

ГИДРОХИМИЯ, ГИДРОБИОЛОГИЯ, ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

УДК 556.5+551.465+577.472

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ МЕТАНА В ВОДАХ ОЗЕРА БАЙКАЛ¹

© 2023 г. Д. Н. Гарькуша^{a, *}, Ю. А. Фёдоров^a, Н. С. Тамбиева^b,
Ю. А. Андреев^b, Р. А. Аджиев^b

^aИнститут наук о Земле Южного федерального университета,
Ростов-на-Дону, 344090 Россия

^bГидрохимический институт,
Ростов-на-Дону, 344090 Россия

*e-mail: gardim1@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.02.2022 г.

После доработки 24.10.2022 г.

Принята к публикации 31.10.2022 г.

Проанализированы результаты изучения распределения концентраций метана в воде открытой акватории и северной оконечности оз. Байкал, а также в истоке р. Ангара в сентябре 2016 и 2019 гг. Для выявления корреляционных связей, помимо метана, также определялись различные гидрохимические показатели (температура; pH; концентрации O_2 , взвешенных веществ, C_{org} , N_{org} , P_{org} , минеральных соединений азота и фосфора). Концентрация метана в воде Байкала варьировала в 2016 г. в пределах 0.44–3.41 мкл/дм³ (в среднем 0.80 мкл/дм³), в 2019 г. – 0.20–5.19 мкл/дм³ (в среднем 1.22 мкл/дм³). Максимальная концентрация метана отмечена в водной массе наиболее глубоководной центральной котловины озера, минимальная – южной котловины. Для мелководных участков минимальные концентрации метана отмечались в прибрежной зоне зал. Лиственничного, максимальные – в северной части озера, куда впадает большое количество рек, а также в пределах Селенгинского мелководья. Для большинства как глубоководных, так и мелководных станций наблюдался пик подповерхностного максимума концентраций метана на глубинах 25–50 м (зона термоклина), после чего его концентрации, как правило, снижались, достигая минимальных значений, либо в промежуточной водной толще, либо в придонных слоях. Мелководные участки, помимо более высоких концентраций метана по сравнению с глубоководными, отличались также и большей контрастностью его распределения по вертикали водной толщи. Анализ корреляционных зависимостей между исследуемыми гидрохимическими показателями выявил наличие значимых прямых связей концентраций метана с концентрациями C_{org} и N_{org} и обратных прямых связей с концентрациями O_2 .

Ключевые слова: оз. Байкал, водная толща, растворенный метан, гидрохимические показатели, распределение метана.

DOI: 10.31857/S0321059623020098, **EDN:** IQWYBU

ВВЕДЕНИЕ

Пресное оз. Байкал, включенное в 1996 г. в список объектов всемирного наследия ЮНЕСКО, – одно из самых грандиозных геологических образований на Земном шаре, объем вод которого составляет ~20% пресных вод суши. Низкая минерализация (~100 мг/дм³) и специфический состав воды озера, своеобразие животного и растительного мира, высокое содержание растворенного кислорода, несмотря на большие глубины, вызывают постоянный интерес ученых всего мира [3].

Байкал расположен в южной части Восточной Сибири между 51° и 56° с.ш., 103° и 110° в.д. Впа-

дина озера окружена со всех сторон цепями гор, которые вплотную подходят к берегам, прерываясь лишь в местах впадения крупных притоков. В морфологическом отношении впадина озера делится глубоководными поднятиями дна – Селенгинской (Селенгино-Бугульдейской) перемычкой и Академическим хребтом – на Южный (максимальная глубина 1461 м), Средний (1642 м) и Северный Байкал (904 м) [25]. Южная котловина озера простирается от южной оконечности озера до дельты р. Селенги, где происходит поднятие дна озера (Селенгинская перемычка). Средняя котловина расположена между р. Селенгой и архипелагом Ушканьих островов. Морфологически она замыкается с СЗ Академическим хребтом, линейно вытянутым от о. Ольхон до Ушканьих островов и далее на СВ. Северная котловина про-

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект 22-27-00671) в Южном федеральном университете.

стирается от Ушканьих островов до северной оконечности озера. Дно Байкала во всех трех котловинах выровнено со слабым наклоном к западной стороне впадины, где отмечаются максимальные глубины озера [14].

В число уникальных особенностей пресноводного оз. Байкал входят выявленные в донных осадках приповерхностные залежи газовых гидратов, а также многочисленные пузырьковые (струйные) выходы газа со дна озера [9, 30, 36]. На сегодняшний день обнаружено 120 мелководных струйных выходов газа, приуроченных в основном к дельте р. Селенги, на глубинах, не превышающих глубину устойчивости газовых гидратов (380 м, по [30]), и 22 глубоководных струйных выходов газа, зафиксированных во всех трех котловинах озера [15]. Самый глубокий струйный выход газа, названный “Санкт-Петербург”, происходит на глубине 1400 м, самый мелководный выход газа – на глубине чуть >1 м в районе пос. Большие Коты [15]. Как правило, метановые разгрузки фиксируют тектонически ослабленные зоны и области дегазации над залежами углеводородов, в том числе метановых газогидратов [12, 30, 34], а также сопровождают генерацию биогенного метана в донных отложениях.

Первые сведения по распределению концентраций метана в воде и донных отложениях Байкала были получены при экспедиционных исследованиях в летние периоды 1988 и 1994 гг. [21]. Примерно в то же время были впервые изучены микробиологические процессы цикла метана в отложениях озера [4, 17]. С тех пор опубликован ряд работ, посвященных изучению распределения метана в воде и донных отложениях озера [3, 7, 8, 10, 16, 18, 41, 44], однако среди них мало публикаций, ориентированных на изучение распределения метана по вертикальному профилю водной толщи, а их результаты отчасти имеют противоречивый характер.

Так, по данным [16, 18, 42, 44], в открытой акватории Байкала вне зон непосредственного влияния вод притоков, подводных грязевых вулканов и газовых сипов в пределах верхней сотни метров наблюдаются максимальные концентрации метана. Далее с удалением от поверхности его концентрации снижаются, достигая минимальных значений в одних случаях – в глубинной части водной толщи [42], в других случаях – в придонном слое [16, 44]. В то же время в районах разгрузки углеводородсодержащих флюидов в Южном и Среднем Байкале более высокие концентрации метана установлены в придонных горизонтах воды (850–1370 м) [10]. Исключение – отдельные горизонты в поверхностном (5 м) и промежуточ-

ном (300–400 м) слоях воды ряда станций, где зафиксированы максимальные для вертикального профиля концентрации метана.

В целом для Байкала характерны одни из самых низких концентраций метана в воде среди озер мира [3], что обусловлено хорошей аэрацией озера, обуславливающей высокие содержания растворенного в воде кислорода даже в придонных слоях воды (>85% насыщения), а также олиготрофным статусом большинства районов озера [5, 33].

В настоящей работе проанализированы результаты двух масштабных экспедиций, изучавших распределение концентраций метана по площади акватории и глубине водной толщи оз. Байкал. В ходе экспедиций также измерены разные гидрохимические показатели для выявления корреляционных связей с концентрациями метана.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 2016 г. (с 7 по 20 сентября) и 2019 г. (с 9 по 21 сентября) авторами проведены работы, в ходе которых в открытой акватории Байкала, истоке Ангары и северной прибрежной части озера на различных горизонтах отобраны пробы воды для определения концентраций метана (рис. 1). Дополнительно в отобранных пробах измерены температура; pH; концентрации O_2 , взвешенных веществ, минеральных соединений азота и фосфора (NO_2^- , NO_3^- , NH_4^+ и PO_4^{3-} в пересчете на N и P), а также $C_{орг}$, $N_{орг}$ и $P_{орг}$.

Отбор проб воды проведен с борта научно-исследовательских судов “Персей” (2016 г.) и “Профессор Вознесенский” (2019 г.) (Иркутское УГМС Росгидромета) соответственно с помощью батометра “Gidrobios” и кассетного пробоотборника “General Oceanics Model 1018” на 12 батометров. В последнем случае каждый батометр отдельно программировался на необходимую глубину, что позволило одновременно автоматически отбирать пробы с заданных горизонтов.

