

МЕТАН В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА БАЙКАЛ¹

© 2019 г. Д. Н. Гарькуша^{1,*}, Ю. А. Фёдоров¹, Н. С. Тамбиева²,
Ю. А. Андреев², О. А. Михайленко²

¹Институт наук о Земле Южного федерального университета
Россия 344090 Ростов-на-Дону
²Гидрохимический институт
Россия 344090 Ростов-на-Дону
*e-mail: gardim1@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.03.2017 г.

После доработки 28.09.2017 г.

Принята к публикации 29.09.2017 г.

Проанализированы результаты распределения концентраций метана в различных районах оз. Байкал, полученные в 2014 и 2015 гг. В периоды экспедиционных исследований концентрация метана в воде и донных отложениях озера соответственно варьировала в пределах от <0.1 до 13.9 мкл/дм³ (в среднем 0.7 мкл/дм³) и от <0.01 до 3.69 мкг/г сухого осадка (в среднем 0.34 мкг/г). Максимальные концентрации метана в воде и донных отложениях озера были характерны для северного района, куда впадают воды рек Верхняя Ангара, Кичера, и отдельных станций профиля, проложенного вдоль устьевой зоны р. Селенги, а также станций, расположенных в зоне подводного выпуска сточных вод г. Байкальска и Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, закрытого в 2013 г. Существование повышенных или пониженных концентраций метана в изученных верхних горизонтах отложений оз. Байкал обусловлено наряду с различиями в мощности антропогенного влияния изменчивостью условий осадконакопления, определяющих гранулометрический состав и содержание органического вещества и, как следствие, интенсивность метаногенеза.

Ключевые слова: водная толща, донные отложения, гранулометрический состав, метан, органический углерод, распределение.

DOI: 10.31857/S0321-0596465511-522

ВВЕДЕНИЕ

Пресное оз. Байкал, включенное в 1996 г. в список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО, – одно из самых грандиозных геологических образований на Земном шаре. Низкая минерализация (~100 мг/дм³) и специфический состав воды озера, своеобразие животного и растительного мира, высокое содержание молекулярного кислорода, несмотря на большие глубины (максимум 1637 м), вызывают постоянный интерес ученых всего мира. Байкал расположен в южной части Восточной Сибири между 51° и 56° с.ш. и между 103° и 110° в.д. Впадина озера окружена со всех сторон цепями гор, которые вплотную подходят к берегам, прерываясь лишь в местах впадения крупных притоков.

В число уникальных особенностей Байкала входят найденные в донных осадках (ДО) газовые гидраты, а также многочисленные пузырьковые (струйные) выходы газа из дна озера [9, 27, 29]. На сегодняшний день обнаружено более 100 мелководных струйных выходов газа на глубине, не превышающей глубину устойчивости газовых гидратов (380 м) [27], и более двух десятков глубоководных струйных выходов газа. Как правило, метановые разгрузки фиксируют тектонически ослабленные зоны и области дегазации над залежами углеводородов, в том числе метановых газогидратов [13, 27, 28], а также сопровождают генерацию биогенного метана в ДО. В последние годы в ряде публикаций обсуждается проблема увеличения содержания метана в воде глубоководных районов озера, одной из причин которого называют разложение газовых гидратов, вызванное снижением уровня озера и связанным с ним опусканием зоны их устойчивости [6].

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки (проект № 5.5791.2017/6.7) и ЮФУ (внутренний грант № 5.5795.2017/8.9).

Первые сведения по распределению концентраций метана в воде и ДО оз. Байкал получены при проведении экспедиционных исследований в летний период 1988 и 1994 гг. [20, 21]. Примерно в то же время были впервые изучены микробиологические процессы цикла метана в отложениях озера [4, 14]. На настоящий момент опубликован ряд работ, посвященных изучению распределения метана в воде и ДО озера [7, 8, 34, 35], однако они имеют эпизодический характер и, как правило, ограничены одним, реже двумя районами. Уже в ходе первых исследований было установлено, что, несмотря на относительно низкие значения температуры водной толщи и ее хорошую аэрацию, обуславливающую высокое содержание кислорода, процесс метаногенеза в ДО озера тем не менее протекает [14].

В данной работе, помимо обобщения ранее опубликованных материалов, рассматриваются результаты изучения распределения концентраций метана в воде и ДО оз. Байкал в ходе двух экспедиций, охвативших несколько районов озера. Актуальность работы обусловлена также и тем, что информация о том, как меняются концентрации метана в ДО южной части озера, позволит судить о восстановлении экосистемы озера [3, 22–24] после закрытия в 2013 г. проработавшего почти 50 лет Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК), влияние которого может сказываться еще долгие годы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В сентябре 2014 и 2015 гг., то есть спустя 20 лет с момента последней экспедиции [21], авторами проведены работы, в ходе которых в различных районах оз. Байкал были отобраны пробы воды и ДО для определения концентраций метана в ДО (рис. 1). Помимо метана, в 2015 г. в отобранных ДО проведено определение $S_{\text{орг}}$ и гранулометрического состава для выявления их роли в пространственном распределении определяемых показателей.

