

УДК [556.314+556.555.4]:552.578.2.061.33(282.256.341)
DOI: 10.52349/0869-7892_2023_95_54-70

В. А. Шахвердов, М. В. Шахвердова (*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А. П. Карпинского*)

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ ПРИДОННОЙ ЗОНЫ ОЗЕРА БАЙКАЛ В СВЯЗИ С ПРОЦЕССАМИ ПРИРОДНОЙ МИГРАЦИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

В статье рассмотрены особенности гидрогеохимического состава придонных вод и температурного режима в придонной зоне оз. Байкал. Предложен расчетный коэффициент или температурный градиент, который позволяет проводить анализ температурного режима независимо от глубины отбора придонной воды и грунта. Установлено, что объекты природной миграции углеводородов и придонные гидрогеохимические аномалии сопровождаются аномальными значениями температурного градиента. Полученные результаты позволяют предполагать, что разрушение газовых гидратов с активным выделением метана происходит в результате локального прогрева дна. Эти процессы сопровождаются активной мобилизацией вещества и вовлечением его в миграцию. Северная котловина озера характеризуется температурным режимом, отличным от остальной части озера, что может указывать на отсутствие в этой части озера придонных проявлений газовых кристаллогидратов.

Ключевые слова: оз. Байкал, газовые гидраты, углеводороды, геохимия, температурные измерения.

V. A. Shakhverdov, M. V. Shakhverdova (*A. P. Karpinsky Russian Geological Research Institute*)

HYDROGEOCHEMICAL FEATURES AND TEMPERATURE REGIME OF THE LAKE BAIKAL BOTTOM ZONE CAUSED BY NATURAL HYDROCARBON MIGRATION PROCESSES

The paper describes features of hydrogeochemical composition of bottom waters and temperature regime in the bed zone of Lake Baikal. Estimated coefficient or temperature gradient is proposed, which allows the analysis of the temperature regime, regardless of the depth of sampling of bottom water and soil. It is identified that objects of natural hydrocarbon migration and near-bottom hydrogeochemical anomalies are accompanied by anomalous values of the temperature gradient. The obtained results suggest that the destruction of gas hydrate with active release of methane occurs because of local bottom heating. The processes are accompanied by active substance mobilization and its involvement in migration. The temperature regime in the northern basin of the lake differs from the rest of the lake that may indicate the absence of near-bottom occurrences of gaseous crystalline hydrate in this part of the lake.

Keywords: Lake Baikal, gas hydrate, hydrocarbons, geochemistry, temperature measurements.

Для цитирования: Шахвердов В. А., Шахвердова М. В. Гидрогеохимические особенности и температурный режим придонной зоны озера Байкал в связи с процессами природной миграции углеводородов // Региональная геология и металлогения. – 2023. – № 95. – С. 54–70. DOI: 10.52349/0869-7892_2023_95_54-70

Введение. Озеро Байкал – уникальный природный объект. Оно приурочено к крупной нефтегазоносной структуре, о чем свидетельствуют многочисленные нефтидопроявления. По нашим наблюдениям, углеводородные (УВ) системы представлены горючим газом, нефтью, газовыми кристаллогидратами, растворенными в воде углеводородными газами, углеводородными газами донных осадков.

Важнейшим аспектом в оценке экологического благополучия озера является изучение гидрогео-

химических и температурных показателей водной толщи. Концентрация микрокомпонентов в природных водах во многих случаях объективно отражает степень загрязнения окружающей среды и опасность такого загрязнения для объектов биосферы. Изучением водной толщи озера многие годы занимаются специалисты СО РАН, Росгидромета и других организаций [8]. В результате этих исследований получены данные о базовых (фоновых) уровнях концентрации химических элементов в воде оз. Байкал и в поверхностных водах его

береговой зоны. Там же приводятся данные мониторинга гидрогеохимических характеристик различных районов акватории озера. Наиболее полные обобщенные данные об элементном составе природных вод оз. Байкал приведены в монографии «Геохимия окружающей среды Прибайкалья» под редакцией академика М. И. Кузьмина [3] и в статье «Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал» [1]. При этом следует отметить, что воды озера характеризуются постоянным и устойчивым содержанием главных ионов [4].

Исследования температурного режима на оз. Байкал преимущественно связаны с изучением распределения температуры в пределах водной толщи от поверхности до дна [18]. Во многом они определялись изучением реакции температур вод озера на процессы глобального потепления. Эти исследования позволили получить температурные характеристики отдельных слоев водной толщи на разных глубинах и показали, что климатические и метеорологические факторы существенно не влияют на температурный режим вод в глубинной зоне озера в отличие от его приповерхностной зоны. По мнению исследователей [2; 12], на температуру придонных (или глубинных) вод влияние оказывают холодные интрузии в периоды развития глубинной конвекции. Механизм их образования достаточно детально рассмотрен в указанных работах и других публикациях. При этом авторы отмечают, что влияние холодных интрузий на температурный режим придонного слоя намного превышает влияние геотермического потока от дна. Однако выявленные в разное время очаги субаквальной разгрузки термальных вод и связанные с ними особенности геотермального поля представляют несомненный интерес. Наиболее подробное освещение эти исследования получили в публикациях В. А. Голубева [5–7], который в своих работах применял внедряемые в дно неавтономные кабельные зонды. Как показали проведенные им исследования, выявленные аномалии теплового потока носят локальный характер, значения величины теплового потока быстро снижаются к периферии аномалий, и они обусловлены субаквальной разгрузкой термальных вод [7]. В то же время вопрос влияния температурного режима оз. Байкал и процессов глубоководной разгрузки термальных вод на процессы природной миграции углеводородов изучен недостаточно, также как должного внимания не уделяется и гидрогеохимическим исследованиям придонных вод. В связи с этим подобные исследования представляют значительный интерес.

Как показали наши работы [15; 16], процессы миграции углеводородов сопровождаются активной мобилизацией вещества, что, в свою очередь, может сказываться на особенностях состава водной толщи озера, особенно в ее придонной области. Однако данные о гидрогеохимических особенностях придонных вод и, в частности, распределение в них химических элементов в зависимости от явлений и процессов, связанных с природной миграцией УВ, практически отсутствуют.

В то же время вопрос изучения этих геологических процессов и прогноз их влияния на экосистему озера является важнейшей как научной, так и практической задачей. Особенно в связи с проблемой изучения газовых гидратов. Об этом также свидетельствуют исследования поровых вод, которые провели специалисты Лимнологического института СО РАН и Японии [9; 11]. Ими было показано, что концентрация главных ионов в поровых водах возрастает в районах приповерхностных проявлений газовых гидратов и тектонических нарушений по сравнению с районами со спокойным режимом осадконакопления.

Фактический материал. Начиная с 2015 г. на оз. Байкал при проведении тематических работ ФГБУ «ВСЕГЕИ» выполнялись исследования с целью изучения особенностей температурного поля на границе раздела «дно–вода», а также гидрогеохимических характеристик придонной воды. Для отбора проб придонной воды и донного грунта применялись коробчатый пробоотборник бокс-корер и бентосная герметичная трубка. Батометр использовался в тех случаях, когда применение трубки было невозможно. Измерения температуры производились в системах отбора сразу при их подъеме на борт судна. Применялись портативные анализаторы: Hanna Instruments 98121 – для измерения температуры придонной воды и Testo 206 pH2 с проникающим зондом – для грунта. За время проведения исследований выполнено более 650 замеров температуры (330 – грунта, 330 – придонной воды). При этом парные измерения температуры проведены в 243 точках. Фактический материал по микрокомпонентному составу придонных вод получен в ходе шести полевых сезонов 2015–2020 гг. Всего по акватории озера, включая его мелководную часть, было проанализировано 297 проб. По существу, ФГБУ «ВСЕГЕИ» впервые было проведено картирование микрокомпонентного состава придонных вод озера как в пределах большей части акватории озера, так и в районах объектов миграции УВ, и составлена схема размещения гидрогеохимических аномалий в придонных водах. В то же время сразу следует отметить, что плотность и равномерность полученных нами аналитических данных пока недостаточна для полноценной характеристики гидрогеохимических особенностей придонных вод озера в целом. В настоящее время в среднем она составляет около 1 пробы на 106 км². Определение микрокомпонентного состава в пробах придонной воды проводилось в Центральной лаборатории ФГБУ «ВСЕГЕИ» методом ICP-MS. В перечень определяемых элементов входили: Si, Al, K, Na, Ba, Ca, Mg, Sr, Fe, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Pb, Mo, Be, Ag, As, Cd, Rb, Li, B, Y, Te, La, Hf, W, U, Hg.

Методика и результаты гидрогеохимических исследований придонных вод оз. Байкал. Для составления схемы размещения геохимических аномалий в придонных водах использовалась

хорошо зарекомендовавшая себя ранее методика, предусматривающая расчет таких гидрогеохимических характеристик придонной воды, как региональный фон и суммарный коэффициент концентрации химических элементов [10; 13; 14].

Региональный фон (Сф). Для его определения использовалось среднее гармоническое содержание химического элемента, рассчитанное по результатам анализа всех проб придонной воды. Природа его расчета такова, что позволяет существенно снизить роль аномальных значений в ряде данных, поэтому значение среднего гармонического содержания, по нашему мнению, может быть более объективно для определения регионального фона по сравнению с другими статистическими оценками. Как показали ранее проведенные исследования [10; 15], применение среднего гармонического для определения фоновых характеристик геохимического поля эффективно при решении задач районирования и выделения аномальных зон. Значения регионального фона и других основных описательных статистик по содержаниям химических элементов в придонных водах приведены в табл. 1.

Суммарный коэффициент концентрации (Σ КК) определялся как сумма частных коэффициентов концентрации химических элементов в точке наблюдения (станции) относительно фона в единицах стандартного отклонения содержания соответствующего элемента от среднего (S) с коэффициентом концентрации более 1 S .

Гидрогеохимическая схема или схема размещения гидрогеохимических аномалий построена с использованием инструментов Spatial Analyst ArcGIS и представляет собой карту изолиний равных значений суммарного коэффициента концентраций химических элементов в единицах стандартного отклонения от фона (рис. 1). При этом в состав аномалии включались химические элементы, концентрация которых превышает фон более чем на 3 S . Аномалии вынесены на схему, а перечень элементов, входящих в состав ассоциаций, дается в виде табл. 2.

Анализ распределения суммарного коэффициента концентрации химических элементов в придонных водах позволил определить позицию основных, наиболее контрастных и сложных по составу химических элементов гидрогеохимических аномалий в разных районах акватории оз. Байкал. Рассмотрим наиболее важные из них.

Прежде всего это аномалии в районе пос. Танхой, приуроченные к проявлению газовых кристаллогидратов Кедр (станции 18Б-54, 17Б-21). Суммарный коэффициент концентрации химических элементов достигает здесь 117 и 39 единиц. В спектр составляющих ее элементов входят Li, Be, Mg, Al, Si, Fe, Co, Ni, Cu, Rb, Y, Ba, La, Pb, U. По составу химических элементов с ней схожа аномалия в районе нефти и гидратопроявления Горевой Утес с суммарным коэффициентом концентрации (16Б-35 – 120 единиц, 16Б-36 – 59 единиц), а также широким спектром химических элементов (Be, Mg, Al, Mn, Fe, Co, Ni, As, Sr, Y, Te, Ba, La, Pb, U).

