

МЕТАН И СУЛЬФИДНАЯ СЕРА В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ОЗЕРА БАЙКАЛ

© 2019 г. Д. Н. Гарькуша^{a, *}, Ю. А. Фёдоров^a, Ю. А. Андреев^b,
Н. С. Тамбиева^b, О. А. Михайленко^b

^a Институт наук о Земле Южного федерального университета
Россия, 344090 Ростов-на-Дону, ул. Р. Зорге, 40

^b Гидрохимический институт,
Россия, 344090 Ростов-на-Дону, просп. Стачки, 198

*e-mail: gardim1@yandex.ru

Поступила в редакцию 27.05.2017 г.

После доработки 20.10.2017 г.

Принята к публикации 13.11.2017 г.

Проанализированы результаты изучения распределения концентраций метана и сульфидной серы в верхнем горизонте донных отложений различных районов озера Байкал, полученные при проведении экспедиционных исследований 2014 и 2015 гг. В период исследований концентрация метана и сульфидной серы в отложениях озера варьировала в пределах от <0.01 до 3.69 мкг/г сухого осадка (в среднем 0.34 мкг/г) и от 0.002 до 0.830 мг/г сухого осадка (в среднем 0.042 мг/г) соответственно. Максимальные концентрации метана были характерны для северного района, куда впадают воды рек Верхняя Ангара, Кичера, и отдельных станций профиля, проложенного вдоль устьевого зоны реки Селенги, а также станций, расположенных в зоне подводного выпуска сточных вод г. Байкальска и Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, закрытого в 2013 г. Сопоставление распределения концентраций метана и сульфидной серы свидетельствует об активных процессах сульфатредукции на тех же станциях, где фиксируются и наиболее высокие концентрации метана, что указывает на сопряженные процессы их генерации. Существование повышенных или пониженных концентраций метана и сульфидной серы в изученных верхних горизонтах отложений озера Байкал обусловлено наряду с различиями в мощности антропогенного влияния изменчивостью условий осадконакопления, определяющих гранулометрический состав и содержание органического вещества, и, как следствие, интенсивность метаногенеза и сульфатредукции.

Ключевые слова: донные отложения, гранулометрический состав, метан, сульфидная сера, органический углерод, органический азот, распределение

DOI: 10.31857/S0016-7525644427-439

ВВЕДЕНИЕ

Пресное озеро Байкал, включенное в 1996 г. в список объектов Всемирного наследия ЮНЕСКО, — одно из самых грандиозных геологических образований на Земном шаре. Низкая минерализация (около 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° северной широты и 103° и 110° восточной долготы. Впадина озера окружена со всех сторон цепями гор, которые вплотную подходят

к берегам, прерываясь лишь в местах впадения крупных притоков.

Первые сведения по распределению концентраций метана в воде и донных отложениях озера Байкал были получены при проведении экспедиционных исследований в летний период 1988 и 1994 гг. (Федоров и др., 1997). Примерно в то же время были впервые изучены микробиологические процессы цикла метана в отложениях озера (Геодекян и др., 1990; Намсараев и др., 1995б). На настоящий момент опубликован ряд работ, посвященных изучению распределения метана в воде и отложениях озера (Гранин и др., 2013; Дагурова и др., 2004; Zemskaaya et al., 2005; Schmid et al., 2007), однако они носят эпизоди-

ческий характер и, как правило, ограничены одним, реже двумя районами. Что касается сульфидной серы, то по крайней мере с начала 2000-х годов Росгидрометом на созданной сразу после запуска Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (БЦБК) в 1965 г. системе гидрохимического и гидробиологического мониторинга, охватывающей практически всю акваторию озера, ведутся систематические наблюдения за ее содержанием в донных отложениях, а первые сведения о концентрациях сульфидной серы были получены Лимнологическим институтом АН СССР еще с конца 50-х и в 60-е годы прошлого века (Государственные доклады..., 2004–2015), то есть до начала работы БЦБК. Позднее, вопросы, касающиеся распределения и образования восстановленных соединений серы в отложениях озера (в том числе сульфидной серы), рассматривались в работах (Гоман, 1975; Лазо, 1980; Федоров, 1999; Намсараев, 1995а; Аниканова, 2009; Пименов и др., 2014).