Отбор и подготовка проб, а также последующее определение вышеперечисленных показателей состава и свойств вод выполнены по общепринятым в системе Росгидромета стандартным методикам [19, 20]. Температуру воды фиксировали по термометрам, установленным на батометрах, сразу после их подъема на борт судна. Определение pH и концентраций O_2 выполнено с помощью портативных pH-метра иономера и оксиметра серии “Эксперт”. Фильтрацию проб воды объемом 1.0 л при измерении массовой концентрации взвешенных веществ проведено через мембранные фильтры “Владипор” типа МФАС-ВА с размером пор 0.45 мкм с последую-

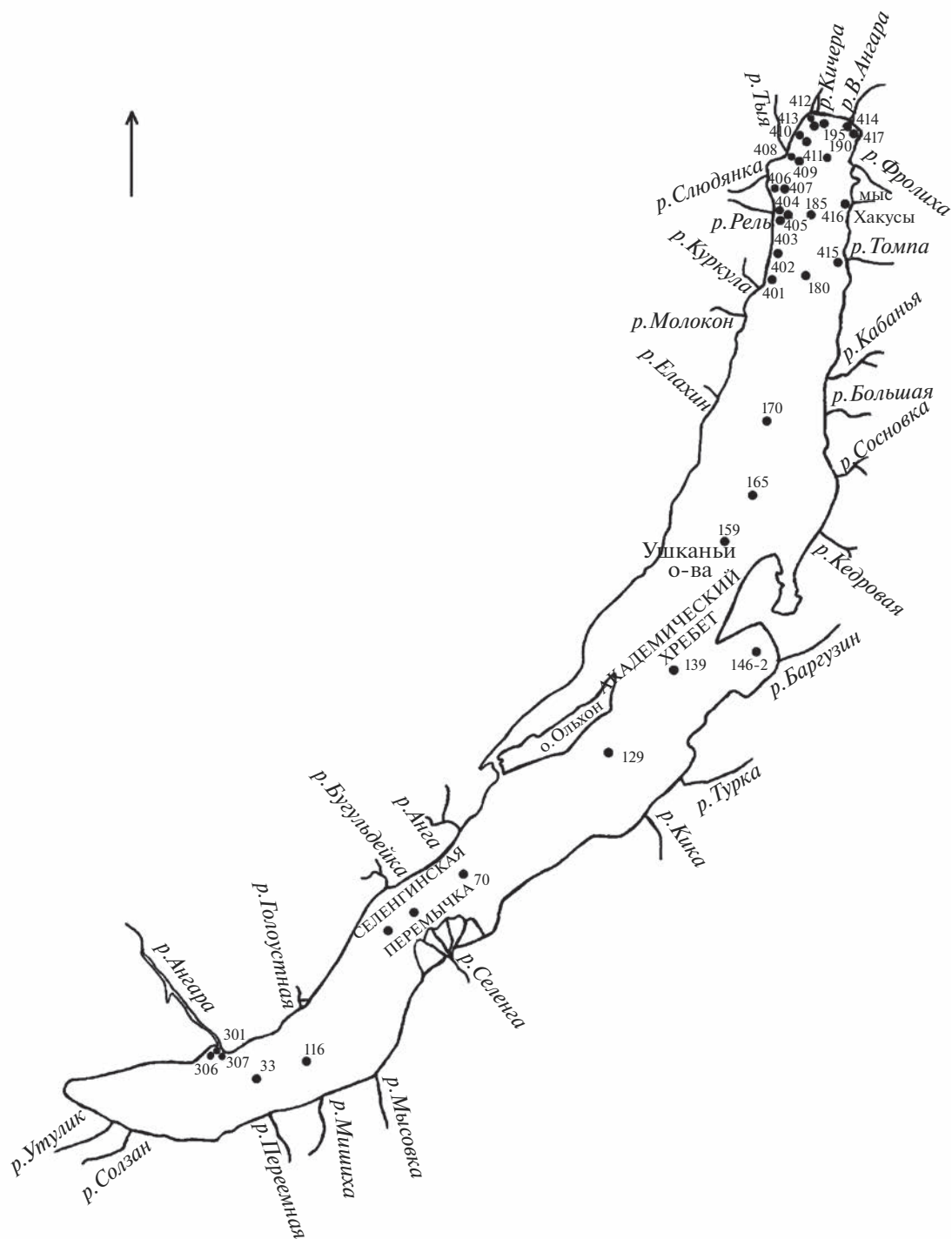


Рис. 1. Картограмма расположения станций отбора проб (кружки), оз. Байкал.

щим взвешиванием на аналитических весах “ВЛ-220М” специального класса точности с дискретностью 0.00001 г. Измерение концентрации метана в воде выполнено на газовом хроматографе “Хроматэк-Кристалл 5000.2” с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температура воды в Байкале на момент проведения экспедиционных исследований в сентябре 2016 и 2019 гг. варьировала в пределах соответственно 4.0–15.8°C (в среднем 10.9°C; количество определений $n = 54$) и 3.8–15.5°C (в

среднем 10.0°C ; $n = 53$) с максимальными значениями в поверхностном и минимальными — в придонном слоях (табл. 1). Распределение температуры поверхностного слоя воды по акватории озера в изученные периоды несколько разнилось. В сентябре 2016 г. минимальная температура (7.5°C) поверхностного слоя воды зафиксирована на глубоководной станции Южной котловины озера (ст. 33), а максимальная ($14.6\text{--}15.8^{\circ}\text{C}$) — на мелководных (<250 м) и глубоководных (>600 м) станциях Северной котловины озера. В сентябре 2019 г. наблюдалась обратная картина — максимальные значения температуры ($13.6\text{--}15.7^{\circ}\text{C}$) поверхностного слоя воды отмечались на мелководных и глубоководных станциях Южной котловины озера, а минимальные ($8.3\text{--}8.8^{\circ}\text{C}$) — на глубоководных станциях Центральной и Северной котловин (станции 139, 159 и 170). В отличие от описанных различий распределения температуры в поверхностном слое воды, характер их распределения по вертикальному профилю водной толщи исследованных районов озера мало различался. В оба экспедиционных периода в целом еще не была нарушена характерная для летнего периода прямая термическая стратификация, выражающаяся в наличии слоя температурного скачка (термоклина) на глубине 25–50 м [11]. Тем не менее в сентябре 2016 г. в Южной котловине и в сентябре 2019 г. в Центральной и Северной котловинах (вероятно, вследствие сильной ветровой активности и уменьшения температуры воздуха в предшествующий наблюдениям период) температура поверхностного слоя воды заметно снизилась и температурный скачок на глубинах 25–50 м был выражен слабее.

Значения pH незначительно варьировали в слабощелочном диапазоне — $7.48\text{--}8.11$ (в среднем 7.73 , $n = 140$) и $7.44\text{--}8.07$ (в среднем 7.78 , $n = 140$) в сентябре 2016 и 2019 гг. соответственно. В 2016 г. в 73% вертикальных профилей максимальные значения pH наблюдались в верхней (0–50 м) толще воды. В 2019 г. в 90% всех вертикальных профилей отмечалось снижение pH от поверхностного слоя ко дну, как правило — с резким спадом и нередко и с минимальными значениями на глубине 50 м.

Концентрации растворенного кислорода в воде озера составляли в сентябре 2016 и 2019 гг. соответственно $9.16\text{--}12.32$ (в среднем 10.24 мг/дм³, $n = 89$) и $8.61\text{--}10.91$ мг/дм³ (в среднем 9.95 мг/дм³, $n = 90$) и в основном были близки к пределу насыщения ($>90\%$), что свидетельствует о доминировании аэробных процессов, протекающих в водной толще озера и в поверхностном слое донных отложений.

Концентрация взвешенных веществ в байкальской воде была крайне низкой — до 0.7 мг/дм³ (в среднем 0.12 и 0.33 мг/дм³ в сентябре соответ-

ственно 2016 и 2019 гг.; $n = 140$), что согласуется с работами [5, 24, 39]. Как на мелководных, так и на глубоководных станциях озера в оба периода максимальное количество взвешенных веществ в большинстве случаев наблюдалось в верхней (0–50 м) толще воды, но нередко и/или в придонном слое.

Концентрация метана в воде Байкала в сентябре 2016 и 2019 гг. варьировала в пределах соответственно от 0.37 до 3.41 мкл/дм³ (в среднем 0.80 мкл/дм³, $n = 139$) и от 0.20 до 5.19 мкл/дм³ (в среднем 1.22 мкл/дм³, $n = 125$) (табл. 1). Как и в предыдущие годы наблюдений [3, 21, 24], максимальные концентрации метана в воде (в среднем 1.06 и 1.50 мкл/дм³ соответственно в 2016 и 2019 гг.) были характерны для прибрежных станций северной части озера с глубинами 25–220 м, куда впадают воды рек Верхняя Ангара, Кичера и др., а также (в среднем 0.68 и 1.93 мкл/дм³ в сентябре соответственно 2016 и 2019 гг.) для станций профиля, проложенного в пределах Селенгинского мелководья. В последнем случае высокие концентрации метана (до $3.59\text{--}5.19$ мкл/дм³) связаны, вероятно, с непосредственным влиянием стока Селенги, в воде которой концентрация метана, по данным исследований [44], составляет $5.0\text{--}22.9$ мкл/дм³.