В расположенных по соседству точках отбора придонных вод отмечены концентрации Ag и As, превышающие фон более чем в 3 S . Контрастной гидрогеохимической аномалией сопровождается гидратопроявление Голоустное. Максимальный суммарный коэффициент этой аномалии составляет 83 единицы (17Б-49). При этом также схож с рассмотренными выше аномалиями и комплекс химических элементов (Li, Be, Mg, Al, Si, Fe, Co, Ni, Rb, Y, La, Pb). Аномальные концентрации Ni, Cu, Mo и As отмечены на станциях с повышенным суммарным коэффициентом концентрации (около 10, 12, 19 единиц), пространственно сопряженных с основной аномалией.

В районе мыса Туркинский и губы Таланка, где расположены проявления газовых гидратов Турка, Таланка и др. [19], выявлен ряд аномалий меньшей интенсивности с ограниченным количеством химических элементов в их составе. Здесь суммарный коэффициент концентрации химических элементов достигает 57 единиц (16Б-21 – Be, Al, Mn, As, Te, Pb), 50 единиц (16Б-22 – Be, Al, Fe, As, Rb, Y, La, Pb) и 32 единицы (16Б-62 – As).

К западу от Посольской банки находится интенсивная аномалия (15Б-45, около 52 единиц) с ограниченным спектром химических элементов (Be, Al, Mn, Ni, Y, Ba, La, U). Хотя она несколько отличается составом входящих в нее химических элементов от аномалий, сопровождающих проявления гидратов. Не следует исключать связь данной аномалии с расположенными вблизи проявлениями газовых гидратов, выявленными в районе Посольской банки в 2016 г. [19]. В то же время наличие в составе аномалии таких элементов как Al, Si, Mn и Fe в концентрациях более 2 S может указывать на возможность ее формирования за счет выноса химических элементов в коллоидной форме со стоком р. Селенга.

Выделяется группа гидрогеохимических аномалий с суммарным коэффициентом концентрации до 30 единиц, расположенная к северу от зал. Посольский Сор. Здесь, кроме Pb и Hf, концентрация которых превышает фон на 3 S , встречаются Be, La и Y в концентрациях, превышающих фон на 2 S . Эти аномалии были выявлены в первые годы работ. Необходимо отметить, что в 2018 г. сотрудниками ЛИН СО РАН в этой части акватории обнаружено приповерхностное проявление газовых кристаллогидратов Посольский Каньон [19].

Интерес представляет район акватории вблизи Нового Энхэлука, где встречены выходы метана и нефти (нефтепроявления Толстое, Зеленовское, Столовое), а по данным ДЗЗ проявлена серия пропарин. Здесь отмечены концентрации бора, превышающие фон на 3 S . Максимальный суммарный коэффициент концентрации химических элементов составляет 26 единиц (16Б-10), и, кроме бора, в повышенных концентрациях отмечены Mg, As, Be, Mo и Pb.

Гидрогеохимическая аномалия меди в районе пос. Максимиха характеризуется значением суммарного коэффициента концентрации в 20,4 единицы (16Б-43). Однако на нее необходимо обратить

Таблица 1

Основные описательные статистики микрокомпонентного состава придонных вод оз. Байкал
(2015–2020 гг.)

Элементы	Основные описательные статистики										
	Число наблюдений	Процент годовых наблюдений	Среднее арифметическое, мкг/м ³	Среднее геометрическое, мкг/м ³	Среднее гармоническое (фон), мкг/м ³	Медиана, мкг/м ³	Мода, мкг/м ³	Минимальное значение, мкг/м ³	Максимальное значение, мкг/м ³	Стандартное отклонение, мкг/м ³	Коэффициент вариаций, %
Li	297	100	3,51	2,79	2,39	2,84	1,00	1,00	78,30	5,1	146,0
Be	297	100	0,06	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	1,25	0,12	200,0
B	297	100	5,4	4,1	3,5	4,6	3,1	1	171	10,9	200,5
Na	297	100	4735	4042	3859	3820	ПМ	1020	171 800	9861	208,2
Mg	297	100	3976	3821	3598	3930	3260	416	10 800	1133	28,5
Al	297	100	842	154	25	172	5	2,1	14 400	1735	206,2
Si	297	100	2369	1340	301	1450	1050	5	55 100	4002	168,9
K	297	100	1477	1263	1190	1200	ПМ	382	25 000	1987	134,5
Ca	297	100	14 638	14 163	13 441	14 600	14 200	2080	34 000	3407	23,3
Mn	297	100	334,8	31,6	2,0	47,9	0,3	0,1	9420	825	246,5
Fe	297	100	1651	339	40	414	ПМ	1	37 100	3253	197,1
Co	297	100	0,86	0,26	0,04	0,41	0,0025	0,00	20,70	1,8	205,2
Ni	297	100	2,17	0,93	0,49	0,86	0,15	0,06	33,30	3,7	172,3
Cu	297	100	4,11	1,51	0,20	1,60	ПМ	0,01	193,00	12,8	309,9
Zn	297	100	8,56	4,53	2,37	4,54	4,96	0,13	109,00	13,7	160,1
As	297	100	1,17	0,80	0,54	0,73	ПМ	0,03	10,10	1,3	107,4
Rb	297	100	1,93	1,25	0,98	0,93	0,70	0,14	36,50	3,3	169,9
Sr	297	100	129	126	121	127	114	34	280	27	21,0
Y	297	100	0,80	0,17	0,03	0,25	0,001	0,01	14,40	1,6	200,0
Mo	297	100	0,96	0,83	0,61	0,95	ПМ	0,04	2,66	0,4	43,2
Ag	297	100	0,068	0,005	0,002	0,005	ПМ	0,000	7,210	0,6	840,7
Cd	297	100	0,10	0,02	0,01	0,02	0,02	0,00	10,20	0,6	642,6
Te	297	100	0,007	0,004	0,004	0,003	0,0025	0,003	0,091	0,01	136,5
Ba	297	100	26,3	20,1	16,7	15,8	11,9	4,7	285,0	26,7	101,5
La	297	100	1,41	0,29	0,04	0,41	ПМ	0,0016	24,20	2,7	192,7
Hf	297	100	0,003	0,002	0,001	0,002	0,0005	0,0005	0,046	0,004	157,5
W	297	100	0,122	0,021	0,014	0,024	0,005	0,005	27,800	1,6	1320,0
Pb	297	100	1,02	0,47	0,10	0,59	0,005	0,005	8,97	1,3	131,4
U	297	100	1,17	0,85	0,60	0,75	0,50	0,02	16,3	1,4	120,6

Примечание. ПМ – распределение полимодальное.

внимание в связи с тем, что придонные воды в этой точке характеризуются повышенной концентрацией таких химических элементов как Ni (КК – 2,6) и Mo (КК – 1,7), относящихся к химическим элементам II группы токсичности. Кроме того, в районе пос. Максимиха в 2016 г. в придонных водах нами была установлена повышенная массовая концен-

трация нефтепродуктов, превышающая ПДК для вод водоемов рыбохозяйственного использования (16Б-45 – 0,071 мг/дм³). Эти особенности могут указывать на возможно антропогенную природу данной аномалии.

Еще одним химическим элементом, связанным с антропогенными процессами, может быть Cd,

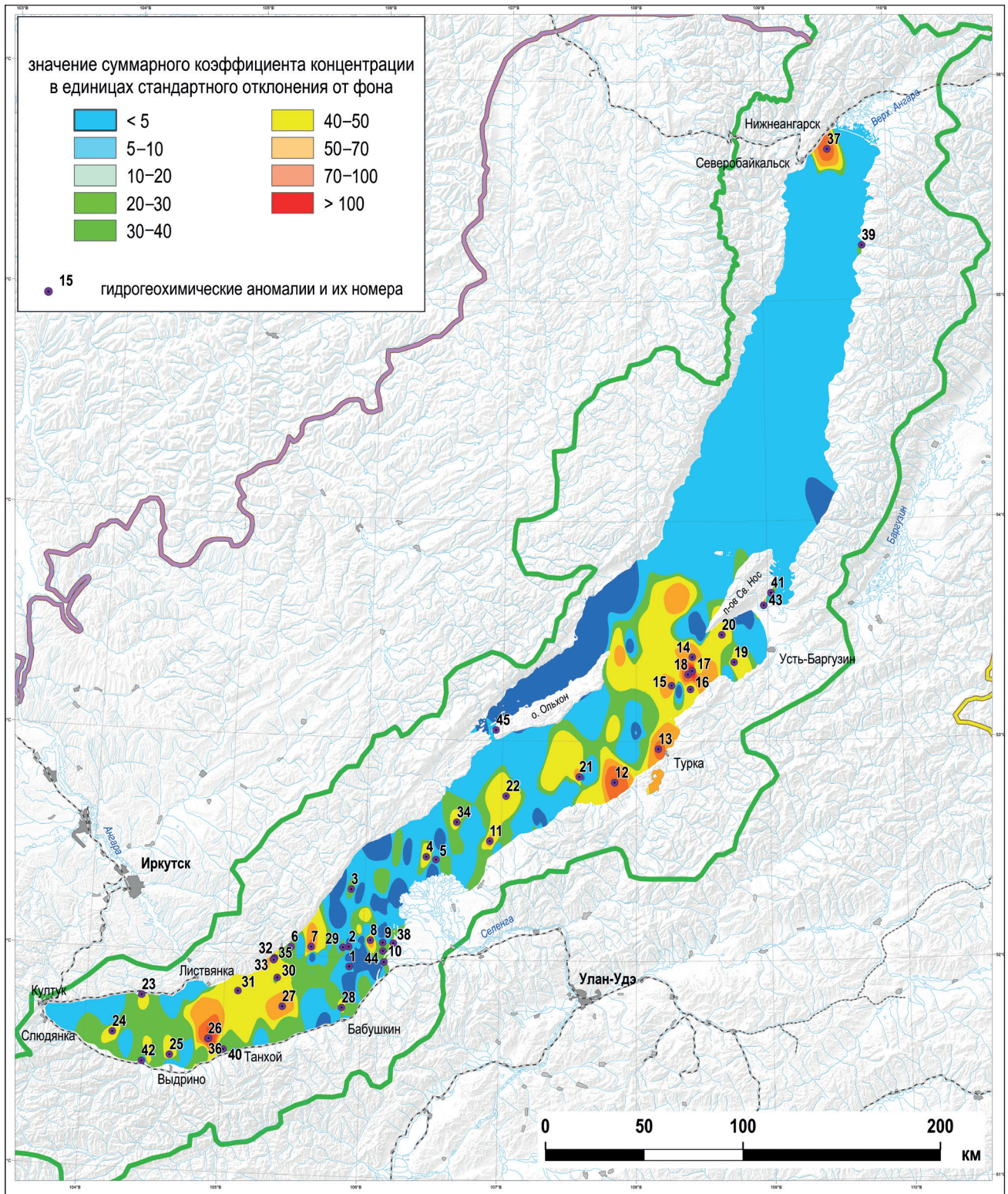


Рис. 1. Схема размещения гидрогеохимических аномалий в придонных водах

аномалии которого, превышающие $3S$, встречаются в придонных водах в районе переправы «МРС – остров Ольхон», а также вблизи устья р. Бол. Шумиха.