Повышенное внимание было сосредоточено на северном районе озера, куда впадает большое количество рек, на зоне воздействия БЦБК, а также зоне впадения в озеро р. Селенги, сток которой составляет ~50% поступления в озеро речных вод. Отбор проб проводился с борта НИС «Персей» (Иркутское УГМС Росгидромета). На всех станциях воду отбирали батометром «Gidrobios» из поверхностного горизонта, за ис-

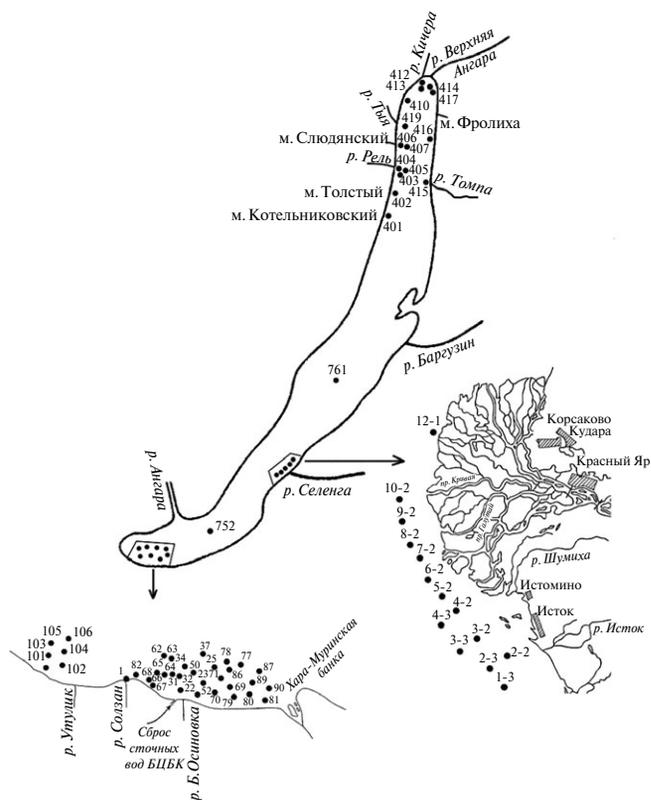


Рис. 1. Картограмма расположения станций отбора проб, оз. Байкал.

ключением глубоководных участков (станции 752 и 761, глубины 1400–1500 м), где в 2014 г. отбор проб воды проведен и в придонном слое. ДО (верхний горизонт до 6–7 см) отбирали дночерпателем Петерсена на глубинах от 14 до 250 м.

Отбор проб и последующее определение метана проводили согласно аттестованным методикам анализа [17, 18]. Анализ выполняли на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Одновременно с отбором проб в заранее взвешенные и пронумерованные бюксы отбирали навеску ДО для определения массовой доли сухого осадка.

Содержание $S_{\text{орг}}$ определялось методом мокрого «сжигания» (по Тюрину) — окислением органических веществ избытком бихромата калия в сильноокислой среде с последующим титрованием остатка солью Мора. Анализ гранулометрического состава ДО проводился на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SALD-2300 («Shimadzu», Япония). Название литологических типов ДО дано в соответствии с номенклатурой В.Т. Фролова [25].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация метана в воде оз. Байкал в 2014 и 2015 гг. варьировала в пределах от <0.1 до 13.9 (в среднем 0.8) и от 0.2 до 4.5 (в среднем 0.7) мкл/дм³; в ДО – от 0.03 до 3.69 (в среднем 0.66) и от <0.01 до 1.81 (в среднем 0.21) мкг/г сухого осадка (с.о.) соответственно (табл. 1).

В период исследований, как и в предыдущие годы наблюдений [21, 24], максимальные концентрации метана в воде (1.5–13.9 мкл/дм³) и ДО (1.81–3.69 мкг/г с.о.) были характерны для северного района озера, куда впадают воды рек Верхняя Ангара и Кичера. Относительно высокие концентрации метана (1.85–2.69 мкг/г с.о.) определены также в ДО отдельных станций (2-3

Таблица 1. Концентрации метана в поверхностном слое воды и ДО в период проведения исследований 5–25 сентября 2014 г., в знаменателе – 3–20 сентября 2015 г.; в скобках – концентрации метана в придонном слое воды; прочерк – измерения не проводились)

№№ станций и их местоположение	Координаты, с.ш./в.д.	Глубина, м	СН ₄ в воде, мкл/дм ³	СН ₄ в ДО, мкг/г с.о.	Цвет и литологический тип ДО
Северный район оз. Байкал					
ст. 401, 0.5 км от берега, район мыса Котельниковский	55°04'32.90"/ 109°06'25.90"	130	- 0.3	- <0.01	Коричнево-рыжий алеврит глинисто-песчанистый
ст. 402, 0.5 км от берега, район мыса Толстой	55°08'16.06"/ 109°09'11.58"	180	-	- <0.01	Серо-коричневый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 403, 0.5 км от устья правого рукава р. Рель	55°20'15.21"/ 109°12'04.06"	180	- 0.7	- 0.03	Серо-голубой алеврит глинисто-песчанистый
ст. 404, 0.5 км от устья левого рукава р. Рель	55°21'15.24"/ 109°12'27.28"	80	- 0.9	- <0.01	Серый алеврит сильнопесчанистый
ст. 405, 1.0 км от устья левого рукава р. Рель	55°21'09.41"/ 109°12'54.79"	115	-	- 0.64	* Серый алеврит сильнопесчанистый
ст. 406, 0.2 км от устья р. Слюдянка	55°30'47.80"/ 109°12'37.50"	40	- 1.5	- 0.53	Коричневый песок сильноалевритистый
ст. 407, 0.6 км от устья р. Слюдянка	55°30'51.40"/ 109°12'59.60"	155	-	- 0.07	Коричневый алеврит сильнопесчанистый
ст. 409, 1.5 км от устья р. Тья	55°35'51.70"/ 109°22'32.30"	210	- 2.0	- 0.14	* Серо-голубой алеврит глинистый
ст. 410, 1.0 км от устья р. Чуна	55°42'20.40"/ 109°29'23.40"	32	0.2 1.8	0.90 0.03	Коричневый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 412, 0.5 км от устья р. Кичера	55°46'00.18"/ 109°37'03.40"	45	0.4 1.5	0.97 1.81	Черный песок сильноалевритистый
ст. 413, 1.0 км от устья р. Кичера	55°45'37.20"/ 109°36'58.40"	155	-	- 0.39	Черный алеврит глинисто-песчанистый
ст. 414а, 0.5 км от устья р. Верхняя Ангара	55°41'59.90"/ 109°51'59.90"	58	13.9 -	3.69 -	Темно-серый алеврит глинистый
ст. 414б, 1.0 км от устья р. Верхняя Ангара	55°41'38.70"/ 109°51'48.00"	110	- 0.4	- 1.05	Коричневый алеврит глинистый
ст. 415, 0.5 км от устья р. Томпуда	55°07'05.70"/ 109°43'59.90"	90	- 0.4	0.04 0.17	Серо-голубой алеврит сильнопесчанистый
ст. 416, 1.5 км от устья р. Горячий	55°21'52.50"/ 109°46'55.10"	170	- 0.3	0.03 <0.01	Коричневый алеврит глинистый
ст. 417, 2.0 км от берега, район Дагарской губы	55°39'40.10"/ 109°53'34.80"	35	- 0.4	- <0.01	Коричневый песок слабоалевритистый