В зонах озера с глубинами >600 м максимальными концентрациями метана (в среднем 0.58 и 0.97 мкл/дм³ в сентябре соответственно 2016 и 2019 гг.) характеризовалась водная масса наиболее глубоководной центральной котловины (станции 129 и 139). Сопоставимые концентрации (в среднем 0.58 и 0.91 мкл/дм³ соответственно в 2016 и 2019 гг.) отмечены в водной толще северной котловины (станции 159, 165, 170, 180, 185 и 190). Минимальные концентрации метана (в среднем 0.49 и 0.83 мкл/дм³ в сентябре соответственно 2016 и 2019 гг.) зафиксированы в водах южной котловины озера (станции 306, 33 и 116). Несмотря на большие размеры Байкала и некоторую изолированность его котловин, в целом концентрации метана на глубоководных станциях озера характеризовались слабой изменчивостью по площади акватории и по вертикали водного столба, что согласуется с результатами в [42]. Соотношения между средними концентрациями метана по всей водной массе на глубоководных станциях южной, центральной и северной котловин в сентябре 2016 и 2019 гг. несколько различались и составляли соответственно $1 : 1.18 : 1.18$ и $1 : 1.17 : 1.10$. Такие же соотношения, но только для глубинной водной массы (горизонты воды ≥ 100 м) южной, центральной и северной котловин составляли $1 : 1.33 : 1.29$ и $1 : 1.22 : 1.14$ в сентябре соответственно 2016 и 2019 гг. Таким образом, глубинная водная масса центральной котловины озера в оба периода наблюдений характеризовалась более высокими

Таблица 1. Концентрации метана, растворенного кислорода, взвешенных веществ, значения pH и температуры на различных горизонтах водной толщи оз. Байкал по результатам экспедиций в сентябре 2016 и 2019 гг. (степень насыщения воды кислородом приведена только для поверхностного горизонта)

№ станции; координаты, с.ш./в.д.	Горизонт, м	CH ₄ , мкл/дм ³		T, °C		pH		O ₂ , мг/дм ³ (%)		Взвешенные вещества, мг/дм ³	
		2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019
Южная котловина озера											
ст. 301, зал. Лиственничный, исток Ангары 51°51.014′/ 104°47.824′	0.5	0.52	0.86	7.6	14.0	7.79	8.00	10.26 (94)	9.68 (99)	0	0.4
	10	—	0.85	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.87	1.05	—	—	8.11	7.70	10.96	10.61	0.5	0.1
	50	0.74	0.76	—	—	7.81	7.64	—	—	0.2	0.4
	200	—	0.55	—	—	7.80	7.65	—	—	0.2	0.7
	240	0.82	0.47	—	—	7.66	7.72	11.42	10.76	0	0.4
ст. 306, зал. Лиственничный 51°48.661′/ 104°44.538′	0.5	0.52	0.85	10.5	15.5	7.77	8.00	10.96 (98)	9.38 (93)	0	0
	10	—	0.92	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.59	1.15	—	—	7.76	7.79	10.96	10.45	0	0.5
	50	0.57	1.07	—	—	7.73	7.65	—	—	0.2	0.6
	200	—	0.92	—	—	7.76	7.61	—	—	0.4	0.6
	1000	0.44	0.74	—	—	7.75	7.47	11.11	10.15	0	0.6
ст. 307, зал. Лиственничный 51°50.106′/ 104°51.160′	0.5	0.54	—	9.1	15.7	7.83	8.07	11.11 (96)	9.38 (93)	0	0.5
	50	0.67	—	—	—	7.77	7.68	—	—	0	0.5
	250	0.47	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ст. 33 51°42.538′/ 105°05.413′	0.5	0.42	0.97	7.5	13.8	7.73	8.01	10.96 (91)	9.84 (95)	0	0.6
	10	—	0.93	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.49	0.89	5.2	8.8	7.79	7.81	11.11	10.76	0	0
	50	0.47	0.84	4.5	8.3	7.90	7.72	—	—	0	0.5
	100	0.47	1.00	4.0	7.8	7.94	7.71	—	—	0	0.4
	1417	0.45	0.82	4.2	4.5	7.88	7.68	10.96	10.91	0	0.3
ст. 116 51°48.543′/ 105°29.622′	0.5	0.37	0.20	9.3	13.6	7.80	7.99	10.51 (92)	10.5 (100)	0.0	0
	10	—	0.31	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.62	1.26	—	—	7.85	7.81	11.26	10.91	0.0	0
	50	0.50	1.13	6.8	—	7.92	7.67	—	—	0.0	0.2
	100	0.46	0.48	—	—	7.96	7.65	—	—	0.0	0
	1420	0.44	0.50	—	—	7.74	7.66	10.81	10.76	0.2	0.4
Селенгинское мелководье											
ст. 61 52°22.586′/ 106°01.682′	0.5	0.64	0.81	12.8	12.8	7.77	7.97	10.36 (98)	9.53 (90)	0.3	0.7
	10	—	0.97	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.69	1.09	7.0	8.8	7.68	7.63	11.26	10.61	0.0	0.5
	50	0.57	0.93	—	5.8	7.67	7.66	—	—	0.0	0.5
	100	0.70	0.98	5.5	5.2	7.64	7.66	—	—	0.0	0.3
	250	0.49	0.54	4.7	4.0	7.60	7.64	11.26	10.15	0.0	0
ст. 4 52°27.302′/ 106°11.477′	0.5	0.62	5.19	13.3	14.0	7.69	7.96	11.1 (107)	8.92 (87)	0.0	0.6
	25	0.64	3.59	—	—	7.59	7.91	11.11	9.07	0.0	0.4
	50	1.14	3.90	—	—	7.50	7.88	—	—	0.0	0.7
	100	0.55	3.74	—	—	7.72	7.92	—	—	0.0	0.3
	250	0.68	4.33	—	—	7.64	7.85	10.21	9.38	0.1	0.2
ст. 70 52°35.648′/ 106°36.494′	0.5	0.64	1.03	13.2	11.6	7.79	8.01	10.06 (96)	9.84 (91)	0.0	0.4
	10	—	1.53	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.69	1.41	—	—	7.70	7.81	10.66	10.61	0.0	0.6
	50	0.69	1.21	—	—	7.81	7.75	—	—	0.2	0.5
	100	0.57	0.87	—	—	7.84	7.70	—	—	0.0	0.4
	421	0.92	0.62	—	—	7.67	7.69	11.11	10.61	0.0	0.5

Таблица 1. Продолжение

№ станции; координаты, с.ш./в.д.	Горизонт, м	CH ₄ , мкл/дм ³		T, °C		pH		O ₂ , мг/дм ³ (%)		Взвешенные вещества, мг/дм ³	
		2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019
Центральная котловина озера											
ст. 129 53°04.683'/ 107°46.767'	0.5	0.64	1.02	13.2	10.1	7.85	8.01	9.91 (95)	9.99 (89)	0.0	0.4
	10	—	1.14	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.65	1.23	—	—	7.70	7.75	11.41	10.76	0.0	0.5
	50	0.54	1.38	—	—	7.79	7.61	—	—	0.0	0.6
	100	0.63	1.15	—	—	7.63	7.63	—	—	0.0	0.6
	600	—	0.93	—	—	—	—	—	—	—	—
	1580	0.73	0.90	—	—	7.73	7.58	11.57	10.61	0.0	0.6
ст. 139 53°22.255'/ 108°12.975'	0.5	0.51	0.84	13.2	8.6	7.60	7.91	9.91 (95)	9.99 (85)	0.3	0.5
	10	—	0.82	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.52	0.94	5.8	6.5	7.63	7.85	11.42	10.61	0.2	0.4
	50	0.49	0.80	5.2	5.3	7.51	7.71	—	—	0.0	0
	100	0.50	0.84	5.2	4.5	7.69	7.65	—	—	0.0	0
	1610	0.55	0.68	5.0	3.8	7.76	7.55	10.51	9.68	0.3	0.6
ст. 146-2, зал. Баргузинский 53°28.974'/108°51.816'	0.5	0.83	—	15.7	12.8	7.79	7.94	10.8 (109)	9.22 (97)	0	0
	30	1.05	—	—	—	7.84	7.88	9.16	9.38	0.2	0.5
Северная котловина озера											
ст. 159 53°55.927'/ 108°37.453'	0.5	0.51	0.83	14.8	8.3	7.59	7.91	9.61 (95)	10.30 (88)	0.7	0
	10	—	0.90	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.56	0.90	10.5	6.1	7.48	7.74	12.02	10.61	0.3	0.5
	50	0.58	0.98	6.7	4.3	7.75	7.59	—	10.76	0.5	0.5
	100	0.52	0.85	5.4	4.3	7.7	7.73	—	—	0.1	0.5
	600	—	0.84	—	—	—	—	—	—	—	—
	880	0.53	0.77	4.5	4.0	7.63	7.70	9.61	10.45	0.2	0.6
ст. 165 54°10.488'/ 108°55.242'	0.5	0.54	—	15.8	—	7.58	8.07	9.46 (96)	10.6 (94)	0.3	0
	25	0.58	—	—	—	7.64	8.03	12.32	10.76	0.4	0.2
	50	0.56	—	—	—	7.75	7.64	—	—	0.5	0
	100	0.62	—	—	—	7.65	7.70	—	—	0.0	0.4
	860	0.55	—	—	—	7.54	7.70	10.06	9.99	0.2	0.4
	0.5	0.55	1.00	15.3	8.8	7.63	7.84	9.91 (99)	10.15 (87)	0.0	0.4
ст. 170 54°42.491'/ 109°13.289'	10	—	0.96	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.56	0.95	—	—	7.62	7.70	12.17	9.99	0.0	0.5
	50	0.58	1.00	—	—	7.62	7.63	—	—	0.0	0
	100	0.52	1.04	—	—	7.57	7.65	—	—	0.2	0.5
	885	0.53	0.76	—	—	7.83	7.57	10.21	10.45	0.0	0
	0.5	0.64	1.01	15.2	10.6	7.75	7.94	9.31 (93)	10.30 (93)	0.3	0
ст. 180 55°03.789'/ 109°26.255'	10	—	0.94	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.70	0.95	—	—	7.88	7.90	9.46	10.45	0.0	0.4
	50	0.61	1.10	—	—	7.82	7.70	—	—	0.5	0.4
	100	0.61	1.04	—	—	7.82	7.68	—	—	0.3	0.6
	820	0.68	0.88	—	—	7.75	7.71	9.76	10.30	0.1	0
	0.5	0.55	0.82	14.6	11.6	7.81	7.73	9.46 (93)	10.45 (96)	0.2	0.3
ст. 185 55°20.422'/ 109°30.190'	10	—	0.87	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.58	0.93	8.8	8.9	7.79	7.62	11.11	10.76	0.0	0.4
	50	0.55	0.91	6.0	8.2	7.75	7.54	—	—	0.1	0.5
	100	0.62	0.80	6.0	6.4	7.58	7.58	—	—	0.0	0
	800	0.63	0.77	5.1	4.3	7.78	7.62	9.91	10.76	0.2	0.1