В ходе работ в 2019 г. в районе акватории к северу от г. Северобайкальск была получена гидрогеохимическая аномалия сложного химиче-

ского состава (Fe, Co, Ni, As, Y, La, Pb) с суммарным коэффициентом концентрации более 50 единиц (19Б-28). Возможно, что появление повышенных содержаний ряда элементов в придонных водах Северной котловины Байкала может быть связано с их выносом водами Верх. Ангары, на водосборной площади которой расположен

Таблица 2

Значение суммарного коэффициента концентрации и состав гидрогеохимических аномалий

Номер аномалии	Номер станции	ΣКК	Состав гидрогеохимической аномалии
1	15Б-7	4,2	Te
2	15Б-9	7,2	Hf
3	15Б-12	5,7	Ag
4	15Б-18	16,5	Ag
5	15Б-19	3,2	Hf
6	15Б-43	7,4	Hf
7	15Б-45	51,8	Be, Al, Mn, Ni, Y, Ba, La, U
8	15Б-53	30,5	La, Pb
9	15Б-56	6,0	Pb
10	15Б-62	7,9	Hf
11	16Б-10	26,5	B
12	16Б-21	57,2	Be, Al, Mn, As, Te, Pb
13	16Б-22	50,3	Be, Al, Fe, As, Rb, Y, La, Pb
14	16Б-25	34,7	Te
15	16Б-27	30,3	As
16	16Б-28	16,6	Ag
17	16Б-35	120,2	Be, Mg, Al, Mn, Fe, Co, Ni, Sr, Y, Te, Ba, La, Pb, U
18	16Б-36	59,0	Be, Al, Ni, As, Y, Mo, Ba, La, Pb, U
19	16Б-43	20,4	Cu
20	16Б-47	20,7	As
21	16Б-62	32,1	As
22	16Б-66	24,4	Mn, Ba
23	17Б-3	13,1	Cd
24	17Б-10	14,5	K
25	17Б-18	14,3	As
26	17Б-21	39,4	Mg, Al, Fe, Co
27	17Б-29	43,8	Mn, Te, Hf
28	17Б-32	14,8	As
29	17Б-42	9,0	Ni
30	17Б-44	18,3	Cu, Mo
31	17Б-46	10,2	Ni
32	17Б-48	11,8	Ni
33	17Б-49	83,3	Li, Be, Mg, Al, Si, Fe, Co, Ni, Rb, Y, La, Pb
34	18Б-43	10,4	As
35	18Б-50	10,4	As
36	18Б-54	117,1	Li, Be, Mg, Al, Si, Fe, Co, Ni, Cu, Rb, Y, Ba, La, Pb, U
37	19Б-28	53,1	Fe, Co, Ni, As, Y, La, Pb
38	32-МК	23,0	Mg, Ca, Sr
39	Д1-17	5,6	Mo
40	27-17	11,1	Ca, Sr
41	7-418	14,4	K
42	8-418	6,5	K
43	15-618	107,1	Li, B, Na, Si, Rb, Mo, Hf, W
44	32-618	18,3	Cd
45	133-618	4,8	Cd

ряд полиметаллических рудных объектов. Однако геохимические данные, полученные только по одной станции, нельзя считать достаточно достоверными.

Целью гидрогеохимических исследований придонных вод являлось не только определение их фоновых гидрогеохимических характеристик, выделение аномальных зон и состава, входящих в аномалии химических элементов. Еще одной важнейшей задачей, требующей решения, является выявление генетических связей между химическими элементами и определение влияния природных геологических объектов, явлений и процессов, в том числе связанных с миграцией углеводородов, на поступление химических элементов в придонные воды. В этом смысле интересные данные были получены при анализе ассоциаций химических элементов и корреляционных связей между ними. Обработка аналитических данных выполнена с помощью разработанного в ФГБУ «ВСЕГЕИ» в 1970-х годах и успешно применявшегося нами пакета программ для обработки геологических данных (ПГД). Алгоритм решения сформулированных задач неоднократно рассматривался ранее [10; 13; 14]. Применялась программа анализа главных компонент, которая позволила выявить основные корреляционные зависимости между концентрациями химических элементов в придонных водах, сократить размерность признакового пространства и построить такие вторичные признаки (факторы), меньшее число которых описывает большую часть изменчивости исходных признаков. В качестве исходных признаков использовались значения концентрации химических элементов в придонных водах.

Анализ полученной матрицы моментов показывает, что большая группа химических элементов в придонных водах корреляционно связана между собой с высоким уровнем достоверности (коэффициентом корреляции более 0,75). Ядро одной из групп составляют такие элементы как Fe, Co, Ni, Be, Al, Si, Rb, Y. В другую группу входят химические элементы, корреляционно связанные с Ba – La, U, Mn. В эту же группу входит и ряд элементов из первой группы, что может указывать на участие одних и тех же элементов в разных природных процессах. В то же время такие микроэлементы как B, Cu, Zn, As, Mo, Ag, Cd, Hf и W не взаимодействуют с высоким уровнем достоверности ни с одним из других элементов. Следует обратить внимание и на ряд макроэлементов, которые также корреляционно не связаны ни с одной из групп микроэлементов – Na, K и Ca. Это, возможно, указывает на то, что данные элементы являются фоном или природной «геохимической матрицей» придонных вод. В меньшей степени это относится к Mg и Sr.

Число вторичных признаков (факторов) для дальнейшего анализа рекомендуется ограничивать таким образом, чтобы их сумма описывала не менее 85% изменчивости исходного признакового пространства. Однако в нашем случае из-за значительного количества факторов (f) с низким

Таблица 3

Моменты компонент (число компонент – 6)

	f1	f2	f3	f4	f5	f6
D	13,44	2,29	1,54	1,44	1,29	1,11
D (%)	46,34	7,88	5,31	4,97	4,43	3,81
DS (%)	46,34	54,22	59,53	64,50	68,93	72,74

весом было определено шесть основных, сумма которых составила 72,74% (табл. 3). Такое большое количество факторов, близких по весу, может указывать на многообразие природных процессов, влияющих на характер распределения химических элементов придонных вод, для всей акватории озера в целом.

Анализ факторных нагрузок позволяет выделить, хотя и весьма условно, четыре основные ассоциации химических элементов (рис. 2, табл. 4). В первую входят химические элементы с факторной нагрузкой по f1 менее -0,80. Во вторую – элементы с факторной нагрузкой по f2 менее -0,54. В третью – элементы с факторной нагрузкой по f3 более 0,45. А в четвертую – с факторной нагрузкой по f4 более 0,50.

Наибольшим влиянием характеризуется первый фактор (f1). Его вес составляет 46,34%. С изменением первого фактора отрицательно связаны концентрации большой группы химических элементов: Al [-0,98], Y [-0,97], Be [-0,96], Fe [-0,94], Co [-0,93], Ni [-0,93], La [-0,91], Rb [-0,90], Ba [-0,89], Pb [-0,87], Li [-0,86], Si [-0,83], U [-0,83] (табл. 4). Это говорит о наличии одной основной группы элементов, характеризующихся близостью

особенностей поведения в процессах миграции. Распределение значений первого фактора (рис. 3) во многом совпадает с распределением суммарного коэффициента концентрации химических элементов.

Со вторым фактором (f2) отрицательно связаны Ca [-0,72], Na [-0,57], Sr [-0,56], Mg [-0,54] (табл. 4). В своей основе они представляют элементы, которые мы отнесли к «геохимической матрице». Характер распределения значений второго фактора (рис. 4) во многом совпадает со структурно-тектоническим разделением впадины оз. Байкал на Южную, Центральную и Северную котловины, что можно объяснить региональными гидрогеохимическими отличиями придонных вод этих частей озера. Отдельные локальные аномальные значения второго фактора на фоне общей тенденции в его распределении можно связывать с внешним воздействием по отношению к придонным водам, например, таким как речной сток.

С третьим, четвертым и пятым факторами связаны незначительные по количественному составу группы химических элементов. С третьим (f3) – W [0,50] и B [0,47], с четвертым (f4) – Cu [0,63] и Cd [0,51], с пятым (f5) – Hf [-0,74] (табл. 4), что может указывать на иные, отличные от остальных химических элементов причины их поступления в придонные воды озера. Так, распределение значений f3 отчетливо свидетельствует в пользу того, что основные источники поступления W и B приурочены к Центральной котловине Байкала. Возможно, эти элементы сопровождают инфильтрацию нефти в воды озера, которая наиболее

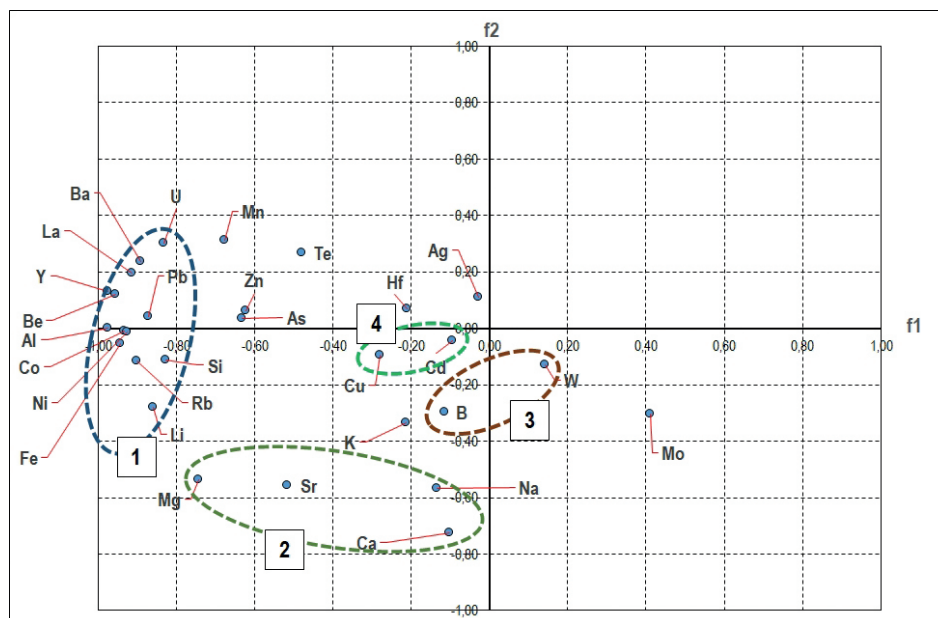


Рис. 2. Факторная диаграмма по содержаниям химических элементов в придонных водах. Цифрами обозначены выделенные ассоциации химических элементов

ярко проявлена именно в Центральной котловине (проявления нефти Горевое, Толстое, Стволовое и др.). А связь Cu и Cd с четвертым фактором может свидетельствовать об антропогенной его природе.