Таблица 1. Продолжение

№№ станций и их местоположение	Координаты, с.ш./в.д.	Глубина, м	СН ₄ в воде, мкл/дм ³	СН ₄ в ДО, мкг/г с.о.	Цвет и литологический тип ДО
Глубоководный район оз. Байкал					
ст. 752	51°43'32.90"/ 105°03'31.00"	1400	<0.1 (1.1) -	-	-
ст. 761	52°57'27.50"/ 107°28'28.80"	1500	<0.1 (2.1) -	-	-
Район впадения р. Селенги в оз. Байкал					
ст. 1-3	52°10'00.00"/ 106°06'00.00"	50	<0.1 -	0.03 -	* Серо-голубой алеврит глинистый
ст. 2-2	52°10'26.28"/ 106°09'38.46"	14	- 2.9	- 0.03	Коричневый алеврит сильнопесчанистый
ст. 2-3	52°11'27.10"/ 106°07'24.10"	50	<0.1 -	2.69 -	* Серо-голубой алеврит глинистый
ст. 3-2	52°12'30.72"/ 106°08'58.70"	18	-	- 0.05	Коричневая песчано-алевролитовая неотсортированная порода
ст. 3-3	52°13'08.28"/ 106°06'37.50"	45	0.2 0.2	0.48 0.57	Коричневый алеврит глинистый
ст. 4-2	52°14'00.72"/ 106°09'42.36"	20	- 0.8	- 0.09	* Серый алеврит глинистый
ст. 4-3	52°14'14.40"/ 106°08'00.72"	45	-	1.85 0.83	Черно-коричневый алеврит глинистый
ст. 5-2	52°15'11.84"/ 106°11'22.94"	19	-	0.78 0.17	* Серо-коричневый алеврит песчано-глинистый
ст. 6-2	52°16'54.60"/ 106°11'56.16"	22	- 1.0	0.22 0.17	* Серо-зеленый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 7-2	52°18'51.39"/ 106°13'27.43"	23	-	0.08 <0.01	* Серо-коричневый песок глинисто-алевролитистый
ст. 8-2	52°20'30.60"/ 106°15'41.50"	20	-	0.68 0.02	* Коричнево-зеленый песок слабоалевролитистый
ст. 9-2	52°21'51.84"/ 106°19'16.20"	18	-	- 0.02	Серо-коричневый песок сильноалевролитистый
ст. 10-2	52°24'02.40"/ 106°14'53.30"	20	2.5 4.5	0.03 0.04	Серо-коричневый песок слабоалевролитистый
ст. 12-1	52°25'03.00"/ 106°36'06.00"	20	-	0.08 0.04	Коричневый песок слабоалевролитистый
Южный район оз. Байкал, зона влияния БЦБК					
ст. 22	51°30'09.40"/ 104°14'44.10"	22	- 0.4	-	Серо-коричневый песок алевритистый
ст. 23	51°30'34.13"/ 104°15'05.74"	100	- 0.3	0.27 0.06	Серо-голубой плотный алеврит сильнопесчанистый
ст. 25	51°30'53.48"/ 104°15'35.04"	210	- 0.3	- 1.24	Серо-коричневый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 31	51°30'51.12"/ 104°14'02.35"	170	-	- 0.33	* Серо-голубой алеврит глинистый

Таблица 1. Продолжение

№№ станций и их местоположение	Координаты, с.ш./в.д.	Глубина, м	CH ₄ в воде, мкл/дм ³	CH ₄ в ДО, мкг/г с.о.	Цвет и литологический тип ДО
ст. 32	51°30'41.07"/ 104°14'27.88"	90	-	- <0.01	* Серый алевроит сильнопесчанистый
ст. 34	51°31'13.34"/ 104°14'33.42"	235 200	- 0.3	0.15 0.03	Коричневый алевроит глинисто-песчанистый
ст. 37	51°31'15.50"/ 104°15'09.31"	247	-	- 0.34	Коричневый алевроит глинисто-песчанистый
ст. 50	51°30'54.63"/ 104°14'50.04"	190	-	- 0.58	* Серо-голубой алевроит глинистый
ст. 52	51°30'04.08"/ 104°15'09.60"	25	0.8 -	0.04 0.02	Серо-коричневый песок алевроитистый
ст. 62	51°31'21.31"/ 104°13'38.24"	170	-	- 0.19	* Серо-синий алевроит глинистый
ст. 63	51°31'22.56"/ 104°14'15.11"	250	-	- 0.21	* Серо-голубой алевроит глинистый
ст. 64	51°30'53.80"/ 104°13'35.66"	150 135	- 0.6	0.21 0.06	Серо-голубой алевроит глинистый
ст. 65	51°30'59.57"/ 104°13'10.28"	115	- 0.5	- 0.07	Серо-зеленый алевроит песчанистый
ст. 66	51°30'36.03"/ 104°12'36.14"	20	-	- 0.02	Серо-коричневый алевроит сильнопесчанистый
ст. 67	51°30'28.62"/ 104°12'52.68"	15	-	- 0.02	Серо-коричневый алевроит сильнопесчанистый
ст. 68	51°30'57.06"/ 104°12'40.62"	90	1.2 -	0.16 0.02	Серо-голубой алевроит сильнопесчанистый
ст. 69	51°30'33.31"/ 104°16'34.40"	200	-	0.47 0.11	* Серо-голубой алевроит песчано-глинистый
ст. 70а	51°29'41.16"/ 104°16'04.32"	61	-	0.14 -	Темно-серый алевроит глинисто-песчанистый
ст. 70б	51°29'45.89"/ 104°16'07.28"	100	-	- 0.07	Серый алевроит глинисто- песчанистый
ст. 71	51°30'42.63"/ 104°15'51.65"	160	-	- 0.08	Серо-черный алевроит глинисто-песчанистый
ст. 77	51°30'56.30"/ 104°16'47.03"	250	-	- 0.14	Серый алевроит глинисто- песчанистый
ст. 78	51°31'07.66"/ 104°16'05.16"	240	-	1.87 -	Серо-черный алевроит глинисто-песчанистый
ст. 79	51°29'46.81"/ 104°16'35.82"	92	-	- 0.05	Серый алевроит сильнопесчанистый
ст. 80	51°29'54.41"/ 104°17'11.64"	118	- 0.4	- 0.16	* Серый алевроит глинисто- песчанистый
ст. 81	51°29'35.25"/ 104°17'30.35"	62	-	- 0.02	Серо-коричневый песок алевроитистый
ст. 82	51°31'48.60"/ 104°11'15.31"	38	- 0.7	- <0.01	Серо-коричневый песок сильноалевроитистый