Таблица 1. Продолжение

№ станции; координаты, с.ш./в.д.	Горизонт, м	CH ₄ , мкл/дм ³		T, °C		pH		O ₂ , мг/дм ³ (%)		Взвешенные вещества, мг/дм ³	
		2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019
ст. 190 55°35.528'/ 109°36.630'	0.5	0.56	0.99	13.6	9.0	7.78	7.87	9.76 (94)	9.68 (84)	0.4	0
	10	—	0.98	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.59	1.09	—	—	7.80	7.65	10.36	10.45	0.3	0.6
	50	0.69	1.01	—	—	7.9	7.58	—	—	0.0	0.3
	100	0.55	0.98	—	—	7.85	7.61	—	—	0.0	0.2
	500	—	0.72	—	—	—	—	—	—	—	—
	634	0.62	0.64	—	—	7.79	7.48	10.21	9.68	0.1	0.2
ст. 195 55°43.969'/ 109°40.322'	0.5	1.72	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	1.68	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	50	0.96	—	—	—	—	—	—	—	—	—
ст. 401, 0.5 км от берега 55°04.548'/ 109°06.432'	0.5	0.78	—	14.6	13.3	7.70	7.97	9.61 (95)	9.38 (90)	0	0.5
	50	0.64	—	—	—	7.58	7.76	—	—	0	0.5
	100	0.64	—	—	—	7.64	7.61	—	—	0	0.2
ст. 402, 0.5 км от берега 55°08.332'/ 109°08.858'	0.5	0.80	—	14.8	12.5	7.71	7.97	9.31 (92)	9.38 (96)	0.4	0.4
	50	0.69	—	—	—	7.76	7.68	—	—	0	0.4
	130	0.65	—	—	—	7.76	7.62	10.51	10.61	0	0.6
ст. 403, 0.5 км от устья правого рукава р. Рель 55°20.158'/ 109°12.182'	0.5	0.86	—	15.4	12.6	7.82	7.89	9.91 (100)	9.53 (90)	0.6	0.6
	25	0.78	—	—	—	7.78	7.81	9.16	9.68	0.5	0.4
	50	0.75	—	—	—	7.71	7.74	—	—	0.4	0.4
	100	0.59	—	—	—	7.72	7.54	—	—	0	0.4
	170	0.59	—	—	—	7.52	7.60	10.36	10.15	0	0
ст. 404, 0.5 км от устья левого рукава р. Рель 55°21.307'/ 109°12.362'	0.5	1.05	1.83	15.6	10.1	7.7	7.82	9.31 (94)	9.84 (88)	0.1	0
	10	—	1.85	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.96	1.53	—	—	7.82	7.96	9.46	9.68	0	0.3
	50	—	1.69	—	—	7.81	7.86	—	—	0	0.5
	90	0.52	1.22	—	—	7.58	7.62	10.66	10.61	0.4	0.5
ст. 405, 1.0 км от устья левого рукава р. Рель 55°21.263'/109°12.437'	0.5	0.79	—	15.5	13.1	7.78	7.94	9.31 (94)	9.38 (90)	0.5	0.5
	50	0.81	—	—	—	7.74	7.69	—	—	0	0.3
	100	0.69	—	—	—	7.70	7.52	—	—	0	0
ст. 406, 0.2 км от устья р. Слюдянки 55°30.797'/109°12.625'	0.5	0.94	—	15.8	13.5	7.70	7.84	9.76 (99)	9.53 (92)	0	0.4
	25	0.73	—	—	—	7.79	7.72	9.46	9.84	0.7	0.6
ст. 407, 0.6 км от устья р. Слюдянки 55°30.857'/ 109°12.993'	0.5	0.77	—	15.8	13.9	7.78	8.03	9.31 (94)	9.53 (93)	0	0
	25	0.79	—	—	—	7.77	7.88	9.31	9.84	0	0.4
	50	0.91	—	—	—	7.67	7.65	—	—	0	0
	100	0.72	—	—	—	7.63	7.61	—	—	0	0.2
	152	0.66	—	—	—	7.53	7.59	10.51	10.45	0.2	0.4
ст. 408, 0.75 км от устья р. Тыя 55°36.115'/109°21.681'	0.5	1.85	—	15.3	12.6	7.70	8.05	9.61 (96)	9.38 (88)	0.2	0
	25	1.72	—	—	—	7.74	8.01	9.31	9.53	0.1	0
	70	1.60	—	—	—	7.67	7.82	10.66	9.99	0.4	0
ст. 409, 1.5 км от устья р. Тыя 55°35.862'/ 109°22.538'	0.5	1.22	1.43	15.5	11.8	7.81	8.01	9.46 (95)	9.38 (87)	0.2	0
	10	—	1.34	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	1.31	1.54	—	—	7.79	7.88	9.16	10.15	0	0.2
	50	0.67	1.09	—	—	7.68	7.62	—	—	0.1	0
	100	0.54	1.31	—	—	7.72	7.59	—	—	0	0
	200	0.50	1.02	—	—	7.53	7.51	10.66	10.30	0	0.4

Таблица 1. Окончание

№ станции; координаты, с.ш./в.д.	Горизонт, м	CH ₄ , мкл/дм ³		T, °C		pH		O ₂ , мг/дм ³ (%)		Взвешенные вещества, мг/дм ³	
		2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019	2016	2019
ст. 410, 0.5 км от устья р. Чуны 55°42.727'/ 109°28.648'	0.5	0.72	—	14.9	15.8	7.71	8.0	9.46 (94)	9.53 (97)	0.1	0.4
	30	0.84	—	—	—	7.74	8.0	9.46	9.68	0.1	0.4
ст. 411, 2.0 км от устья р. Чуны 55°42.207'/ 109°29.744'	0.5	0.61	—	14.8	15.5	7.81	7.98	9.61 (95)	9.07 (91)	0	0.5
	25	0.69	—	—	—	7.84	7.96	9.61	9.53	0	0.4
	50	0.64	—	—	—	7.87	7.84	—	—	0.2	0.6
	100	0.66	—	—	—	7.77	7.69	—	—	0	0.3
ст. 412, 0.5 км от устья р. Кичеры 55°46.003'/109°37.057'	0.5	1.57	0.73	15.1	12.4	7.72	7.97	9.46 (94)	9.38 (88)	0.1	0.4
	10	—	1.24	—	—	—	—	—	—	—	—
	20	3.41	0.91	—	—	7.64	7.99	9.61	9.38	0.3	0
ст. 413, 1.0 км от устья р. Кичеры 55°45.620'/ 109°36.973'	0.5	1.06	1.20	14.6	12.2	7.73	8.01	9.46 (93)	9.53 (89)	0	0
	10	—	2.07	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	2.54	1.95	—	—	7.79	8.06	9.61	8.92	0.2	0.5
	50	1.31	3.50	—	—	7.75	8.00	—	—	0.2	0.3
	100	1.64	2.36	—	—	7.64	7.56	—	—	0	0.3
ст. 414, 1.0 км от устья р. Верхняя Ангара 55°41.645'/109°51.800'	145	1.69	4.65	—	—	7.76	7.59	11.1	10.45	0	0.5
	0.5	0.75	1.07	14.7	11.0	7.82	7.73	9.61 (95)	8.61 (78)	0	0.3
	10	—	1.22	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.83	1.52	—	—	7.69	7.70	9.61	9.07	0	0
	50	0.83	3.08	—	—	7.69	7.44	—	—	0	0.3
ст. 415, 0.5 км от устья р. Томпуды 55°07.095'/109°43.998'	110	2.09	1.55	—	—	7.54	7.90	11.11	10.15	0	0.7
	0.5	0.88	1.02	14.8	14.0	7.76	8.06	9.76 (97)	9.38 (91)	0	0.5
	10	—	1.07	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	—	1.17	—	—	7.75	8.04	10.21	9.53	0	0.3
ст. 416, 1.5 км от устья р. Горячий 55°21.525'/109°46.552'	50	—	1.01	—	—	7.71	7.94	—	—	0.2	0.3
	60	1.23	1.21	—	—	7.73	7.95	10.66	9.53	0	0.4
	0.5	0.73	0.94	15.6	13.0	7.85	7.96	9.76 (99)	9.53 (91)	0	0.4
	10	—	1.12	—	—	—	—	—	—	—	—
	25	0.84	1.06	—	—	7.77	7.90	9.76	9.53	0	0
ст. 417, 2.0 км от берега, Дагарская губа 55°39.668'/109°53.580'	50	0.99	1.44	—	—	7.76	7.89	—	—	0.4	0.3
	100	0.91	1.17	—	—	7.72	7.76	—	—	0	0.4
	150	0.88	1.13	—	—	7.77	7.84	10.66	9.99	0.5	0.4
	0.5	1.02	1.07	14.8	12.5	7.78	7.96	9.76 (97)	9.22 (87)	0	0.3
	10	—	1.14	—	—	—	—	—	—	—	—
	30	3.3	1.05	—	—	7.81	7.90	9.76	9.38	0.1	0

концентрациями метана по сравнению с остальными озерными котловинами.