Еще одной важнейшей задачей, требующей решения, является оценка генетической связи комплексных гидрогеохимических аномалий в придонных водах с приповерхностными выходами газовых кристаллогидратов. С этой целью нами было проведено изучение микрокомпонентного состава остаточной воды газовых кристаллогидратов (гидратной воды) и его сопоставление с составом основных придонных гидрогеохимических аномалий. Остаточной водой мы называем воду, которая остается после удаления из кристаллогидрата его газовой составляющей. Для очистки этой воды от механических примесей дополнительно проводилось ее центрифугирование.

Средний состав микрокомпонентов придонной и гидратной воды приведен на диаграммах (рис. 5, а, б). Прежде всего нужно отметить, что гидратные воды в высокой степени обогащены относительно придонных вод широким спектром химических элементов. А сравнение среднегармонических концентраций придонной [Cg (пв)] и остаточной воды [Cg (гв)] показывает, что относительный коэффициент концентрации [Cg (гв)/Cg (пв)] имеет высокие значения для целого ряда химических элементов и составляет для Al – 177,5; La – 142,3; Hf – 146,4; Y – 90,0; Fe – 66,2; Cu – 58,2; Bi – 51,5; Si – 31,6; Pb – 21,3; Cd – 19,8 (рис. 6). Кроме того, для таких химических элементов как Li, Be, Mn, Co, Ni, Zn, As, Rb, Ag, W, Bi в отдельных образцах гидратной воды коэффициент концентрации относительно их фона в придонных водах может достигать нескольких десятков и более единиц. Еще одной, на наш взгляд, важной особенностью гидратной воды является присутствие в ее составе ртути, содержание которой достигает 0,031 мкг/дм³. А единственной точкой, в которой отмечена концентрация Hg в придонной воде, превышающая фоновое значение более чем на 3S (0,0062 мкг/м³), является станция 18Б-46, расположенная в районе проявления газовых гидратов Кукуйский Каньон.

Для сравнения состава комплексных гидрогеохимических аномалий с составом гидратной воды были построены так называемые «геохимические спектры» (рис. 7). Данные спектры представляют собой графики, построенные по значениям коэффициента концентрации элемента в конкретной аномалии относительно его фона в придонной воде. Аналогичный график построен для гидратной воды, только в качестве коэффициента концентрации берется отношение среднего гармонического содержания элемента в остаточной воде гидратов к фону в придонной воде.

Сравнение «геохимических спектров» говорит о большом сходстве состава комплексных геохимических аномалий с составом гидратной воды. Такие элементы, как Be, Al, Si, Mn, Fe, Co, Cu, Y, La, коэффициент концентрации которых

в гидратной воде превышает 10 единиц, также присутствуют в составе аномалий в высоких концентрациях.

В то же время содержания Na, K, Mg, Ca, Sr как в гидратной воде, так в придонных водах аномалий близки к фоновым.

Также важно, что большинство химических элементов с высокой концентрацией входят в состав первой ассоциации химических элементов (рис. 2), корреляционно связанной с первым фактором, распределение которого в пределах акватории озера согласуется с распределением суммарного коэффициента концентрации (рис. 1) и положением приповерхностных проявлений газовых кристаллогидратов.

Сходство микрокомпонентного состава остаточных гидратных вод и комплексных гидрогеохимических аномалий, а также связь ведущих химических элементов с первым фактором могут свидетельствовать в пользу генетической связи этих аномалий с процессами гидратообразования.

Изучение гидрогеохимического состава придонных вод с высокой степенью достоверности указывает на непосредственное влияние локальных процессов, связанных с миграцией углеводородов, на формирование гидрогеохимических аномалий. В результате в районах проявления углеводородов могут формироваться комплексные гидрогеохимические аномалии в придонных водах, различные по контрастности и сложности входящих в них химических элементов, а наличие таких аномалий является одним из критериев выделения площадей акватории, перспективных на обнаружение выходов газовых кристаллогидратов на дне. В то же время непосредственно в районе расположения проявлений газовых гидратов комплексные гидрогеохимические аномалии не всегда удается выявить. Возможно, для изучения микрокомпонентного состава придонных вод в таких районах необходимо проведение более детальных гидрогеохимических исследований.

В результате факторного анализа были выделены три основные ассоциации химических элементов. Первая из них (Li, Be, Al, Si, Fe, Co, Ni, Rb, Y, Ba, La, Pb, U) может быть связана с процессами разрушения газовых гидратов в приповерхностных условиях, в результате которых придонные воды обогащаются химическими элементами остаточной воды газовых гидратов. Макроэлементы второй ассоциации (Ca, Na, Sr, Mg) могут являться компонентами фоновой природной составляющей придонных вод. С процессами инфильтрации нефти в водную толщу, вероятно, связаны В и W, химические элементы третьей ассоциации.

Исходя из полученных гидрогеохимических предпосылок, представляется возможным выделить несколько перспективных участков акватории оз. Байкал для выявления гидратсодержащих структур. В первую очередь это юго-восточный склон Академического хребта к северо-востоку от проявления Хубой, а также структуры к югу от проявления Посольский Каньон, выявленные нами в процессе проведения непрерывного

	Li	Be	B	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
f1	-0,86	-0,96	-0,12	-0,13	-0,74	-0,98	-0,83	-0,21	-0,10	-0,68	-0,94	-0,93	-0,93	-0,28
f2	-0,28	0,12	-0,30	-0,57	-0,54	0,00	-0,11	-0,34	-0,72	0,31	-0,05	-0,01	-0,01	-0,10
f3	-0,19	0,08	0,47	0,28	-0,01	-0,07	-0,24	-0,22	-0,07	0,42	-0,15	-0,14	0,04	0,01
f4	0,09	-0,01	-0,10	0,08	-0,16	0,00	0,01	0,00	-0,24	-0,20	0,04	0,06	0,14	0,63
f5	0,14	0,03	0,20	-0,37	-0,16	0,05	0,04	0,04	-0,12	-0,02	0,08	0,12	0,02	-0,10
f6	-0,18	0,09	-0,29	0,05	0,04	-0,05	-0,09	-0,11	0,19	0,28	-0,14	-0,08	0,12	0,25

Примечание. Голубым цветом выделены элементы с отрицательной связью с фактором, оранжевым – с положительной,

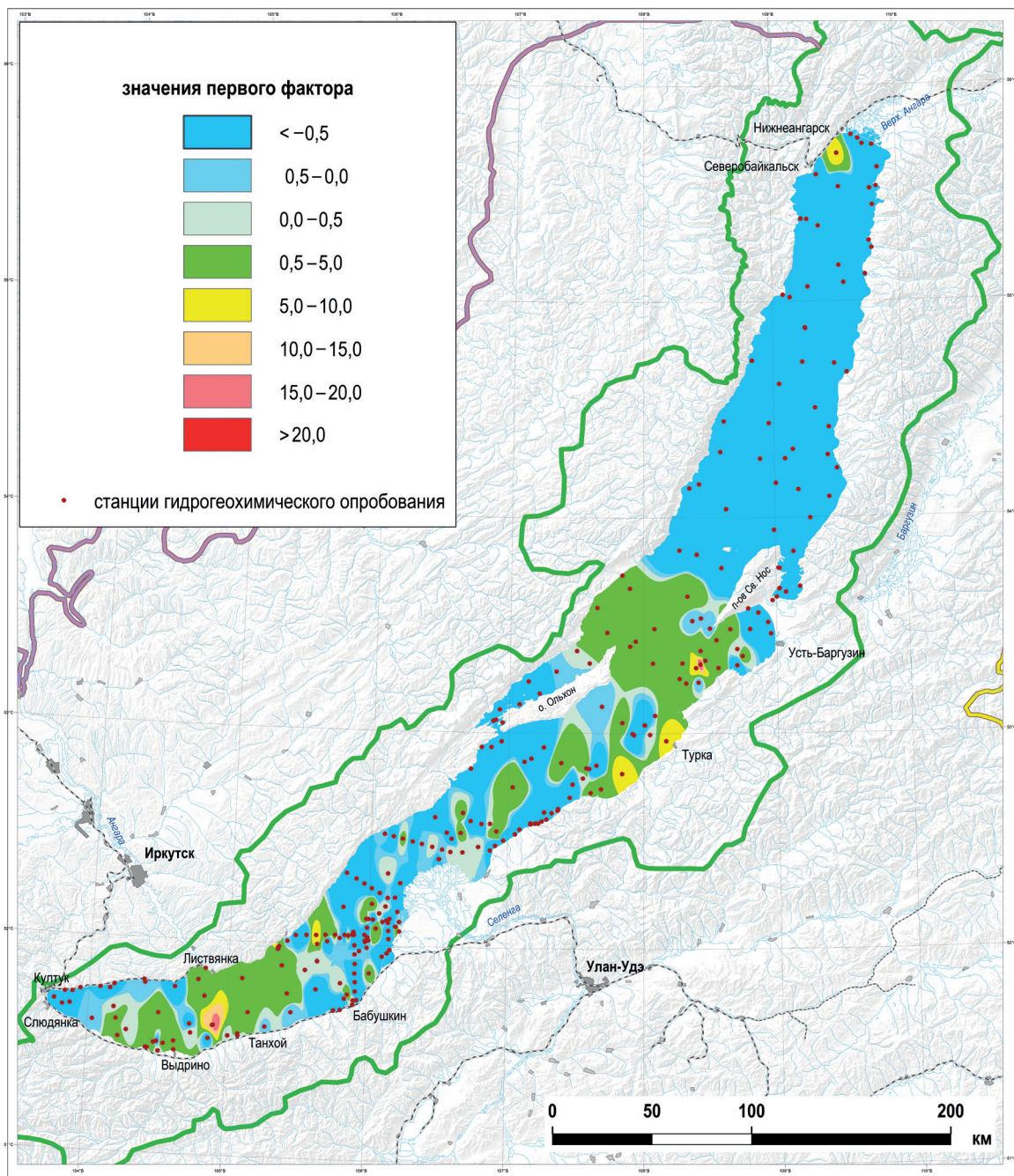


Рис. 3. Схема распределения значений первого фактора

Таблица 4

Нагрузки компонент

	Zn	As	Rb	Sr	Y	Mo	Ag	Cd	Te	Ba	La	Hf	W	Pb	U
	-0,62	-0,63	-0,90	-0,52	-0,97	0,41	-0,03	-0,09	-0,48	-0,89	-0,91	-0,21	0,14	-0,87	-0,83
	0,06	0,04	-0,12	-0,56	0,13	-0,30	0,11	-0,05	0,27	0,24	0,20	0,07	-0,13	0,04	0,30
	-0,24	0,31	-0,24	0,21	-0,03	0,38	0,38	0,07	0,34	0,15	0,07	0,10	0,50	0,00	0,23
	0,31	-0,10	0,09	-0,30	0,00	0,32	0,32	0,51	-0,16	-0,07	-0,04	0,19	0,44	0,17	-0,11
	-0,02	0,11	0,10	0,04	0,06	0,40	0,40	-0,10	-0,22	0,05	0,02	-0,74	0,12	-0,08	0,03
	-0,12	-0,21	-0,22	0,26	0,01	-0,12	-0,46	0,38	-0,20	0,12	0,07	-0,08	-0,28	-0,08	0,22

пороговые значения факторной нагрузки для каждой ассоциации указаны в тексте на с. 60, $p = 0,05$, число проб – 297.