Таблица 1. Окончание

№№ станций и их местоположение	Координаты, с.ш./в.д.	Глубина, м	СН ₄ в воде, мкл/дм ³	СН ₄ в ДО, мкг/г с.о.	Цвет и литологический тип ДО
ст. 86	51°30'50.45"/ 104°16'17.58"	250	— 0.4	— 0.88	Серо-синий алеврит глинисто-песчанистый
ст. 87	51°30'37.54"/ 104°17'42.42"	215	— -	— 0.50	Серо-голубой алеврит глинисто-песчанистый
ст. 89	51°30'15.46"/ 104°17'22.58"	165	— -	— 0.19	Серо-голубой алеврит глинисто-песчанистый
ст. 90	51°29'50.16"/ 104°17'41.39"	115	— 0.3	— <0.01	Серо-голубой песок сильноалевритистый
Южный район оз. Байкал, фоновые участки					
ст. 101	51°36'38.40"/ 103°54'43.60"	60	— -	— <0.01	Коричнево-черный алеврит сильнопесчанистый
ст. 102	51°36'25.60"/ 103°55'40.30"	65	— 0.4	— <0.01	Коричневый плотный алеврит сильнопесчанистый
ст. 103	51°37'18.40"/ 103°55'00.20"	120	— 0.4	— 0.07	Серо-голубой алеврит песчанистый
ст. 104	51°37'02.35"/ 103°55'56.96"	120	— -	— 0.04	Серо-зеленый алеврит сильнопесчанистый
ст. 105	51°38'10.69"/ 103°55'29.89"	175	— -	— 0.05	Серый алеврит глинисто- песчанистый
ст. 106	51°37'49.01"/ 103°56'29.20"	180	2.1 0.4	0.03 <0.01	Коричневый алеврит сильнопесчанистый

* Сверху — слой желтовато-серого наилка.

и 4-3) профиля, проложенного вдоль устьевой зоны р. Селенги. Несмотря на то, что в 2014 г. при отборе проб на станции 2-3 в 5–15 м от корпуса судна наблюдались несколько серий линейного выхода газа, и в целом к зоне впадения р. Селенги приурочено > 90% всех мелководных струйных газовыделений в озере [27], концентрации метана в воде Селенгинского мелководья, за исключением станции 10-2, расположенной в зоне впадения протоки Кривая, были относительно низкими (<0.1–2.9 мкл/дм³) и сопоставимы с его концентрациями (<0.1–2.1 мкл/дм³) в поверхностных и придонных горизонтах воды открытых районов озера с глубинами от 1400 до 1500 м. По всей видимости, повышенные концентрации метана (2.5–4.5 мкл/дм³) в поверхностном слое воды отдельных станций (2-2 и 10-2) Селенгинского мелководья связаны с непосредственным влиянием стока р. Селенги, концентрация метана в воде которой, по данным [35], составляет 5–20 мкл/дм³.

Концентрации метана в воде и ДО большинства станций, расположенных в зоне влияния

закрытого в 2013 г. Байкальского ЦБК, значительно отличались от наблюдаемых в воде и ДО на фоновых участках — станции 101–106 (соответственно <2.1 мкл/дм³ и <0.07 мкг/г с.о.). Исключение — ДО ряда глубоководных станций 25, 50, 78, 86 (глубины 190–250 м), расположенных по направлению бывшего подводного сброса сточных вод БЦБК, а ныне — глубинного выпуска очищенных коммунальных стоков г. Байкальска с населением 15 тыс. человек, в которых концентрации метана в ДО значительно превышали “фоновые” (0.58–1.87 мкг/г с.о.).