При анализе распределения концентраций метана на мелководных участках с глубинами до 250 м установлено, что минимальные значения (в среднем 0.66 и 0.76 мкл/дм³ в сентябре соответственно 2016 и 2019 гг.) в оба периода отмечены в прибрежной зоне зал. Лиственничного, где находится исток Ангары (станции 301 и 307). Соотношения между средними концентрациями метана в прибрежных водах северной котловины, для которой характерны в среднем максимальные значения, и в прибрежных водах зал. Лиственничного,

характеризующихся минимальными значениями, составляли 1.61 и 1.97 в сентябре соответственно 2016 и 2019 гг.

Для большинства станций наблюдений характерен пик подповерхностного максимума концентраций метана на глубинах 25–50 м — в зоне термоклина (55.2% вертикальных профилей в сентябре 2016 г. и 66.7% — в сентябре 2019 г.), после чего его концентрации, как правило, снижаются, достигая минимальных значений либо в промежуточной водной толще, либо в придонных горизонтах воды (рис. 2), что согласуется с исследованиями [16, 42, 44]. Как отмечено в работе [16],

подобный тип вертикального распределения метана при низких его концентрациях (<0.01 мкл/дм³) широко распространен в океане, нередко он встречается и в морях [13, 27, 29, 35, 40], а при несколько более высоком содержании метана — в хорошо аэрированных озерах [32, 38, 43]. Считается [3, 10, 16, 42], что доминирующей причиной формирования подповерхностного максимума концентраций метана в насыщенной кислородом верхней толще воды Байкала, в которой сосредоточена основная масса фитопланктона, может быть его образование в анаэробных микроразнообразиях — кишечном тракте рыб и зоопланктона (в частности массового представителя байкальского зоопланктона — рачка эпишуры (*Epischura baicalensis* Sars.)) [16], а также в пеллетах и частицах детрита, содержащих метаногенную микрофлору. Кроме этого, источниками метана могут быть всплывающие со дна к поверхности озера газогидраты, разлагающиеся в приповерхностной водной толще [6], пузырьковый газ подводных сипов, а также перенос течениями и перераспределение по акватории более теплых и насыщенных метаном вод притоков [16].

Для некоторых станций, в основном расположенных в пределах мелководных участков северной котловины озера, максимум концентраций метана отмечен в поверхностных горизонтах — 0.5 и 10 м, что, вероятно, обусловлено непосредственным влиянием стока более насыщенных метаном вод Кичеры, Верхней Ангара и многочисленных мелких речек. Для отдельных станций (33, 61, 165, 170 и 180) наиболее высокие концентрации метана зафиксированы на глубине 100 м. Ряд станций характеризовался максимальными концентрациями метана в придонном горизонте воды, причем в сентябре 2016 г. количество таких станций было больше, чем в сентябре 2019 г. (в 2016 г. — это станции 70, 129, 139, 185 и 414; в 2019 г. — станции 413 и 415).

Наименьшая контрастность распределения концентраций метана по вертикали водной толщи характерна для глубоководных станций всех трех котловин. Соотношения между максимальными и минимальными концентрациями метана по вертикали водного столба на этих станциях в среднем не превышало 1.2–1.4, в то время как в мелководной зоне (зал. Лиственничный, Селенгинское мелководье и северная часть озера с глубинами до 250 м) это отношение было более высоким и составляло в среднем 1.5–1.7, достигая на отдельных станциях 2.5–3.2.

Анализ корреляционных зависимостей между исследуемыми гидрохимическими показателями во всей водной массе озера (рис. 3) выявил наличие относительно невысоких, но достоверных ($P < 0.01$) прямых связей концентраций метана с концентрациями $C_{\text{орг}}$ ($r = 0.27$ в 2016 г.) и $N_{\text{орг}}$ ($r =$

$= 0.35$ в 2016 г.) и обратных прямых связей с концентрациями O_2 ($r = 0.24$ в 2016 г. и $r = -0.33$ в 2019 г.). Если рассматривать тесноту корреляционной взаимосвязи в каждом отдельном горизонте вод (табл. 2), то можно отметить более значимые коэффициенты корреляции между концентрациями CH_4 и O_2 в зоне термоклина (25–50 м) ($r = -0.52$ в 2016 г. и $r = -0.63$ в 2019 г.), CH_4 и $C_{\text{орг}}$ в поверхностном слое ($r = 0.40$ в 2016 г. и $r = 0.25$ в 2019 г.) и CH_4 и $N_{\text{орг}}$ в придонном слое ($r = 0.50$ в 2019 г.). Полученные результаты согласуются с результатами исследований в ряде пресных озер [1–3, 22, 23], на примере которых показано значимое влияние концентраций растворенного O_2 и органического вещества на пространственно-временную изменчивость распределения метана в их водной толще и донных отложениях.

В табл. 3 обобщены опубликованные данные по концентрациям метана в воде оз. Байкал. Как видно из таблицы, его минимальные концентрации в воде, нередко ниже равновесных с атмосферой [7, 16], характерны для глубоководных открытых районов озера, что обусловлено преобладанием в их водной толще процессов окисления метана и его эмиссии в атмосферу над процессами, приводящими к поступлению газа в толщу воды. Максимальные концентрации метана приурочены к мелководным районам озера — к зонам впадения рек Фролиха, Верхняя Ангара, Кичера и Селенга, а также к станциям, расположенным в зоне подводного выпуска сточных вод г. Байкальска и Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК), закрытого в 2013 г. [3]. По мнению авторов [3], это связано с активным поступлением органического вещества в водную толщу и донные отложения таких зон и с его последующим разложением до субстратов (H_2 , CO_2 , ацетат и др.), используемых метаногенными археями как в донных отложениях, так и в анаэробных микронизмах, формируемых во взвешенных в воде органоминеральных частицах. Отдельно стоит выделить относительно невысокие концентрации (0.09–2.3 мкл/дм³) метана, наблюдаемые непосредственно над грязевыми вулканами Маленьким, “К2” и Большим и над нефтяным сипом “Горевой Утес”, расположенными в южной и средней частях озера, а также на участке струйных газовыделений в районе Селенгинского мелководья. Метановая разгрузка в виде струйных газовыделений, фиксируемых в тектонически ослабленных зонах и в областях дегазации над залежами углеводородов, в том числе газогидратов и грязевых вулканов [12, 30, 34], влияя на распределение метана в воде озера, локально повышает его концентрации в водной массе, окружающей газовую струю. Поступивший в воду метан как в результате диффузии, так и в составе пузырьков может частично или полностью раствориться и