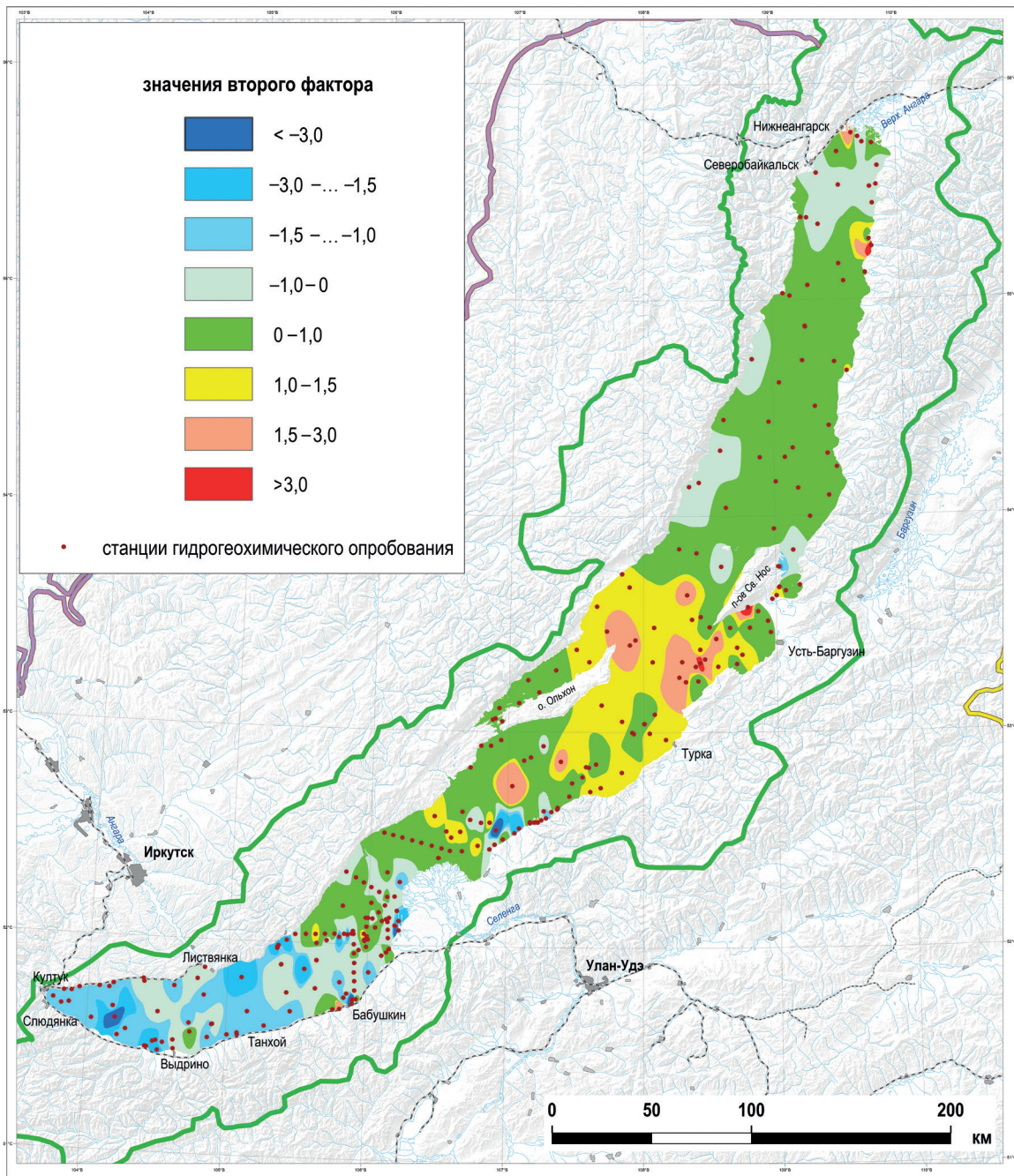


Рис. 4. Схема распределения значений второго фактора

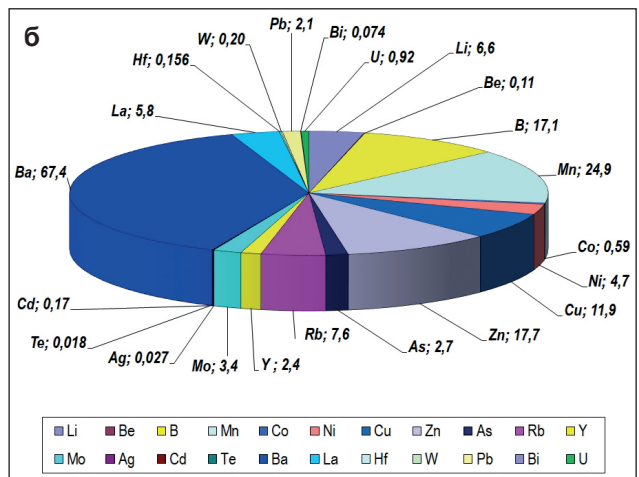
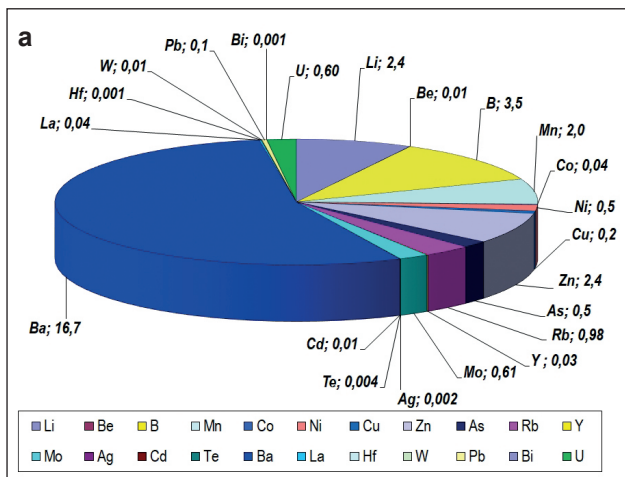


Рис. 5. Химический состав воды

а – фоновый химический состав придонной воды (среднее гармоническое), мг/дм³ (без основных макрокомпонентов); б – средний химический состав гидратной воды (среднее гармоническое), мг/дм³ (без основных макрокомпонентов)

сейсмоакустического профилирования. Кроме того, целесообразно проведение исследований структур в Южной котловине, к которым приурочены проявления гидратов Большой и Маленькой, а также Солзан и Мамай.

Практически полное отсутствие придонных комплексных гидрогеохимических аномалий, а также распределение значений первого фактора по

акватории озера свидетельствуют о малой перспективности на выявление приповерхностных проявлений газовых кристаллогидратов в Северной котловине оз. Байкал.

Методика и результаты исследований температурного режима придонной области оз. Байкал. Измерения температуры показали, что область малых глубин характеризуется более высокой температурой как придонной воды, так и грунта, что согласуется с измерением температурного профиля с помощью батометра «Розетта» (рис. 8).

Температура придонной воды меняется в диапазоне от 3,4 до 18,4 °С. Ее фоновое значение, за которое принимается среднее гармоническое значение всех измерений, составляет 5,3 °С. Температура грунта колеблется в несколько более узком диапазоне (3,4–14,0 °С) при фоновой температуре 3,8 °С. На всех глубинах озера температура грунта обычно ниже температуры придонной воды, измеренной в той же точке. В то же время нами были установлены факты обратного соотношения температур. В первую очередь, в бух. Змеиная. Наиболее высокая температура придонной воды наблюдалась здесь в 2020 г. на акватории в районе выхода термальных вод на станции 20Б-17 – 18,4 °С. В этой же точке установлен аномальный выброс температуры грунта до 41,4 °С. При этом в нижней части керна на глубине 45 см от поверхности температура грунта существенно увеличилась и достигала 48,9 °С (рис. 9). Еще одной точкой в 2020 г., в которой, по нашему мнению, наблюдается температурная аномалия, является станция 20Б-2, расположенная вблизи проявлений газовых кристаллогидратов Кукуйского Каньона. Здесь при температуре воды, равной 4,4 °С, температура грунта составляет 6,5 °С.

Таким образом, можно предположить, что в результате разгрузки термальных газонасыщенных вод, происходит прогрев дна в местах

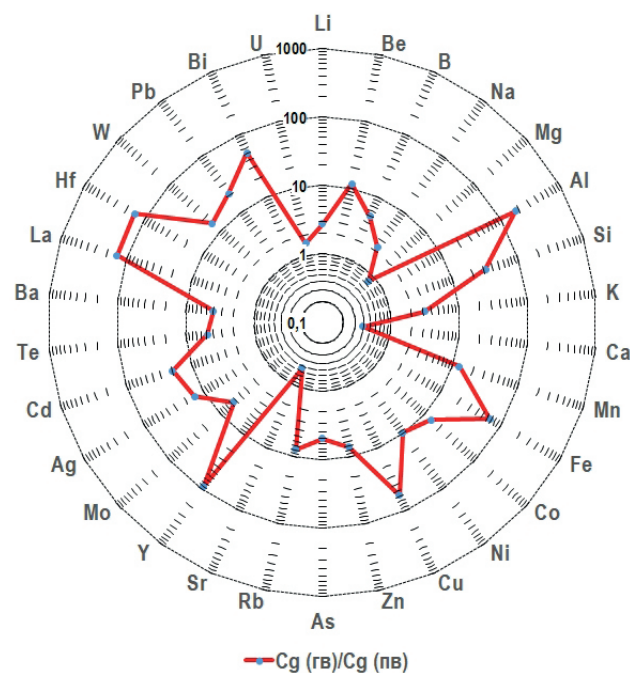


Рис. 6. Значения коэффициента концентрации химических элементов в гидратной воде относительно придонной воды [Cg (гв)/Cg (пв)]

Cg (гв) – среднее гармоническое содержание химического элемента в гидратной воде;