Наблюдается отчетливая зависимость между распределением концентраций метана и гранулометрическим составом ДО (рис. 2а), что в целом характерно и для других водных объектов [1, 2, 22, 23]. При этом если с увеличением доли песчаной фракции (>0.05 мм) концентрация метана снижается, то с увеличением доли более тонкозернистых фракций (алевритовой и пелитовой размерности) его концентрация, наоборот, возрастает. Причем с пелитовой фракцией (<0.005 мм), доля которой не превышает 8.7%

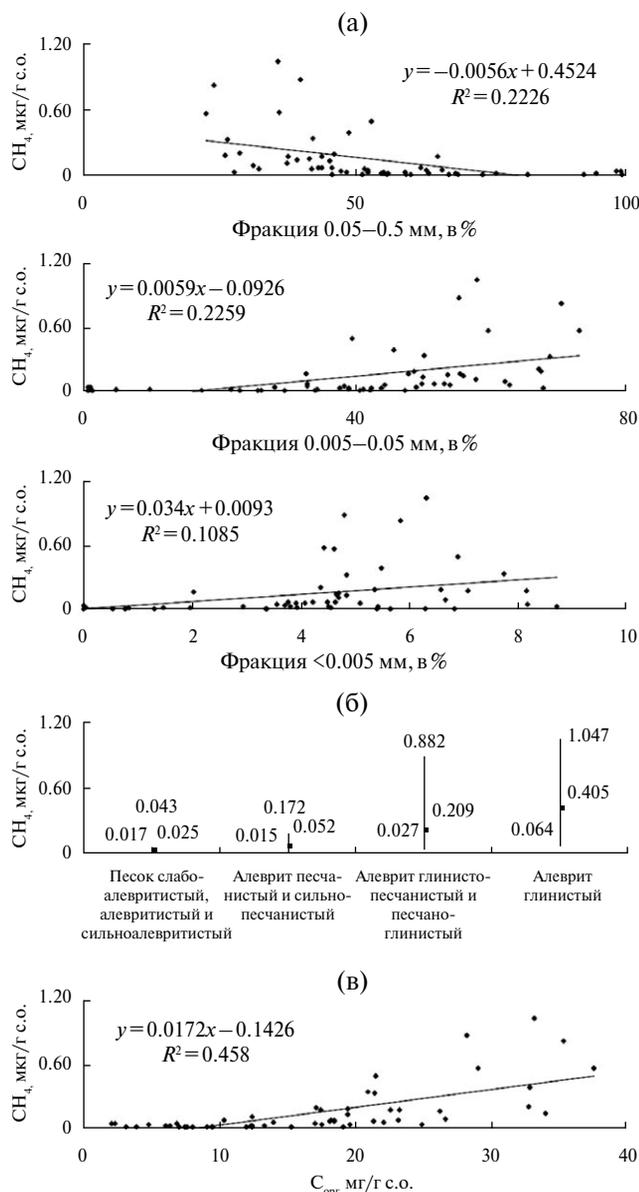


Рис. 2. Изменение концентраций метана в зависимости от гранулометрического состава (а) и литологических типов ДО (б), а также содержания $C_{\text{орг}}$ (в) в ДО исследованных районов оз. Байкал (по данным 2015 г.). На рис. 2б приведены значения минимальных, средних и максимальных концентраций метана в различных литологических типах ДО.

минеральной матрицы исследованных отложений, наблюдается менее тесная положительная связь, чем с фракцией алевритовой размерности (0.05–0.005 мм), доля которой в среднем на порядок больше. Описанная связь между распределением концентраций метана и гранулометрическим составом ДО выражается в том числе в увеличении концентраций изучаемого газа в направлении пески — алевриты сильнопесчаные и песчаные — алевриты глинисто-песчаные и песчано-глинистые — алевриты глинистые (рис. 2б). В этом же направлении уве-

личивается и количество органического вещества, которое наряду с содержанием растворенного кислорода в придонном слое воды обычно является основным фактором, лимитирующим скорости процесса метаногенеза в ДО [2, 12, 24]. Сказанное подтверждается тесной прямолинейной зависимостью между концентрациями $C_{\text{орг}}$ и метана (рис. 2в), наблюдаемой и на других водных объектах [2, 22, 23].

Ряд станций, характеризующихся высокими концентрациями метана (станции 405, 406, 412 и 25), при относительно большой доле песчаных частиц и невысоком содержании $C_{\text{орг}}$ существенно отклоняются от линий, аппроксимирующих все описанные зависимости. Поэтому при представлении зависимостей на рисунках 2а, 2в и при расчете коэффициентов корреляции эти станции не учитывались. Повышенные содержания метана, несмотря на относительно невысокие значения $C_{\text{орг}}$, могут быть обусловлены большей лабильностью органического вещества в ДО этих станций, приуроченных в основном к зонам впадения рек и сброса сточных вод БЦБК.

В табл. 2 приведен ряд имеющихся к настоящему моменту данных по концентрациям метана в воде и ДО оз. Байкал. Как видно из табл. 2, максимальные концентрации газа в воде и ДО приурочены к зоне впадения реки Фролихи в одноименную губу, расположенную в северной части озера, несколько меньшие — к зонам впадения рек Верхняя Ангара и Кичера. Это обусловлено накоплением органического вещества в таких зонах, что благоприятно для протекания метаногенеза [14, 21, 24].

Отдельно можно отметить anomalously высокую концентрацию метана (112 мл/дм³) в ДО глубоководной зоны Южной котловины озера (станция «Посольская Банка»), зафиксированную в 50 см от поверхности дна, что связано с близким залеганием газовых гидратов [15]. В поверхностных горизонтах отложений данной станции концентрация метана заметно снижается и мало отличается от его содержания в ДО, расположенных вне зон нахождения газогидратов (табл. 2).