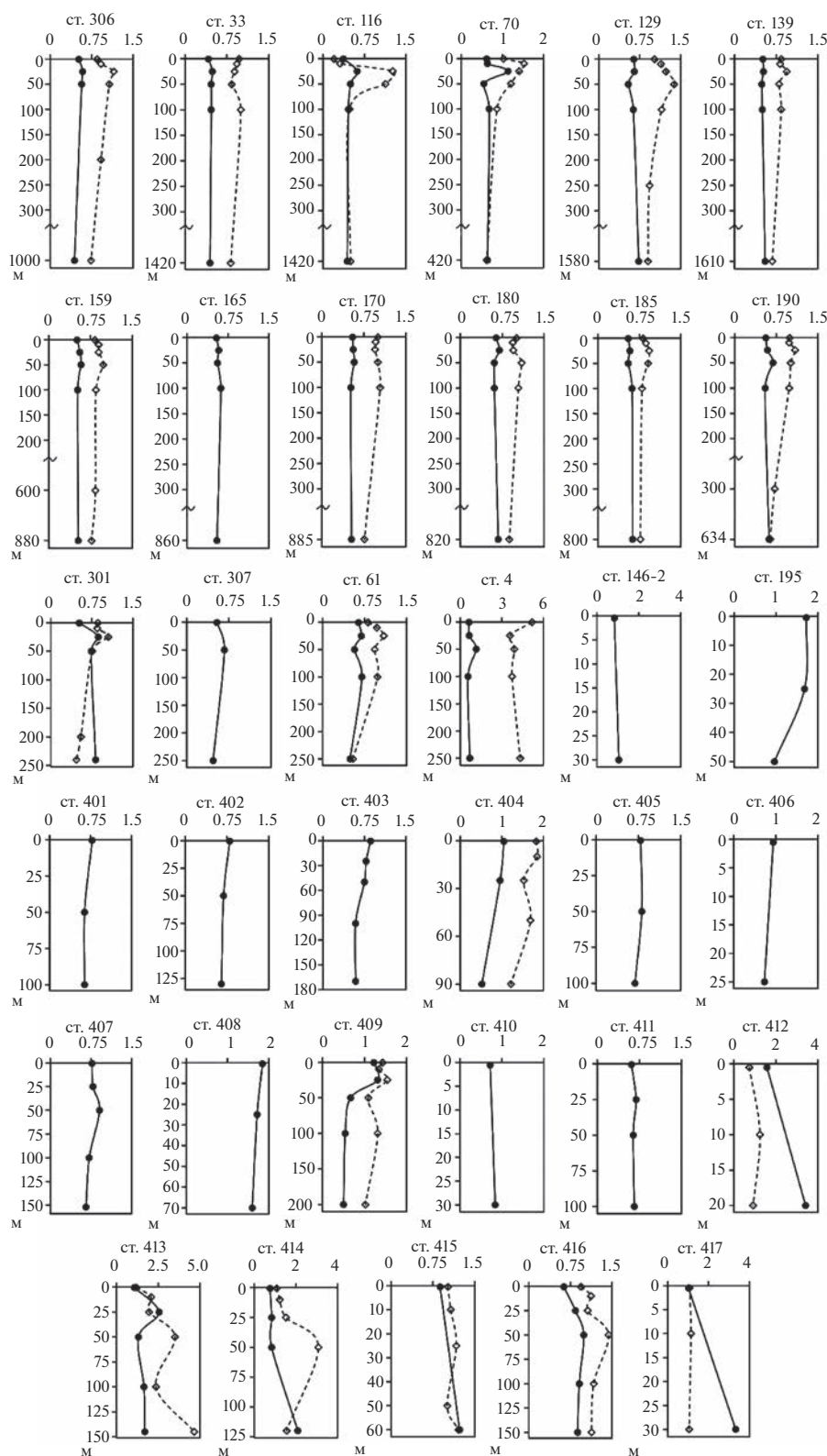


Рис. 2. Изменение концентраций метана по глубине водной толщи оз. Байкал: сплошная линия — сентябрь 2016 г., прерывистая линия — сентябрь 2019 г.

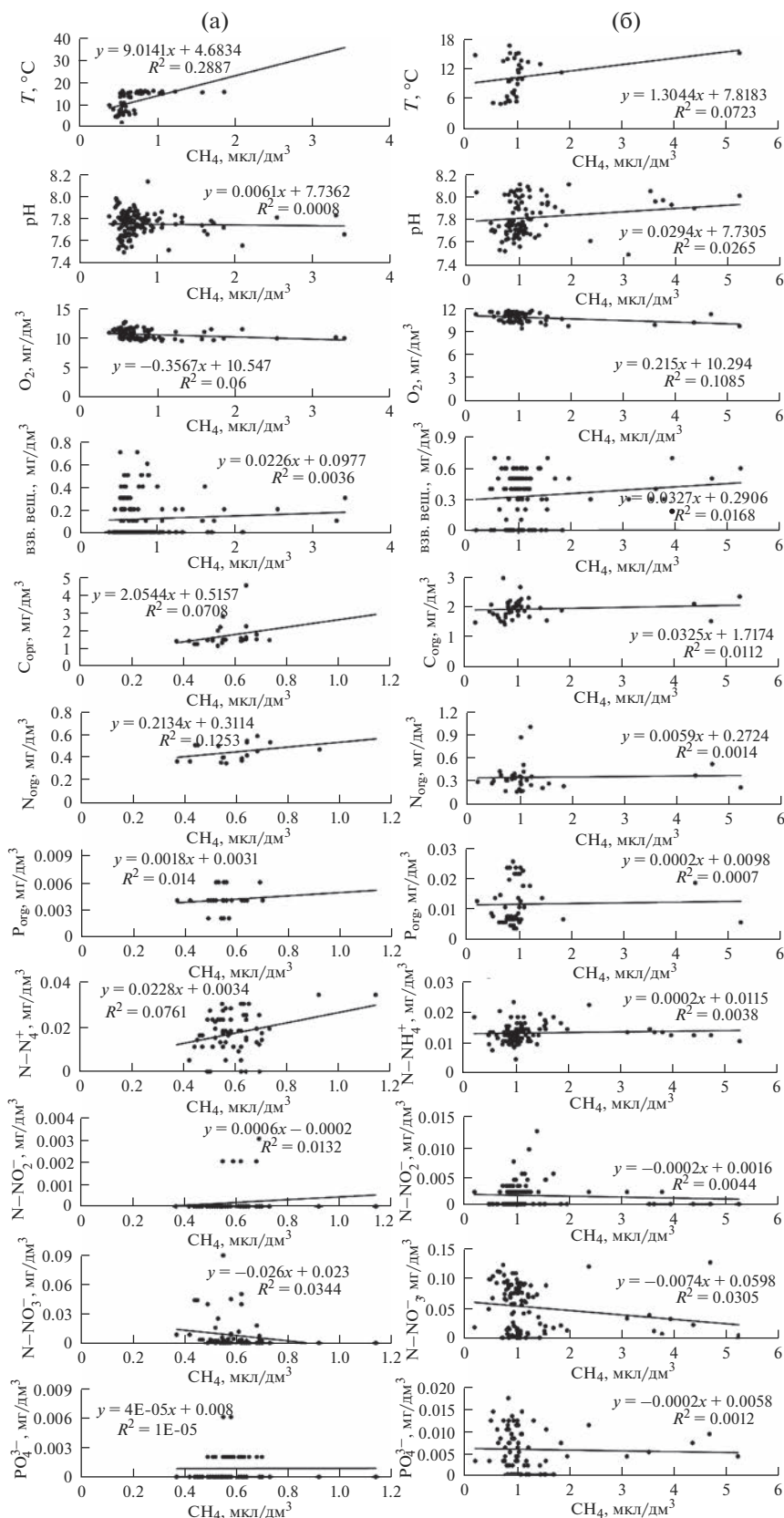


Рис. 3. Зависимости между концентрациями метана и ряда гидрохимических показателей в воде оз. Байкал по данным экспедиций в сентябре 2016 г. (а) и 2019 г. (б).

Таблица 2. Распределение значений коэффициентов корреляции r между концентрациями метана и исследуемыми гидрохимическими показателями в различных горизонтах воды оз. Байкал (в числителе — данные за 2016 г., в знаменателе — за 2019 г., в скобках — количество точек аппроксимации)

Пара гидрохимических показателей	Все горизонты	0 м	0–50 м	0–100 м	25–50 м	Придонный горизонт
CH ₄ –температура	0.54 (54)	0.49 (33)	0.52 (44)	0.52 (49)	0.49 (10)	0.21 (5)
	0.27 (36)	0.15 (20)	0.20 (28)	0.22 (32)	0.18 (8)	0.57 (4)
CH ₄ –рН	0.03 (135)	0 (33)	0 (89)	0.02 (113)	0.07 (50)	0.02 (33)
	0.16 (101)	–0.03 (23)	0.08 (66)	0.13 (81)	0.30 (40)	0.16 (22)
CH ₄ –взвешенные вещества	0.06 (135)	0.02 (33)	0.05 (90)	0.08 (114)	0.04 (51)	0.09 (33)
	0.13 (101)	0.25 (23)	0.21 (66)	0.20 (81)	0.16 (40)	0.08 (22)
CH ₄ –O ₂	–0.24 (88)	–0.41 (33)	–0.32 (63)	–0.30 (66)	–0.52 (24)	–0.19 (30)
	–0.33 (65)	–0.50 (23)	–0.38 (46)	–0.37 (48)	–0.63 (21)	–0.23 (20)
CH ₄ –NO ₂	0.11 (65)	0 (13)	0.12 (39)	0.10 (52)	0.09 (26)	0.18 (13)
	–0.07 (101)	–0.31 (23)	–0.15 (66)	–0.09 (81)	–0.15 (40)	–0.06 (22)
CH ₄ –NO ₃	–0.19 (65)	–0.82 (13)	–0.13 (39)	–0.09 (52)	–0.17 (26)	–0.54 (13)
	–0.17 (101)	–0.08 (23)	–0.14 (66)	–0.18 (81)	–0.39 (40)	–0.03 (22)
CH ₄ –NH ₄	0.28 (64)	0.21 (12)	0.22 (38)	0.19 (51)	0.23 (26)	0.60 (13)
	0.06 (101)	–0.20 (23)	–0.04 (66)	0.08 (81)	0.13 (40)	0.01 (22)
CH ₄ –PO ₄	0 (65)	–0.09 (13)	–0.06 (39)	–0.04 (52)	–0.14 (26)	0.20 (13)
	–0.03 (74)	0.02 (22)	–0.07 (48)	–0.04 (57)	–0.26 (22)	0.02 (22)
CH ₄ –C _{орг}	0.27 (25)	0.40 (13)	0.40 (13)	0.40 (13)	–(0)	0.14 (12)
	0.11 (44)	0.25 (22)	0.21 (25)	0.16 (27)	–(0)	0.01 (22)
CH ₄ –N _{орг}	0.35 (18)	0.59 (9)	0.59 (9)	0.59 (9)	–(0)	0.02 (9)
	0.12 (34)	–0.12 (17)	–0.11 (20)	–0.11 (22)	–(0)	0.50 (17)
CH ₄ –P _{орг}	0.12 (29)	0.04 (13)	0.20 (21)	0.12 (25)	0.42 (8)	0.24 (4)
	0.03 (51)	–0.18 (26)	–0.16 (32)	–0.13 (37)	0.19 (10)	0.33 (14)

окислиться в глубинных горизонтах, так и не достигнув поверхности. Степень растворения газа в воде зависит главным образом от глубины и температуры воды, а для пузырькового переноса — и от мощности выделения со дна пузырьков газа и от их размеров, а также от уровня насыщенности метаном водной толщи [37]. С изменением этих факторов будет меняться и доля метана, достигающего поверхностных слоев воды. Считается (например, в [41]), что для мелководных (<20 м) выходов пузырьков газа почти весь выделяющийся метан достигает раздела вода–атмосфера. Для более глубоководных (~50 м) выходов ≥50% газовых пузырьков достигают поверхностных горизонтов. Подводные струйные выходы газа, расположенные на глубинах 100–300 м и больше, практически не достигают поверхностных слоев воды [41], очевидно — как метан, диффузионно выделяющийся в водную толщу из глубоководных отложе-

ний. Поэтому источником метана, содержащегося в поверхностных горизонтах глубоководных районов озера, удаленных от зон впадения крупных рек, может быть атмосфера или непосредственная его генерация в анаэробных микроразонах, образующихся во взвешенных в воде остатках отмерших организмов, а также в пищеварительном тракте и фекальных выделениях (пеллетах) зоопланктона (например, [26, 28]). В первом случае концентрации метана в поверхностном горизонте воды будут минимальны, а во втором, наоборот, у поверхности воды или на некоторой глубине от нее будут наблюдаться повышенные его концентрации [3].