Cg (пв) – среднее гармоническое содержание химического элемента в придонной воде

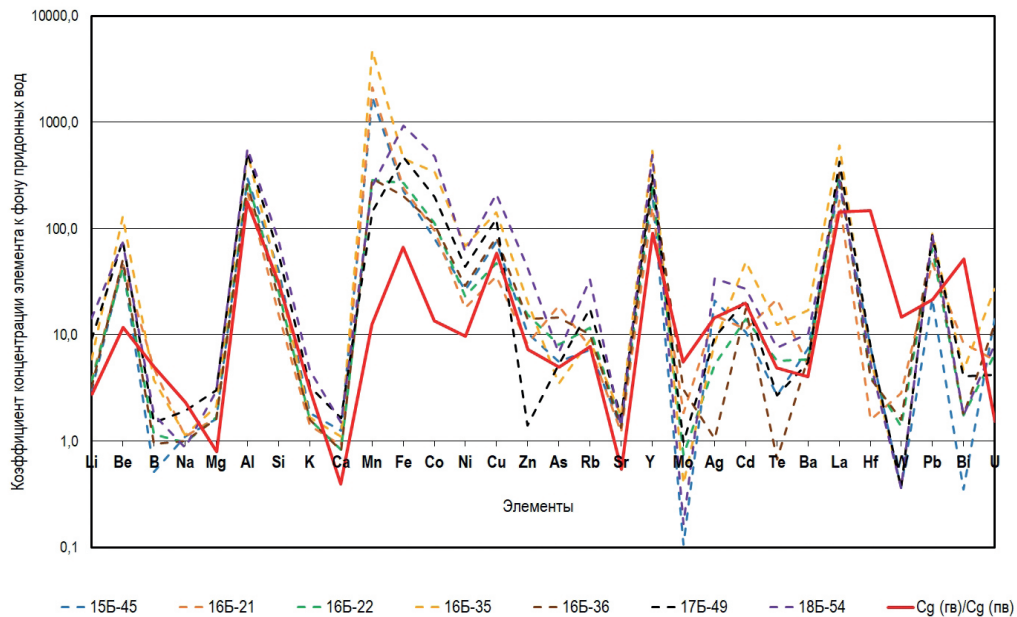


Рис. 7. Геохимические спектры основных комплексных гидрогеохимических аномалий в придонных водах и гидратной воды (в единицах относительно фона химических элементов придонной воды), состав аномалий – в табл. 2

их выхода. Представляется, что такие процессы могут наблюдаться не только в мелководной, но и в глубоководной части акватории оз. Байкал. В связи с этим измерение температуры грунта и придонной воды и составление схемы придонных температурных аномалий приобретают важное значение для исследований процессов миграции углеводородов. Однако нужно понимать, что схема температурных аномалий не может быть составлена по абсолютным значениям температуры, измеренным в системах отбора на палубе научно-исследовательского судна, так как за время их подъема под влиянием многих факторов происходит искажение первоначальной температуры. Кроме того, в глубоководных районах озера происходит многократное перемешивание вод, что приводит к выравниванию температур в придонной зоне водной толщи [6] и часто делает невозможным выявление температурных аномалий даже при проведении прямых измерений температуры воды.

В связи с этим для схемы придонных температурных аномалий была предложена методика, в основе которой лежит одновременное измерение температуры как воды, так и грунта в системах пробоотбора (ковш бокс-корер и бентосная трубка), в которых производится их совместный отбор. Кроме того, мы предполагаем, что донный грунт с точки зрения температурных характеристик обладает большей консервативностью по сравнению с придонными водами. Чтобы при анализе температурного режима в придонной области исключить влияние искажения значения температуры при подъеме на поверхность водной толщи и донного грунта нами был предложен расчетный коэффициент или температурный градиент:

$$[(T \text{ воды} - T \text{ грунта})/T \text{ грунта}] \times -1,$$

где T воды – температура придонной воды, а T грунта – температура донного грунта, который представляет собой противоположное число разности температур воды и грунта, приходящейся на единицу температуры грунта, вычисленное по результатам одновременного измерения температуры воды и грунта в системе отбора.

Близкие к нулю отрицательные, а тем более положительные значения температурного градиента могут, по нашему мнению, указывать на прогрев дна в местах проведения наблюдений. Схема придонных температурных аномалий представляет собой схему изолиний равных значений температурного градиента (рис. 10). Анализ распределения его значений в пределах изученной части акватории озера показал, что наиболее распространены его величинами в Южной и Центральной котловинах озера являются значения от $-0,2$ до $-0,5$ единицы. На этом фоне отмечаются локальные положительные значения рассчитанного градиента и более площадные поля со значениями более $-0,2$ единицы. Наиболее значимые аномалии расположены в южной части Селенгинского мелководья и залива Посольский Сор, у пос. Танхой (проявление газовых гидратов Мамай и Кедр), мыс Голоустный (проявление газовых гидратов Голоустное), пос. Заречье, мыс Бакланьего, пос. Горячинский и мыс Горевой Утес (нефте- и гидратопроявление Горевой Утес), мыс Крестовского, Кукуйского Каньона. Менее выраженные отмечены в заливе Култук, у пос. Байкальск (проявление газовых гидратов Солзан) и Выдрино, бух. Песчаная (проявление газовых гидратов Песчанка), мыс Уншуй (проявление газовых гидратов Крест)

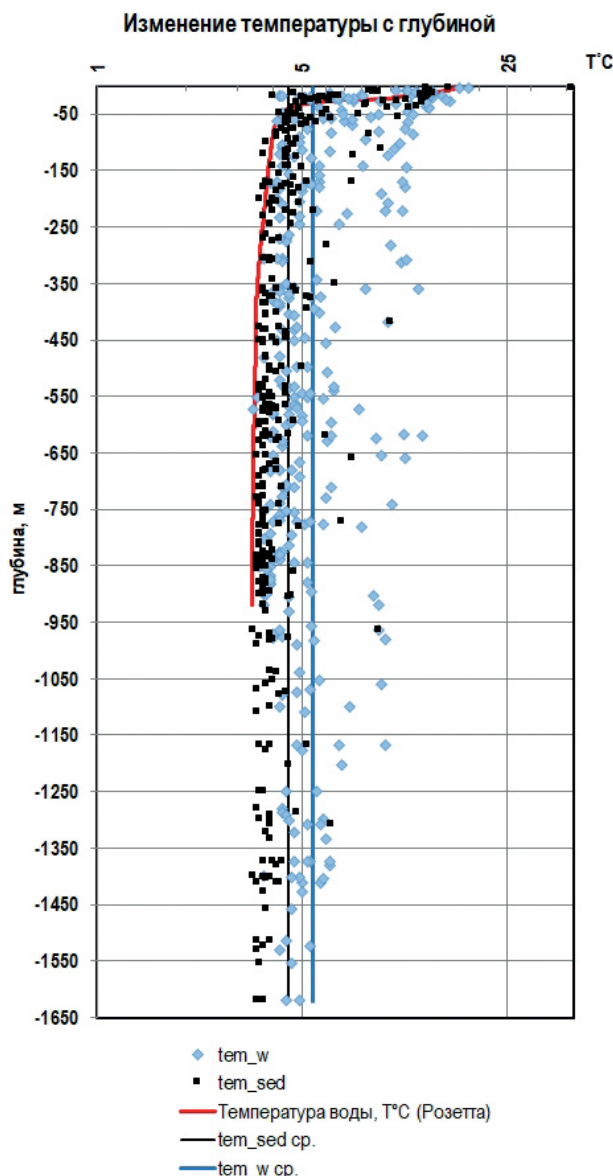


Рис. 8. График изменения температуры в донном грунте и придонной воде с глубиной

tem_w – температура воды; tem_sed – температура грунта; температура, t°С (Розетта) – температура воды, измеренная при спуске батометра «Розетта», 2015 г.; tem_w ср. – средняя температура воды; tem_sed ср. – средняя температура грунта

и других точках акватории. Таким образом, сопоставление полученных результатов температурных исследований с положением объектов природной миграции углеводородов в Южной и Центральной котловинах озера показало, что аномальные значения температурного градиента часто приурочены к областям активного газовыделения (грифонам), а также выявленным поверхностным проявлениям газовых гидратов.

Существенно иные закономерности отмечены в Северной котловине озера. Практически вся изученная часть акватории к северу от Академического хребта находится в зоне с высокими значениями температурного градиента. Здесь наиболее распространены его значения более

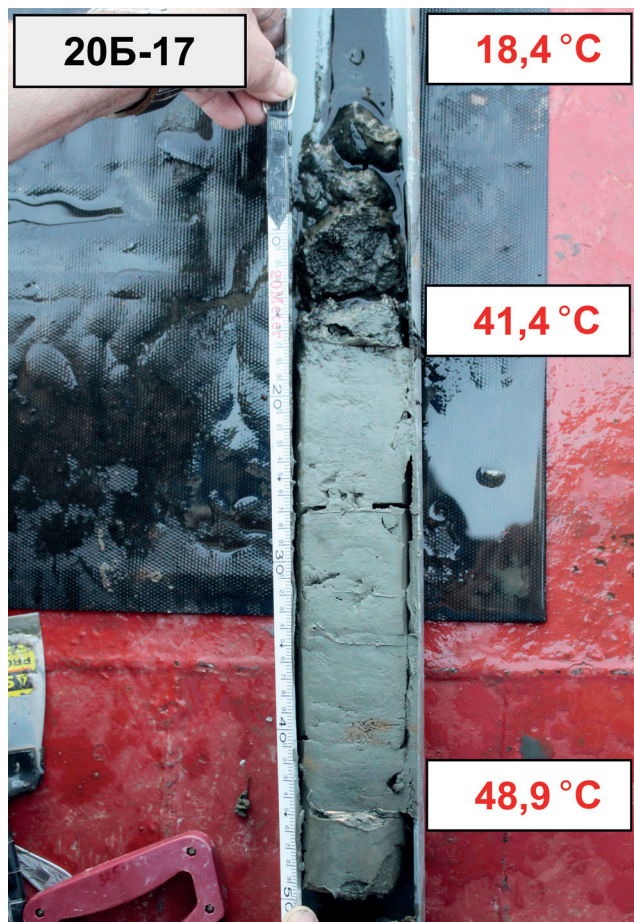


Рис. 9. Результаты измерения температуры придонной воды и грунта на станции 20Б-17, бух. Змеиная

–0,2 единицы (рис. 10). На этом фоне выделены три основные зоны с положительными (>0,1) значениями температурного градиента: к югу от мыса Елохин, бух. Змеиная Чивыркуйского залива и у мыса Кабаний. По нашему мнению, это может свидетельствовать о существенно ином температурном режиме в Северной котловине по сравнению с Южной и Центральной, и который может быть связан с отсутствием здесь поверхностных выходов газовых кристаллогидратов.