Уже в ходе первых исследований было установлено, что, несмотря на относительно низкое содержание сульфатов в воде и поровых растворах донных отложений озера, низкие температуры водной толщи и ее хорошую аэрацию, обуславливающую высокое содержание кислорода, процессы метаногенеза и сульфатредукции в отложениях озера, тем не менее, протекают. При этом ключевая роль на конечных этапах анаэробной деструкции органического вещества в отложениях в целом принадлежит именно метаногенезу, в то время как активная сульфатредукция наблюдается лишь в верхних (до 15–20 см) слоях отложений, что связывают с истощением сульфатных ионов в нижних горизонтах осадков (Намсараев и др., 1995а, б). Протекание данных процессов уже в верхнем 0–5-сантиметровом горизонте отложений, как правило, с наиболее окисленными условиями среды (как считают например, Федоров и др., 2007; Леин, Иванов, 2009) происходит в анаэробных микроразонах (микронизах), формирующихся внутри слагающих донные отложения органоминеральных частиц за счет перехвата кислорода уже на поверхности этих частиц, вследствие интенсивно протекающих здесь процессов окисления органического вещества. Как показано в работах (Федоров и др., 1997, 2007), в нижних изученных (до 10–15 см) горизонтах отложений озера Байкал концентрации метана нередко увеличиваются в 1.5–2 и более раз, что обуславливается снижением окислительно-восстановительного потенциала среды до более благоприятных для метаногенов отрицательных значений.

В данной работе, помимо обобщения ранее опубликованных материалов, рассматриваются результаты 2 экспедиций, охвативших несколько районов озера Байкал, с целью установления закономерностей пространственного распределения и взаимосвязи концентраций метана и сульфидной серы в верхнем горизонте донных отложений, а также выявления роли гранулометрического состава отложений и содержащихся в них органических веществ. Актуальность работы обусловлена также и тем, что информация о том, как меняются концентрации метана и сульфидной серы в отложениях южной части озера, позволит судить о восстановлении экосистемы озера (Гарькуша и др., 2013; Федоров и др., 2004б, 2006, 2007) после закрытия в 2013 г. проработавшего почти 50 лет 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 (Федоров и др., 1997), авторами проведены работы, в ходе которых в различных районах озера Байкал отобраны пробы донных отложений для определения концентраций метана и сульфидной серы (рис. 1). Помимо метана и сульфидной серы

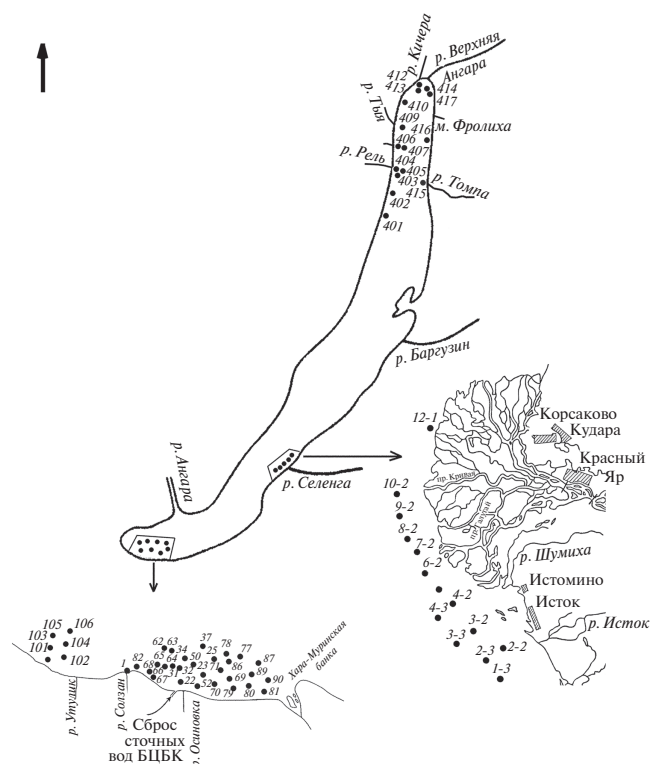


Рис. 1. Схема расположения станций отбора проб донных отложений в озере Байкал.

(ΣH_2S), в 2015 г. в отобранных отложениях проведено определение органических углерода ($C_{орг}$) и азота ($N_{орг}$), а также гранулометрического состава для выявления их роли в пространственном распределении определяемых показателей.