Минимальное содержание метана, нередко ниже значений, равновесных с атмосферой, характерно для глубоководных открытых районов озера (табл. 2). Причем, как показали исследования авторов, в глубоководных районах (1400–1500 м) концентрация метана заметно выше в придонных горизонтах воды (1.1–2.1 мкл/дм³), чем в поверхностных слоях (<0.1 мкл/дм³). Это

Таблица 2. Обобщенные данные по концентрации метана в воде и ДО оз. Байкал (в числителе приведены пределы изменения, в знаменателе — средние значения, в скобках — количество измерений, прочерк — нет данных)

Район отбора проб	СН ₄ в ДО, мкл/дм ³ влажного осадка				СН ₄ в воде, мкл/дм ³							
	июль 1988 (по [21])	август 1994 (по [21, 24])	июнь— август 1991—2000 (по [8])	июль 2012 (по [15, 16])	сентябрь 2014 (данная работа)	сентябрь 2015 (данная работа)	август 1994 (по [21, 24])	июнь— август 1991—2000 (по [8])	август— сентябрь 2002—2004 (по [7, 34])	июль 2013 (по [10])	сентябрь 2014 (данная работа)	сентябрь 2015 (данная работа)
Северная котловина озера												
Мелководная зона, глубина 0.5–200 м	<10–27600 3720 (9)	-	-	-	10–1536 607 (5)	<10–697 174 (15)	-	-	-	-	0.2–13.9 4.8 (3)	0.3–2.0 0.9 (11)
Губа Фролиха, глубина 22–690 м	-	-	6–81700 6008 (13)	-	-	-	0.3–41.0 15.1 (3)	-	-	-	-	-
Глубоководные участки												
Центральная котловина озера, мыс Заворотный, глубина 825 м	-	-	8–1000 340 (3)	-	-	-	0–3.0 1.1 (7)	-	-	-	-	-
Центральная и Южная котловины, глубина 1400–1600 м	-	-	-	-	-	-	5.9 (1)	0.01–0.3 0.05 (23)	-	-	<0.1–2.1 0.9 (4)	-
Центральная и Южная котловины, над грязевыми вулканами К2 и Большой и нефтяным сипом Горевой Утес, глубина 830–1370 м	-	-	-	-	-	-	-	-	0.09–1.0 (60)	-	-	-
Южная котловина озера												
Зона впадения в озеро р. Селенги, глубина 25–50 м	-	-	-	-	14–1360 456 (10)	<10–371 110 (12)	-	-	-	-	<0.1–2.5 0.8 (4)	0.2–4.5 1.2 (5)
Посольская Банка: Мелководная зона (51–111 м), горизонт 0–20 см	-	-	-	до 1028	-	-	-	-	-	-	-	-
Глубоководная зона (500–850 м) – в 0–50 см от поверхности и в пределах 25 см над газогидратами	-	-	-	2057– 112000	-	-	-	-	-	-	-	-
Район БЦБК, глубина 15–250 м	50–9815 1014 (15)	<10–2150 390 (34)	-	-	54–620 215 (9)	<10–602 74 (33)	0.3–2.9 1.6 (21)	0.9–12.1 2.3 (10)	-	-	0.8–2.1 1.4 (3)	0.3–0.7 0.4 (13)
Район Хара-Муринской банки, глубина 15–200 м	-	46–1180 378 (9)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Над грязевым вулканом Маленьким и струйными газовыделениями на Селенгинском мелководье	-	-	-	-	-	-	-	1.3–2.3 (2)	-	-	-	-

согласуется с исследованиями [10], в ходе которых на всех станциях в придонных областях (830–1370 м) выявлялись более высокие концентрации метана ($0.19\text{--}1.0$ мкл/дм³), чем в поверхностном и промежуточных горизонтах до глубин 600–800 м, где его концентрации обычно ≤ 0.2 мкл/дм³. Исключение – поверхностные горизонты воды ряда станций, где наблюдались высокие концентрации метана ($0.26\text{--}0.36$ мкл/дм³), связанные, по мнению авторов [10], с метанообразованием в анаэробных микронишах, формируемых в зоне повышенной биомассы диатомовых водорослей. Существование такого источника подтверждается многочисленными исследованиями (например, [26, 32]) и связано с тем, что внутри взвешенных в воде органоминеральных частиц, представленных в том числе остатками водорослей, возможно формирование анаэробных микрозон (микрониш) вследствие интенсивных процессов окисления органического вещества и перехвата кислорода уже на поверхности взвеси. Некоторую роль в образовании метана в высокоаэробных водах могут играть также процессы метаногенеза, протекающие в пищеварительном тракте и фекальных выделениях (пеллетах) зоопланктона [32]. В [26, 32] предполагают, что источник метаногенных архей во взвешенных частицах и фекальных пеллетах – пищеварительный тракт зоопланктона; в прибрежных районах возможно поступление их в воду при взмучивании ДО ветровыми перемешиваниями и течениями.

Установленный в настоящей работе и работе [10] характер распределения метана отличался от распределения метана, описанного в работе [35], согласно которому в глубоководных зонах озера наблюдалось снижение его концентраций от $0.2\text{--}0.3$ мкл/дм³ в поверхностном слое до $0.01\text{--}0.02$ мкл/дм³ в нижней части вертикального профиля с промежуточными значениями (0.05 мкл/дм³) на глубине 200 м. Причиной более высоких концентраций метана в поверхностном слое, как показано выше, может быть его генерация в анаэробных микрозонах, образующихся во взвешенных в воде органоминеральных частицах.

Относительно невысокие концентрации метана – $0.09\text{--}2.3$ мкл/дм³ (табл. 2) – наблюдаются непосредственно над грязевыми вулканами Маленький, К2, Большой и над нефтяным сипом Горевой Утес, расположенными в южной и средней частях озера, а также на участке струйных газовыделений в районе впадения р. Селенги (залив Провал). По всей видимости,