Закономерно возникает предположение, что причина локального прогрева дна – это аномалии теплового потока от дна. С целью проверки этого предположения была проведена переинтерпретация данных о величинах теплового потока через дно оз. Байкал, которые были получены В. А. Голубевым [6], и построена схема аномалий теплового потока. Для этого было рассчитано фоновое значение величины теплового потока, проходящего через дно оз. Байкал. В качестве такового принято среднее гармоническое значение теплового потока (Q_f) по результатам всех измерений. Вычисленное таким образом значение регионального фонового теплового потока составило 66 мВт/м². Затем все результаты измерений в точках наблюдения были пересчитаны в единицы стандартного отклонения от этого фона:

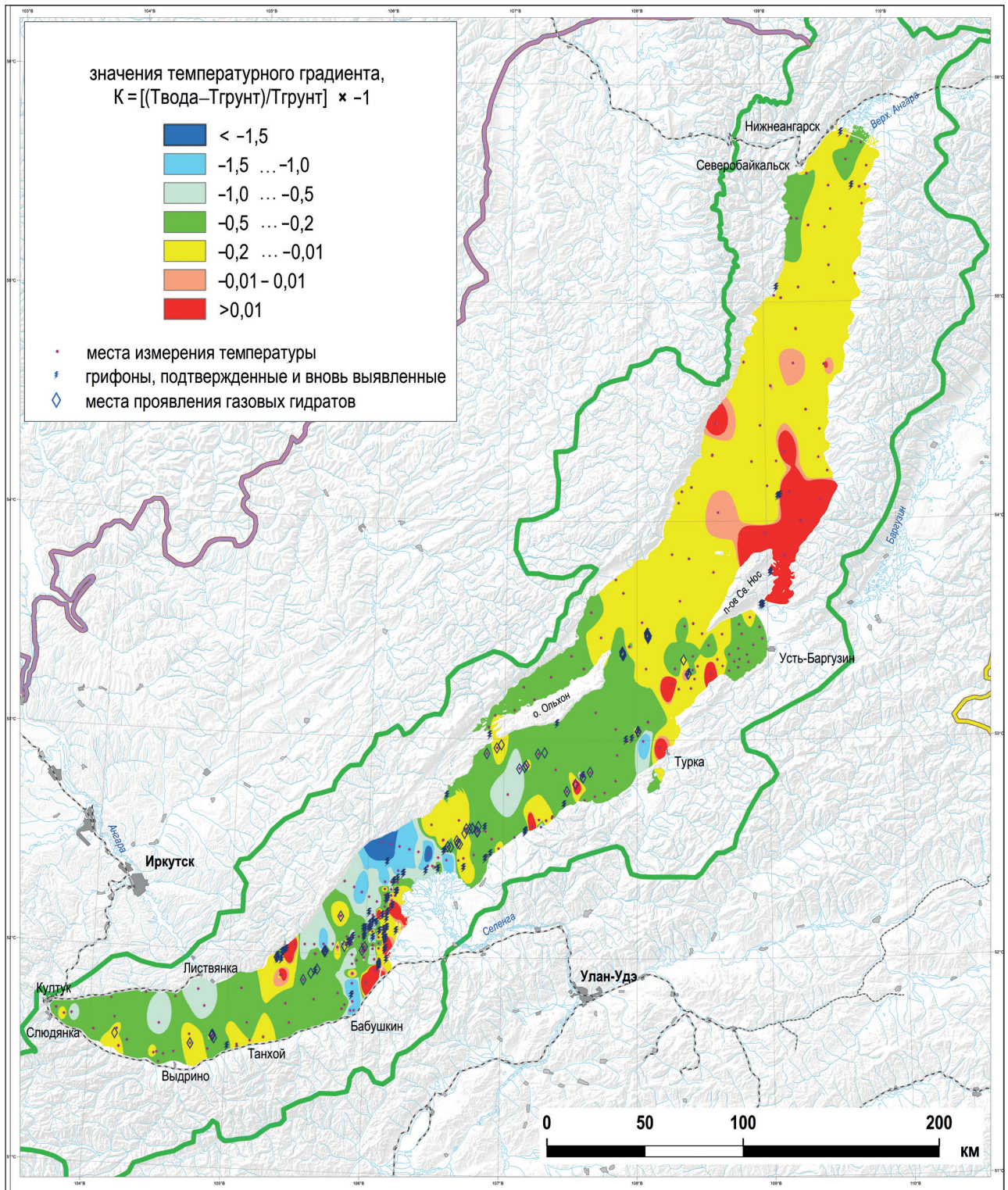


Рис. 10. Схема распределения температурного градиента (придонных температурных аномалий) по результатам измерения температуры донного грунта и придонной воды

$$[(Q_i - Q_f)/S],$$

где Q_i – величина теплового потока, измеренная в точке наблюдения, а S – стандартное отклонение от фона.

Таким образом, составленная схема аномалий теплового потока представляет собой схему распределения разности измеренной в точке

наблюдения величины теплового потока и регионального фона теплового потока, нормированную на величину стандартного отклонения от фона (рис. 11).

Сопоставление расположения температурных аномалий и аномалий теплового потока показали сходство в положении аномальных полей на разных схемах. Расхождения в большей мере связа-

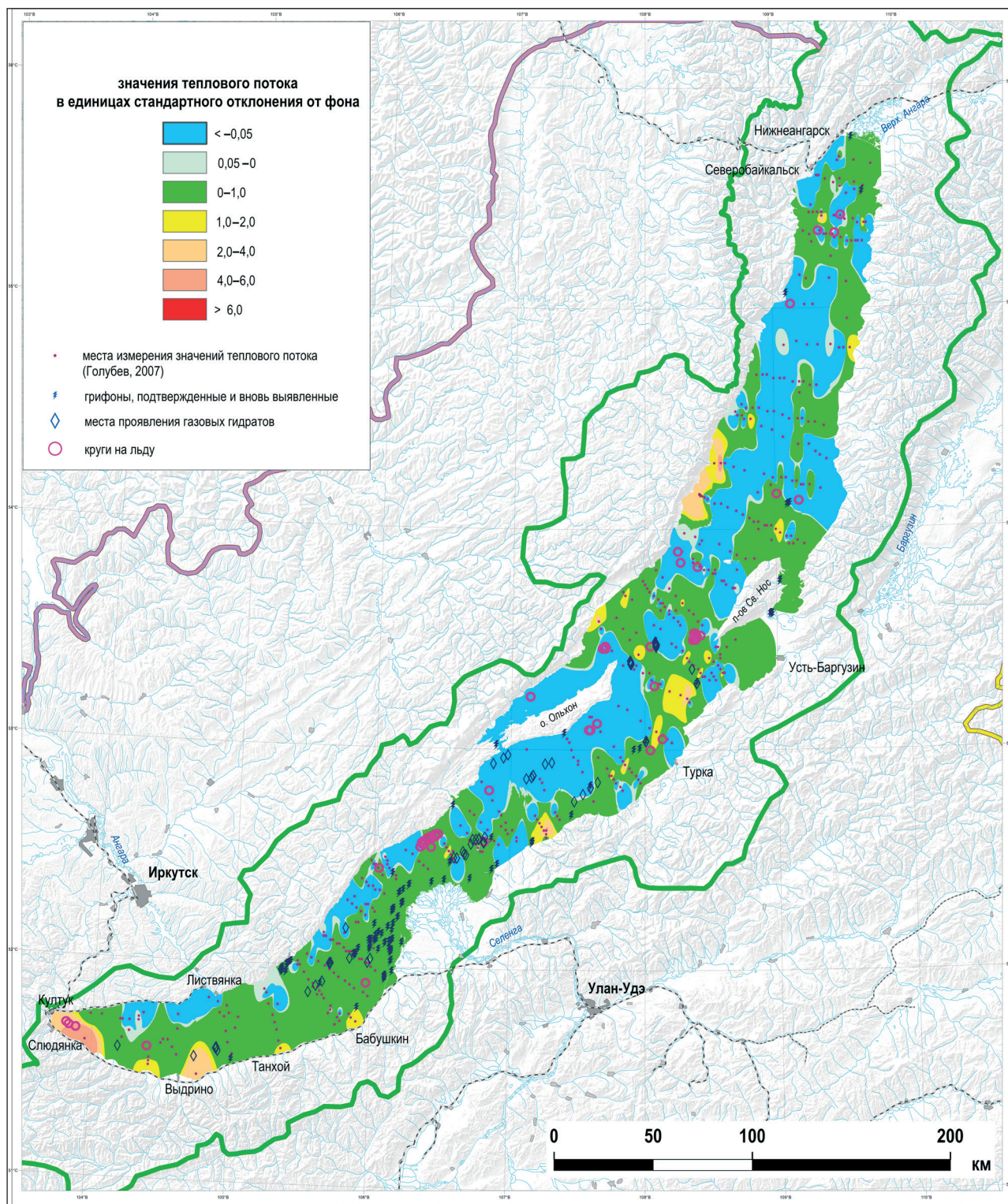


Рис. 11. Схема аномалий теплового потока по данным В. А. Голубева [6] (составил В. А. Шахвердов, 2020 г.)

ны с различиями в плотности и несовпадением сети точек измерения температуры и параметров теплового потока. На ряде объектов миграции углеводородов измерения величины теплового потока вообще не производились. Например, это такие объекты как проявления гидратов Голоустное, Кедр и районы активного газовыделения со дна на Селенгинском мелководье, у мыса Крестовский

и др. В то же время такие крупные проявления газовых гидратов как Горевой Утес, Мамай, а также нефтепроявление у пос. Заречье и ряд других объектов миграции УВ проявляются как в поле теплового потока, так и температурного градиента. Это позволяет говорить о том, что данные, представленные на схемах, в основном не противоречат, а взаимно дополняют друг друга.

Заключение. Проведенные исследования показали, что разработанные методики обработки гидрогеохимических данных и результатов температурных измерений весьма эффективны для изучения особенностей проявления процессов природной миграции углеводородов в придонной области оз. Байкал. Это позволило впервые выполнить картирование микрокомпонентного состава придонных вод озера как в пределах большей части акватории озера, так и в районах объектов миграции углеводородов, и составить схему размещения гидрогеохимических аномалий в придонных водах.

В результате проведенных гидрогеохимических исследований и полученных аналитических данных определены характеристики регионального фона химических элементов в придонной воде оз. Байкал, составлена схема придонных гидрогеохимических аномалий, выявлена их пространственная локализация и элементный состав.

Выделены три основные ассоциации химических элементов. Первая из них (Li, Be, Al, Si, Fe, Co, Ni, Rb, Y, Ba, La, Pb, U) может быть связана с процессами разрушения газовых гидратов в приповерхностных условиях. Вторая (Ca, Na, Sr, Mg), вероятно, является компонентами фоновой природной составляющей придонных вод. Элементы третьей ассоциации (B и W) – с процессами инфильтрации нефти в водную толщу.

Сходство микрокомпонентного состава остаточных гидратных вод и комплексных гидрогеохимических аномалий, а также связь ведущих химических элементов с первым фактором могут свидетельствовать в пользу генетической связи этих аномалий с процессами гидратообразования.

Предложенная методика расчета температурного градиента позволила впервые для оз. Байкал составить схему придонных температурных аномалий и выявить зоны прогрева дна. Часть из них, как показал анализ гидрогеохимических особенностей придонных вод, сопровождается комплексными гидрогеохимическими аномалиями. Это может указывать на то, что прогрев дна, который сопровождается субаквальные очаги разгрузки термальных вод в этих районах, приводит к разрушению газовых гидратов с активным выделением метана, а данные температурных наблюдений могут быть показателем происходящих процессов.

Проведенные исследования придонных вод и газовых кристаллогидратов позволяют предполагать, что процесс гидратообразования сопровождается активной мобилизацией вещества, переводом химических элементов в мобильные формы и вовлечением их в миграционные процессы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ветров В. А., Кузнецова А. И., Склярова О. А. Базовые уровни химических элементов в воде озера Байкал // География и природные ресурсы. – 2013. – № 3. – С. 41–45.
2. Влияние глубинной конвекции на аэрацию придонной зоны Байкала / М. Н. Шимараев, В. М. Домы-

шева, Р. Ю. Гнатовский и др. // География и природные ресурсы. – 2016. – № 3. – С. 70–77.