В последние годы в ряде работ [16, 31] на основании эпизодических исследований выделена проблема увеличения концентраций метана в воде глубоководных котловин озера по сравнению с его концентрациями в прошлом. В [16] высказано

Таблица 3. Обобщенные данные по концентрации метана (мкл/дм³) в воде различных районов оз. Байкал, по [3] с дополнениями (в числителе – пределы изменения, в знаменателе – среднее значение, в скобках – количество измерений, прочерк – нет данных)

Район отбора проб	Глубина до дна, м	Август 1994 г. [21, 24]	Июнь–август 1991–2000 гг. [8]	По [44]	Август–сентябрь 2002–2004 гг. [7]	Июль 2013 г. [10]	Сентябрь 2014 г. [3]	Сентябрь 2015 г. [3]	Сентябрь 2016 г. (данная работа)	Июль 2018 г. [16]	Сентябрь 2019 г. (данная работа)
Северная котловина озера											
Мелководная зона	0.5–220	–	–	–	–	–	0.2–13.9 4.8 (3)	0.3–2.0 0.9 (11)	0.50–3.41 1.07 (59)	–	0.73–4.65 1.50 (39)
Губа Фролиха	22–690	–	0.3–41.0 15.1 (3)	–	–	–	–	–	–	–	–
Глубоководная зона	634–885	–	0–3.0 1.1 (7)	–	0.03–0.09 (8)	–	–	–	0.51–0.70 0.58 (30)	–	0.64–1.1 0.91 (32)
Центральная котловина озера											
Глубоководная зона	1500–1610	–	–	–	0.01–0.12 (12)	–	<0.1–2.1 (2)	–	0.49–0.73 0.58 (10)	0.03–0.17 (19)	0.68–1.38 0.97 (13)
Баргузинский залив	30	–	–	–	–	–	–	–	0.83–1.05 (2)	–	–
Глубоководная зона, над грязевым вулканом “К-2”	890	–	–	–	–	0.15–0.66 (19)	–	–	–	–	–
Глубоководная зона, над нефтяным сипом “Горевой Утес”	855	–	–	–	–	0.09–1.0 (20)	–	–	–	–	–
Южная котловина озера											
Глубоководная зона	1000–1420	–	–	–	0.02–0.1 (11)	–	<0.1–1.1 (2)	–	0.44–0.62 0.51 (10)	0.03–0.19 (17)	0.20–1.26 0.83 (18)
Глубоководная зона, над грязевым вулканом “Большой”	1370	–	–	–	–	0.09–0.36 (21)	–	–	–	–	–
Зона впадения в озеро р. Селенга	25–50	–	–	–	–	–	<0.1–2.5 0.8 (4)	0.2–4.5 1.2 (5)	–	–	–
Селенгинское мелководье	250–421	–	–	–	–	–	–	–	0.49–1.14 0.68 (15)	–	0.54–5.19 1.93 (17)
Селенгинское мелководье, над грязевым вулканом Маленьким и струйными газоваделениями	–	–	–	1.3–2.3 (2)	–	–	–	–	–	–	–
Район БЦБК	15–250	0.3–2.9 1.6 (21)	–	–	–	–	0.8–2.1 1.4 (3)	0.3–0.7 0.4 (13)	–	–	–
Район Хара-Муринской банки	15–200	0.9–12.1 2.3 (10)	–	–	–	–	–	–	–	–	–
зал. Лиственничный, исток р. Ангара	240–250	–	–	–	–	–	–	–	0.47–0.67 0.58 (3)	–	0.47–1.05 0.76 (6)

мнение, что в результате подъема уровня Байкала (на 0.8–1.2 м, по разным данным) после пуска на Ангаре Иркутской ГЭС (возведена в 1950–1959 гг.) и заполнения Иркутского водохранилища, включающего в свой состав оз. Байкал, в толще донных отложений озера произошло расширение границ зоны термодинамической устойчивости метановых газогидратов. Это привело к дополнительному их образованию и, как следствие, к уменьшению внутривластового давления и интенсивности выходов метана в водную толщу. По оценкам авторов [16], в настоящее время переходный процесс, продолжавшийся примерно 50 лет, завершился и на нижней границе существования газовых гидратов начался рост внутривластового давления, который сопровождается увеличением интенсивности выделения метана из донных отложений и повышением его концентраций в водной толще. Отметим оригинальность этой гипотезы, однако, на взгляд авторов статьи, отсутствие регулярных многолетних исследований, проводимых в основные гидрологические сезоны, не позволяет статистически корректно выявить какие-либо четкие временные тренды в динамике концентраций метана в водной толще озера. Для обоснованно установленных изменений под воздействием природных и/или антропогенных факторов необходимо проведение систематических наблюдений за уровнем концентраций метана в различные гидрологические периоды, главным образом в глубоководной зоне озера, а также в зонах впадения крупных рек и в районе подводного выпуска сточных вод г. Байкальска и ныне закрытого БЦБК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Распределение растворенного метана по акватории и вертикали водного столба оз. Байкал, впадина которого в морфологическом отношении разделена поднятиями дна на три глубоководные котловины (южную, центральную и северную), происходит в условиях нормально аэрированного водоема, что обуславливает в целом относительно низкие концентрации метана в водной толще всех трех котловин.

Среди глубоководных котловин озера в оба периода экспедиционных исследований (сентябрь 2016 и 2019 гг.) в среднем максимальными концентрациями метана характеризовалась водная масса наиболее глубоководной центральной котловины (глубины до 1642 м). Сопоставимые концентрации отмечались в водной толще северной котловины (глубины до 904 м) и минимальные — в водах южной котловины озера (глубины до 1461 м). Несмотря на большие размеры озера и некоторую изолированность его котловин, в целом распределение концентраций метана по акватории и по вертикали водного столба в глубоководных зонах

Байкала отличалось слабой изменчивостью. Для вод мелководных участков (глубины до 250 м) минимальные концентрации метана отмечались в прибрежной зоне зал. Лиственничного, где берет начало р. Ангара, а максимальные его концентрации — в воде у прибрежных станций северной части озера, куда впадают воды рек Верхняя Ангара, Кичера и других более мелких рек, а также у станций профиля, проложенного вдоль устьевой зоны р. Селенги в пределах Селенгинского мелководья.

Для большинства как глубоководных, так и мелководных станций наблюдался пик подповерхностного максимума концентраций метана в зоне термоклина, расположенного в период исследований на глубинах 25–50 м, после чего его концентрации, как правило, снижались, достигая минимальных значений в промежуточных или придонных горизонтах воды. Главной причиной формирования подповерхностного максимума исследуемого газа в насыщенной кислородом верхней водной толще Байкала, вероятно, была его генерация в анаэробных микроразнообразиях, образующихся во взвешенных в воде частицах детрита, а также в пищеварительном тракте и фекальных выделениях (пеллетах) зоопланктона. Воды мелководных участков, помимо более высоких концентраций метана по сравнению с глубоководной зоной котловин, отличались также и большей контрастностью его распределения по вертикали водной толщи, что обусловлено наличием дополнительных источников генерации и поступления метана в воду. Таким источником, кроме характерной и для глубоководных участков непосредственной генерации метана в донных отложениях и в анаэробных микроразнообразиях водной толщи, может быть также поступление в прибрежную зону более насыщенных растворенным метаном речных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А.* Особенности распределения содержания метана в прибрежных участках Петрозаводской губы Онежского озера // *Вод. ресурсы.* 2015. Т. 42. № 3. С. 288–297.
2. *Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А.* Факторы формирования концентраций метана в водных экосистемах. Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во Южного федерального ун-та, 2021. 366 с.
3. *Гарькуша Д.Н., Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Андреев Ю.А., Михайленко О.А.* Метан в воде и донных отложениях озера Байкал // *Вод. ресурсы.* 2019. Т. 46. № 5. С. 511–522.
4. *Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д.* Геоэкологические исследования Байкала // *ДАН СССР.* 1990. Т. 310. № 6. С. 1442–1446.
5. Государственный доклад “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2017 году”. Иркутск: КЦ Эксперт, 2018. 340 с.

6. Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Козлов В.В., Цветова Е.А., Гнатовский Р.Ю., Блинов В.В., Асламов И.А., Кучер К.М., Иванов В.Г., Жданов А.А. Кольцевые структуры на ледовом покрове озера Байкал: анализ экспериментальных данных и математическое моделирование // Геология и геофизика. 2018. Т. 59. № 11. С. 1890–1903.
7. Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Обжиров А.И., Вережагина О.Ф., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А. Окисление метана в водной толще озера Байкал // ДАН. 2013. Т. 451. № 3. С. 332–335.
8. Дагурова О.П., Намсараев Б.Б., Козырева Л.П., Земская Т.И., Дулов Л.Е. Бактериальные процессы цикла метана в донных осадках озера Байкал // Микробиология. 2004. Т. 73. № 2. С. 248–257.
9. Жижченко Б.П. Углеводородные газы. М.: Недра, 1984. 112 с.
10. Захаренко А.С., Пименов Н.В., Иванов В.Г., Земская Т.И. Окисление метана в водной толще районов газо- и нефтепроявлений Среднего и Южного Байкала // Микробиология. 2015. Т. 84. № 1. С. 98–106.
11. Кипрушина К.Н. Сезонная динамика вертикального распределения зоопланктона открытой части Южного Байкала (район Больших Котов) // Изв. Иркутского гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2009. Т. 2. № 1. С. 39–44.
12. Кузьмин М.М., Калмычков Г.В., Гелетий В.Ф., Гнилуши В.А., Горелад А.В., Хахаев Б.Н., Певзнер Л.А., Каваи Л., Йошида Н., Лучков А.Д., Пономарчук В.А., Конторович А.Э., Бажин Н.М., Махов Г.А., Дядин Ю.А., Кузнецов Ф.А., Ларионов Э.Г., Манаков А.Ю., Смоляков Б.С., Мандельбаум М.М., Железняков Н.К. Первая находка газогидратов в осадочной толще озера Байкал // ДАН. 1998. Т. 362. № 4. С. 541–543.
13. Леин А.Ю., Иванов М.В. Биогеохимический цикл метана в океане. М.: Наука, 2009. 576 с.
14. Лут Б.Ф. Геоморфология Прибайкалья и впадины озера Байкал. Автореф. дис. ... докт. геогр. наук. Новосибирск: Ин-т геологии и геофизики СО АН СССР, 1988. 32 с.
15. Макаров М.М. Пузырьковые выходы метана из донных отложений озера Байкал. Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. Иркутск: ТОИ ДВО РАН, 2016. 24 с.
16. Мизандронцев И.Б., Козлов В.В., Иванов В.Г., Кучер К.М., Корнева Е.С., Гранин Н.Г. Вертикальное распределение метана в водной толще Байкала // Вод. ресурсы. 2020. Т. 47. № 1. С. 12–85.
17. Намсараев Б.Б., Дулов Л.Е., Соколова Е.Н., Земская Т.И. Бактериальное образование метана в донных осадках озера Байкал // Микробиология. 1995. Т. 64. № 3. С. 411–417.
18. Пестунов Д.А., Домышева В.М., Иванов В.Г., Шамрин А.М., Панченко М.В. Пространственное распределение направления потоков CO₂ и CH₄ по акватории озера Байкал (кругобайкальская экспедиция, июнь 2013 г.) // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 9. С. 792–800.
19. РД 52.24.512–2012 Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Росгидромет, Гидрохим. ин-т, 2012. 23 с.
20. Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши. Ч. 1 / Под ред. Л.В. Боевой. Ростов-на-Дону: НОК, 2009. 1037 с.
21. Фёдоров Ю.А., Никаноров А.М., Тамбиева Н.С. Первые данные о распределении содержания биогенного метана в воде и донных отложениях оз. Байкал // ДАН. 1997. Т. 353. № 3. С. 394–397.
22. Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. Влияние природных и антропогенных факторов и процессов на распределение концентрации метана в воде и донных отложениях Ладожского озера // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2006. № 5. С. 412–424.
23. Фёдоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. Метан как показатель экологического состояния пресноводных водоемов (на примере озер Валдай и Ужин) // Метеорология и гидрология. 2004. № 6. С. 88–96.
24. Фёдоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: Центр “Истина” МО РФ, 1999. 370 с.
25. Шимараев М.Н., Троицкая Е.С., Гнатовский Р.Ю. Изменение температуры глубинных вод озера Байкал в 1972–2007 годы // География и природ. ресурсы. 2009. № 3. С. 68–76.
26. Bianchi M., Marty D., Teyssie J.-L., Fowler S.W. Strictly aerobic and anaerobic bacteria associated with sinking particulate matter and zooplankton fecal pellets // Mar. Ecol. Progress Ser. 1992. V. 88. P. 55–60.
27. Conrad R. The Global methane cycle: Recent advances in understanding the microbial processes involved // Environ. Microbiol. 2009. Rep. 1. P. 285–292.
28. Cynar F.J., Yayanos A.A. Enrichment and characterization of methanogenic bacterium from the oxic upper layer of the ocean // Curr. Microbiol. 1991. V. 23. P. 89–96.
29. Damm E., Helmke E., Thoms S., Schauer U., Nothig E., Bakker K., Kiene R.P. Methane production in aerobic surface water in central Arctic Ocean // Biogeosci. 2010. V. 7. P. 1099–1108.
30. Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatovsky R.Y. Gas seeps in Lake Baikal-detection, distribution, and implications for water column mixing // Geo-Mar. Lett. 2010. V. 30 (3, 4). P. 399–409.
31. Granin N.G., Radzyminovich N.A., Granina L.Z., Blinov V.V., Gnatovsky R.Yu. Freshening of near-bottom waters in Lake Baikal triggered by the Mw6. 2 Kultuk earthquake of August 2008 // Geo-Mar. Lett. 2012. V. 32. № 5. P. 453–464.
32. Grossart H.-P., Frindt K., Dziallas C. et al. Microbial methane production in oxygenated water column of an oligotrophic lake // Proc. Natl. Acad. Sci. 2011. V. 108. P. 19657–19661.
33. Izmet'eva L.R., Moore M.V., Hampton S.E., Ferwerda C.J., Gray D.K., Woo K.H. Pislegina H.V., Krashchuk L.S., Shimaraeva S.V., Silow E.A. Lake-wide physical and biological trends associated with warming in Lake Baikal // J. Great Lakes Res. 2016. V. 42. P. 6–17.

34. Kadnikov V.V., Mardanov A.V., Beletsky A.V., Shubenkova O.V., Pogodaeva T.V., Zemskaya T.I., Ravin N.V., Skryabin K.G. Microbial community structure in methane hydrate-bearing sediments of freshwater Lake Baikal // Federation Eur. Microbiol. Soc. Microbiol. Ecol. 2012. V. 79. P. 348–358.
35. Karl D.N., Beversdorf L., Bjorkman K.M., Church M.J., Martinez A., Delong E.F. Aerobic production of methane in the sea // Nat. Geosci. 2008. V. 1. P. 473–478.
36. Khlystov O., De Batist M., Shoji H., Hachikubo A., Nishio S., Naudts L., Poort J., Khabuev A., Belousov O., Manakov A., Kalmychkov G. Gas hydrate of Lake Baikal: Discovery and varieties // Asian Earth Sci. 2013. V. 62. № 1. P. 162–166.
37. Leifer I., Boles J.R., Luyendyk B.P., Clark J.F. Transient discharges from marine hydrocarbon seeps: spatial and temporal variability // Environ. Geol. 2004. V. 46 (8). P. 1038–1052.
38. Murase J., Sugimoto A. Inhibitory effect of light on methane oxidation in pelagic water column of a mesotrophic lake (Lake Biwa, Japan) // Limnol. Oceanogr. 2005. V. 50. P. 1339–1343.
39. Potyomkina T.G., Baryshev V.B., Grachev A.M., Potyomkin V.L. Chemical composition of suspension in water body of Lake Baikal // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A. 1998. V. 405. P. 543–545.
40. Reeburgh W.S. Oceanic methane biogeochemistry // Chem. Rev. 2007. V. 107. P. 486–513.
41. Schmale O., Greinert J., Rehder G. Methane emission from high-intensity marine gas seeps in the Black Sea into the atmosphere // Geophys. Res. Lett. 2005. V. 32 (7). L07609.
42. Schmid M., De Batist M., Granin N.G., Kapitanov V.A., McGinnis D.F., Mizandrontsev I.B., Obzhairov A.I., Wiest A. Sources and sinks of methane in Lake Baikal: A synthesis of measurements and modeling // Limnol. Oceanogr. 2007. V. 52 (5). P. 1824–1837.
43. Tang K.W., McGinnis D.F., Frindte K., Bruchert V., Grosart H.-P. Paradox reconsidered: Methane oversaturation in well-oxygenated lake waters // Limnol. Oceanogr. 2014. V. 59 (1). P. 275–284.
44. Zemskaya T., Egorov A., Khlystov O., Shubenkova O., Namsaraev B., Chernitsina S., Dagurova O., Kalmychkov G., Grachev M. Biogeochemical cycles of methane in Lake Baikal // Geoph. Res. Abstr. 2005. V. 7. 03994.