метановая разгрузка в виде струйных газовыделений, фиксируемая в тектонически ослабленных зонах и областях дегазации над залежами углеводородов, в том числе газогидратов и грязевых вулканов [13, 27, 28], локально повышает концентрации метана в водной массе, окружающей газовую струю. Метан, поступивший в воду как в результате диффузии, так и в составе пузырьков, может частично или полностью раствориться и окислиться в глубинных горизонтах, 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 их размеров, а также уровня насыщенности метаном водной толщи [30]. С изменением этих факторов будет меняться и доля метана, достигающего поверхностных слоев воды. Считается, что для мелководных выходов пузырьков газа на глубинах < 20 м почти весь выделяющийся метан достигает границы вода–атмосфера [33]. Для более глубоководных – порядка 50 м – выходов $\geq 50\%$ газовых пузырьков, причем определенного размера (диаметром ~ 10 мм), достигают поверхностных горизонтов; более мелкие пузырьки быстро растворяются, более крупные разбиваются на мелкие, после чего также растворяются [31]. Подводные струйные выходы газа на глубинах свыше 100–300 м практически не достигают поверхностных слоев воды [33], очевидно, как и метан, диффузионно выделяющийся в водную толщу из глубоководных отложений. Поэтому источником метана, содержащегося в поверхностных горизонтах в глубоководных районах озера, удаленных от устьев крупных рек, могут быть газы атмосферы или непосредственная его генерация в анаэробных микрозонах, образующихся во взвешенных в воде остатках отмерших организмов, а также в пищеварительном тракте и фекальных выделениях (пеллетах) зоопланктона [26, 32]. 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.

Генезис естественных газовых проявлений на юго-восточном побережье оз. Байкал (устье р. Селенги, зал. Провал и на берегу озера вблизи деревни Сухая) впервые исследован в работе [19]. В результате установлено, что метан этих газовых выходов по происхождению может быть как биохимическим ($\delta^{13}\text{C}$ метана варьирует в пределах $-61.9\text{...} -61.0\text{‰}$), образуемым на

начальном этапе преобразования органического вещества, так и термогенным ($\delta^{13}\text{C} = -53.2... -41.0\text{‰}$), поступающим из трещин гранитного массива и палеоген-неогеновых отложений. Изучение изотопного состава углерода метана, выделяющегося из ДО в районе мыса Грязевый Утес [11], также показало его термогенный генезис ($-44.2... -43.7\text{‰}$), в то время как метан ДО в районе БЦБК отнесен к метану, образованному в результате современных биохимических процессов ($\delta^{13}\text{C} = -75.0... -65.0\text{‰}$). Таким образом, метан в воде и ДО оз. Байкал имеет смешанный генезис [20]. В районах озера, где по разломам и оперяющим их трещинам и жерлам грязевых вулканов происходит эманация метана, он имеет преимущественно термогенное происхождение, вне зоны их влияния в верхних горизонтах отложений — биогенное. Влияние биогенного в воде и ДО озера особенно ярко проявляется в зонах выноса органического вещества реками и на участках, подверженных воздействию сточных вод.

Концентрации метана в воде оз. Байкал характеризуются одними из самых низких значений по сравнению с другими озерами [24], что обусловлено хорошей аэрацией озера, определяющей высокие содержания растворенного в воде кислорода даже в придонных слоях воды (>85% насыщения), а также олиготрофным статусом большинства его районов [5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период исследований — в 2014 и 2015 гг., как и в предыдущие годы наблюдений, максимальные концентрации метана в воде и ДО оз. Байкал были характерны для северного района озера, куда впадают реки Верхняя Ангара, Кичера, отдельных станций профиля, проложенного вдоль устьевой зоны р. Селенги, а также станций, расположенных в зоне подводного выпуска сточных вод г. Байкальска и БЦБК, закрытого в 2013 г. Это связано с активным поступлением органического вещества в водную толщу и ДО таких зон, и его последующим разложением до субстратов (H_2 , CO_2 , ацетат и др.), используемых метаногенными археями как в ДО, так и в анаэробных микронизах, формируемых во взвешенных в воде органоминеральных частицах. Последнее, наряду с непосредственным поступлением метана в составе речного стока, вероятно, и обуславливает появление высоких концентраций метана в поверхностных слоях воды мелководных участков, расположенных в зоне впадения рек, а также

периодическое выявление высоких концентраций газа в глубоководных районах озера в слоях воды с повышенной биомассой фито- и зоопланктона.

Приуроченность повышенных концентраций метана к районам антропогенного давления и зонам впадения крупных рек и его тесная связь с концентрациями $\text{C}_{\text{орг}}$ в донных отложениях свидетельствуют о преобладании в водной толще и ДО исследованных участков метана современного бактериального происхождения. Существование повышенных или пониженных концентраций метана в изученных верхних горизонтах ДО оз. Байкал наряду с различиями в мощности антропогенного влияния обусловлено изменчивостью условий осадконакопления (глубина, скорость течения, волновое воздействие), определяющих гранулометрический состав и содержание органического вещества и, как следствие, окислительно-восстановительные условия и интенсивность метаногенеза.

Благодарности

Авторы благодарят С.А. Резникова (Гидрохимический институт Росгидромета) за любезно предоставленные данные анализов содержания $\text{C}_{\text{орг}}$ и гранулометрического состава ДО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Метан в воде и донных отложениях устьевой области Северной Двины в зимний период // Океанология. 2014. Т. 54. № 2. С. 178–188.
2. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. Метан в устьевой области реки Дон. Ростов-на-Дону; М.: Ростиздат, 2010. 181 с.
3. Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Метан как индикатор условий раннего диагенеза и экологического состояния водных экосистем // Изв. Вузов. Северо-Кавказский регион. Сер. естественные науки. 2013. № 6. С. 78–82.
4. Геодекян А.А., Авиллов В.И., Авилова С.Д. Геоэкологические исследования Байкала // ДАН СССР. 1990. Т. 310. № 6. С. 1442–1446.
5. Государственные доклады “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране в 2003, 2004, ..., 2014 гг.” Иркутск: Сибирский фил. Росгеолфонда, 2004, 2005, ..., 2015.
6. Гранин Н.Г., Верещагина О.Ф., Козлов В.В., Обжиров А.И., Макаров М.М., Гнатовский Р.Ю., Иванов В.Г., Блинов В.В., Мизандронцев И.Б. Изменение концентрации метана в озере Байкал: возможная причина // Тез. докл. всерос. конф. “Газовые гидра-