3. Геохимия окружающей среды Прибайкалья (Байкальский геоэкологический полигон) / В. И. Гребенщикова, Э. Е. Лустенберг, Н. А. Китаев, И. С. Ломоносов; науч. ред. М. И. Кузмин // Институт геохимии им. А. П. Виноградова. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2008. – 234 с.

4. Глубинная вода озера Байкал – природный стандарт пресной воды / М. А. Грачев, В. М. Домышева, Т. В. Ходжер и др. // Химия в интересах устойчивого развития. – 2004. – № 12. – С. 417–429.

5. Голубев В. А. Геотермия Байкала. – Новосибирск : Наука, 1982. – 150 с.

6. Голубев В. А. Кондуктивный и конвективный вынос тепла в Байкальской рифтовой зоне // Институт земной коры СО РАН. – Новосибирск : Академическое изд-во «Гео», 2007. – 222 с.

7. Голубев В. А. Очаги субаквальной гидротермальной разгрузки и тепловой баланс северного Байкала // Докл. РАН. – 1993. – Т. 328, № 3. – С. 315–318.

8. Государственный доклад «О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2019 году». – Иркутск : АНО «КЦ Эксперт», 2020. – 342 с.

9. Дучков А. Д. Газогидраты метана в осадках озера Байкал // Российский химический журнал. – 2003. – Т. XLVII, № 3. – С. 91–100.

10. Невская губа: Эколого-геологический очерк / М. А. Спиридонов, Д. В. Рябчук, В. А. Шахвердов, С. И. Звездунов, Е. Н. Нестерова, Г. А. Суслев, А. Г. Григорьев. – СПб. : Литера, 2004. – 181 с.

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

12. Особенности холодных интрузий на Байкале по наблюдениям в 1993–2009 гг. / М. Н. Шимараев, А. А. Жданов, Р. Ю. Гнатовский и др. // Водные ресурсы. – 2011. – Т. 38, № 2. – С. 163–168.

13. Шахвердов В. А. Невская губа – проблемы изучения и оценки экологической обстановки // Минерал. – 1998. – № 1. – С. 56–64.

14. Шахвердов В. А., Кулаков С. В. Геохимические особенности современных отложений центральной части Норильского района и геохимическое районирование // Природные ресурсы Таймыра: сб. науч. тр. – Дудинка, 2004. – Вып. 2. – С. 284–299.

15. Шахвердов В. А., Шахвердова М. В. Гидрогеохимические особенности придонных вод центральной части оз. Байкал / под ред. Е. М. Нестерова, В. А. Снытко, С. И. Махова // Геология, геоэкология, эволюционная география: Тр. Международного семинара. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2016. – Т. XV. – С. 312–315.

16. Шахвердов В. А., Шахвердова М. В. Гидрогеохимические особенности придонной зоны оз. Байкал в связи с процессами природной миграции углеводородов / под ред. Е. М. Нестерова, В. А. Снытко, С. И. Махова // Геология, геоэкология, эволюционная география: Тр. Международного семинара. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А. И. Герцена, 2017. – Т. XVI. – С. 90–93.

17. Шахвердов В. А., Шахвердова М. В. Содержание гексанрастворимых нефтепродуктов в придонных водах, почвах и современных донных осадках береговой зоны восточной части Финского залива как индикатор техногенного воздействия // Региональная геология и металлогения. – 2008. – № 34. – С. 121–129.

18. Шимараев М. Н., Троицкая Е. С. Гнатовский Р. Ю. Изменения температуры глубинных вод озера Байкал в 1972–2007 гг. // География и природные ресурсы. – 2009. – № 3. – С. 68–76.

19. Gaz hydrates in Lake Baikal / O. M. Khlystov, A. V. Khabuev, H. Minami, A. Hachikubo, A. A. Krylov // Limnology and Freshwater Biology. – 2018. – Vol. 1. – Pp. 66–70.

REFERENCES

1. Vetrov V. A., Kuznetsova A. I., Sklyarova O. A. Bazovye urovni khimicheskikh elementov v vode ozera Baykal [Basic levels of chemical elements in the water of Lake Baikal]. *Geography and Natural Resources*, 2013, no. 3, pp. 41–45.
2. Shimaraev M. N., Domysheva V. M., Gnatovskiy R. Yu. et al. Vliyanie glubinnoy konveksii na aeratsiyu pridonnoy zony Baykala [Influence of deep convection on aeration of the Baikal bottom zone]. *Geography and Natural Resources*, 2016, no. 3, pp. 70–77.
3. Grebenschikova V. I., Lustenberg E. E., Kitaev N. A., Lomonosov I. S. Geokhimiya okruzhayushchey sredy Pribaykal'ya (Baykal'skiy geokologicheskiy poligon) [Geochemistry of the environment of Lake Baikal (Baikal geo-environmental test site)]. Ed. by M. I. Kuzmin. A. P. Vinogradov Institute of Geochemistry. Novosibirsk, Academic Publishing house «Geo», 2008, 234 p.
4. Grachev M. A., Domysheva V. M., Khodzher T. V. et al. Glubinnaya voda ozera Baykal – prirodnyy standart presnoy vody [Deep water of the lake Baikal – a natural standard of fresh water]. *Chemistry for Sustainable Development*, 2004, no. 12, pp. 417–429.
5. Golubev V. A. Geotermiya Baykala [Geothermy of Baikal]. Novosibirsk, Nauka, 1982, 150 p.
6. Golubev V. A. Konduktivnyy i konvektivnyy vynos tepla v Baykal'skoy riftovoy zone [Conductive and convective heat transfer in the Baikal rift zone]. *Institute of the Earth Crust*. Novosibirsk, Academic Publishing house «Geo», 2007, 222 p.
7. Golubev V. A. Ochagi subakval'noy gidrotermal'noy razgruzki i teplovoy balans severnogo Baykala [Chances of subaquatic hydrothermal discharge and heat balance of Northern Baikal]. *Reports of the Academy of Sciences*, 1993, vol. 328, no. 3, pp. 315–318.
8. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii ozera Baykal i merakh po ego okhrane v 2019 godu» [State Report «On the State of Lake Baikal and Measures for its Protection in 2019»]. Irkutsk, ANO «KTs Ekspert», 2020, 342 p.
9. Duchkov A. D. Gazogidraty metana v osadkakh ozera Baykal [Methane gas hydrates in sediments of Lake Baikal]. *Russian Chemical Journal*, 2003, vol. XLVII, no. 3, pp. 91–100.
10. Spiridonov M. A., Ryabchuk D. V., Shakhverdov V. A., Zvezdunov S. I., Nesterova E. N., Suslov G. A., Grigor'ev A. G. Nevskaya guba: Ekologo-geologicheskiy ocherk [Nevskaya Bay: Ecological and geological sketch]. St. Petersburg, Litera, 2004, 181 p.
11. Pogodaeva T. V., Zemskaya T. I., Golobokova L. P. et al. Osobennosti khimicheskogo sostava porovykh vod donnykh otlozheniy razlichnykh rayonov ozera Baykal [Peculiarities of chemical composition of bottom sediment water of different areas of Baikal Lake]. *Geology and Geophysics*, 2007, vol. 48, no. 11, pp. 1144–1160.
12. Shimaraev M. N., Zhdanov A. A., Gnatovskiy R. Yu. et al. Osobennosti kholodnykh intruziy na Baykale po nablyudeniyam v 1993–2009 gg. [Features of cold intrusions in Baikal according to observations in 1993–2009]. *Water Resources*, 2011, vol. 38, no. 2, pp. 163–168.
13. Shakhverdov V. A. Nevskaya guba – problemy izucheniya i otsenki ekologicheskoy obstanovki [Nevskaya Bay – problems of study and assessment of ecological situation]. *Mineral*, 1998, no. 1, pp. 56–64.
14. Shakhverdov V. A., Kulakov S. V. Geokhimicheskie osobennosti sovremennykh otlozheniy tsentral'noy chasti Noril'skogo rayona i geokhimicheskoe rayonirovanie [Geochemical features of modern deposits of the central part of the Norilsk region and geochemical zoning]. *Natural resources of Taimyr. Collection of scientific works*. Dudinka, 2004, iss. 2, pp. 284–299.
15. Shakhverdov V. A., Shakhverdova M. V. Gidrogeokhimicheskie osobennosti pridonnykh vod tsentral'noy chasti oz. Baykal [Hydrogeochemical features of bottom waters of the central part of Lake Baikal]. Ed. by E. M. Nesterova, V. A. Snytko, S. I. Makhova. *Geology, geoecology, evolutionary geography: Proceedings of the International workshop*. St. Petersburg, Publishing house of Russian State Pedagogical University named after A. I. Gertsen, 2016, vol. XV, pp. 312–315.
16. Shakhverdov V. A., Shakhverdova M. V. Gidrogeokhimicheskie osobennosti pridonnoy zony oz. Baykal v svyazi s protsessami prirodnoy migratsii uglevodorodov [Hydrogeochemical features of the bottom zone of Lake Baikal in connection with the processes of natural hydrocarbon migration]. Ed. by E. M. Nesterova, V. A. Snytko, S. I. Makhova. *Geology, geoecology, evolutionary geography: Proceedings of the International workshop*. St. Petersburg, Publishing house of Russian State Pedagogical University named after A. I. Gertsen, 2017, vol. XVI, pp. 90–93.
17. Shakhverdov V. A., Shakhverdova M. V. Soderzhanie geksanrastvorimyykh nefteproduktov v pridonnykh vodakh, pochvakh i sovremennykh donnykh osadkakh beregovoy zony vostochnoy chasti Finskogo zaliva kak indikator tekhnogenogo vozdeystviya [Content of hexane-soluble oil products in bottom waters, soils and modern bottom sediments of the coastal zone of the eastern part of the Gulf of Finland as an indicator of technogenic impact]. *Regional Geology and Metallogeny*, 2008, no. 34, pp. 121–129.
18. Shimaraev M. N., Troitskaya E. S. Gnatovskiy R. Yu. Izmeneniya temperatury glubinykh vod ozera Baykal v 1972–2007 gg. [Changes in the temperature of deep waters of Lake Baikal in 1972–2007]. *Geography and Natural Resources*, 2009, no. 3, pp. 68–76.
19. Khlystov O. M., Khabuev A. V., Minami H., Hachikubo A., Krylov A. A. Gaz hydrates in Lake Baikal. *Limnology and Freshwater Biology*, 2018, vol. 1, pp. 66–70.

Шахвердов Вадим Азимович – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник. <Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>
Шахвердова Марина Васильевна – инженер 2-й категории. <Marina_Shakhverdova@vsegei.ru>

Shakhverdov Vadim Azimovich – Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Leading Researcher.
<Vadim_Shakhverdov@vsegei.ru>
Shakhverdova Marina Vasil'evna – Engineer. <Marina_Shakhverdova@vsegei.ru>

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.