscow, 1983.

2. Atlas litologo-paleogeograficheskikh kart SSSR [Atlas of Lithological and Paleogeographic Maps of the USSR].

Petrov Vladimir Viktorovich – канд. геол.-минерал. наук, зав. сектором¹. <pvvaqua@mail.ru>

Yakovlev Dmitriy Valerievich – вед. инженер². <dmitriyakovlev@mail.ru>

Petrov Vladimir Viktorovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Head of Departmen¹. <pvvaqua@mail.ru>

Yakovlev Dmitriy Valerievich – Leading Engineer². <dmitriyakovlev@mail.ru>

¹ Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского. Средний пр., 74, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute. 74 Sredny Prospect, St. Petersburg, Russia, 199106.

² Санкт-Петербургский государственный университет. Университетская наб., 7–9, Санкт-Петербург, Россия, 199034.

St. Petersburg State University. 7–9 Universitetskaya nab., St. Petersburg, Russia, 199034.