- ты в экосистеме Земли, 2014". Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2014. С. 25.
7. Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Обжиров А.И., Верещагина 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. Углевородные 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. Калмычков Г.В., Егоров А.В., Кузьмин М.И., Хлыстов О.М. Генетические типы метана озера Байкал // ДАН. 2006. Т. 411. № 5. С. 672–675.
 12. Кузнецов С.И., Саралов А.Е., Назина Т.Н. Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. М.: Наука, 1985. 213 с.
 13. Кузьмин М.М., Калмычков Г.В., Гелетий В.Ф., Гнилуши В.А., Горегляд А.В., Хахаев Б.Н., Певзнер Л.А., Кавани Л., Иошида Н., Лучков А.Д., Пономарчук В.А., Контарович 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.
 14. 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.
 15. Павлова О.Н., Букин С.В., Ломакина А.В., Калмычков Г.В., Иванов В.Г., Морозов И.В., Погодаева Т.В., Пименов Н.В., Земская Т.И. Образование углеводородных газов микробным сообществом донных осадков озера Байкал // Микробиология. 2014. Т. 83. № 6. С. 694–702.
 16. Пименов Н.В., Захарова Е.Е., Брюханов А.Л., Корнева В.А., Кузнецов Б.Б., Турова Т.П., Погодаева Т.В., Калмычков Г.В., Земская Т.И. Активность и структура сообщества сульфатредуцирующих бактерий в осадках Южной котловины оз. Байкал // Микробиология. 2014. Т. 83. № 2. С. 180–190.
 17. РД 52.24.511-2013. Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохим. ин-т, 2013. 19 с.
 18. РД 52.24.512-2012. Объемная концентрация метана в водах. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Ростов-на-Дону: Гидрохим. ин-т, 2012. 23 с.
 19. Самсонов В.В. Происхождение байкальской нефти и проблемы нефтегазоносности Бурятии // Проблемы сибирской нефти. Новосибирск: СО АН СССР, 1963. С. 127–150.
 20. Федоров Ю.А. Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: Центр "Истина", 1999. 370 с.
 21. Федоров 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. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. Образование и распределение метана в воде и донных отложениях, загрязненных стоками целлюлозно-бумажного производства (на примере Ладожского озера) // Метеорология и гидрология. 2000. № 7. С. 49–61.
 23. Федоров 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. Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. Метан в водных экосистемах. Ростов-на-Дону; М.: Ростиздат, 2007. 330 с.
 25. Янаскурт О.В. Литология: учебник для студентов ВУЗов. М.: Академия, 2008. 336 с.
 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 // Marine ecol. progress ser. 1992. V. 88. P. 55–60.
 27. Granin N.G., Makarov M.M., Kucher K.M., Gnatsky R.Y. Gas seeps in Lake Baikal – detection, distribution, and implications for water column mixing // Geo-Marine Lett. 2010. V. 30(3, 4). P. 399–409.
 28. 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 of European Microbiol. Soc. Microbiol. Ecol. 2012. V. 79. P. 348–358.
 29. 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.
 30. 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.
 31. MacDonald I.R., Leifer I., Sassen R., Stine P., Mitchell R., Guinasso N. Transfer of hydrocarbons from natural seeps to the water column and atmosphere // Geofluids. 2002. V. 2(2). P. 95–107.
 32. Marty D.G. Methanogenic bacteria in seawater // Limnol. Oceanogr. 1993. V. 38(2). P. 452–456.
 33. Schmale O., Greinert J., Rehder G. Methane emission from high-intensity marine gas seeps in the Black Sea

- into the atmosphere // *Geoph. Res. Lett.* 2005. V. 32(7): L07609.
34. Schmid M., De Batist M., Granin N.G., Kapitanov V.A., McGinnis D.F., Mizandrontsev I.B., Obzhirov A.I., Wüest A. Sources and sinks of methane in Lake Baikal: A synthesis of measurements and modeling // *Limnol. Oceanogr.* 2007. V. 52. № 5. P. 1824–1837.
35. Zemsкая 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.

METHANE IN WATER AND BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE BAIKAL

© 2019 D. N. Garkusha^{1,*}, Yu. A. Fedorov¹, N. S. Tambieva²,
Yu. A. Andreev², O. A. Mikhaylenko²

¹*Southern Federal University
Russia 344090 Rostov-on-Don*

²*Hydrochemical Institute
Russia 344090 Rostov-on-Don
e-mail: gardim1@yandex.ru

Received: 25.03.2017

Revised version received: 28.09.2017

Accepted: 29.09.2017

The results of the methane concentration distribution in different areas of Lake Baikal obtained in 2014 and 2015 were analyzed in this study. In periods of expedition examinations, the methane concentration in the water and in the bottom sediments of the lake varied in a range from <0.1 to 13.9 $\mu\text{l}/\text{dm}^3$ (average: 0.7 $\mu\text{l}/\text{dm}^3$) and from <0.01 to 3.69 $\mu\text{g}/\text{g}$ of the dry deposition (average: 0.34 $\mu\text{g}/\text{g}$). The maximum methane concentrations in the water and bottom sediments in the lake were typical for the North region, where rivers Verkhnyaya Angara and Kichera are flowing, and in the individual stations of the profile set along the mouth area of the river Selenga, as well as the stations located in the zone of the waste water underwater release of Baikalsk City and the Baikalsk pulp and paper mill closed in 2013. The presence of increased and decreased methane concentrations in the examined top strata of the sediments of Lake Baikal was stipulated herein aside from the differences in the power of the anthropogenic effect by the variation of the sediment accumulation conditions determining the particle size distribution and the organic matter content and, as a result, by the methanogenesis intensity.

Keywords: water layer, bottom sediments, particle-size distribution, methane, organic carbon, distribution.

DOI: 10.31857/S0321-0596465511-522