Повышенное внимание было сосредоточено на северном районе озера, куда впадает большое количество рек, зоне воздействия БЦБК, а также зоне впадения в озеро реки Селенги, сток которой составляет около 50% поступления в озеро речных вод. Донные отложения (верхний горизонт до 6–7 см) отбирали дночерпателем Петерсена с борта научно-исследовательского судна «Персей» (ФГБУ «Иркутское УГМС» Росгидромета) на глубинах от 14 до 250 м. При поднятии донных отложений на поверхность отбор проб проводился по центру ковша дночерпателя, а самый верхний, как правило, более светлый и влажный слой (в том числе желто-серый наилок), вероятно, с наиболее окислительными условиями среды, не отбирался.

Отбор проб и последующее определение метана проводили согласно аттестованным методикам анализа (РД 52.24.511-2013). Анализ выполняли на газовом хроматографе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с дозатором равновесного пара на пламенно-ионизационном детекторе. Выполнение измерений массовой доли сульфидной серы основано на переводе сульфидов донных отложений в сероводород действием соляной кислоты и последующей отдувке сероводорода азотом особой чистоты в раствор гидроксида натрия и определения сульфид-ионов фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиамином (РД 52.24.525-2011). Одновременно с отбором проб в заранее взвешенные

и пронумерованные бюксы отбирали навеску донных отложений для определения массовой доли сухого осадка и его влажности.

Определение содержания $C_{орг}$ в донных отложениях проводилось методом мокрого «сжигания» (по Тюрину) – окисление органических веществ избытком бихромата калия в сильнокислой среде с последующим титрованием остатка солью Мора. Определение $N_{орг}$ выполнялось методом минерализации азотсодержащих органических веществ концентрированной серной кислотой при кипячении, затем образовавшиеся соли аммония переводились в аммиак, который после отгонки определялся методом обратного титрования. Анализ донных осадков для определения гранулометрического состава проводился на лазерном дифракционном анализаторе размеров частиц SALD-2300 (Shimadzu, Япония). Название литологических типов отложений дано в соответствии с номенклатурой В.Т. Фролова (Япаскurt, 2008).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Концентрация метана в донных отложениях озера Байкал в 2014 и 2015 гг. соответственно варьировала от 0.03 до 3.69 мкг/г сухого осадка (с.о.) (в среднем 0.66 мкг/г) и от <0.01 до 1.81 мкг/г с.о. (в среднем 0.21 мкг/г) (табл. 1). Концентрация сульфидной серы в донных отложениях изменялась в диапазоне от 0.007 до 0.830 мг/г с.о. (в среднем 0.077 мг/г с.о.) и от 0.002 до 0.384 мг/г с.о. (в среднем 0.027 мг/г с.о.) в 2014 и 2015 гг. соответственно.

Таблица 1. Концентрация метана и сульфидной серы в донных осадках озера Байкал по результатам экспедиций 2014 и 2015 гг.

№№ станций и их местоположение	Координаты, с.ш./в.д.	Глубина, м	CH ₄ , мкг/г с.о.	ΣH ₂ S, мг/г с.о.	Цвет и литологический тип донных отложений
Северный район озера					
ст. 401, 0.5 км от берега, р-н мыса Котельниковский	55°04'32.90"/ 109°06'25.90"	130	— <0.01	— 0.002	коричнево-рыжий алеврит глинисто-песчанистый
ст. 402, 0.5 км от берега, р-н мыса Толстой	55°08'16.06"/ 109°09'11.58"	180	— <0.01	— 0.027	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	— 0.03	— 0.009	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	— <0.01	— 0.016	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	— 0.008	** серый алеврит сильнопесчанистый

Таблица 1. Продолжение

№№ станций и их местоположение	Координаты, с.ш./в.д.	Глубина, м	CH ₄ , мкг/г с.о.	ΣH ₂ S, мг/г с.о.	Цвет и литологический тип донных отложений
ст. 406, 0.2 км от устья р. Слюдянка	55°30'47.80"/ 109°12'37.50"	40	<u>-</u> 0.53	<u>-</u> 0.046	коричневый песок сильноалевритистый
ст. 407, 0.6 км от устья р. Слюдянка	55°30'51.40"/ 109°12'59.60"	155	<u>-</u> 0.07	<u>-</u> 0.007	коричневый алеврит сильнопесчанистый
ст. 409, 1.5 км от устья р. Тья	55°35'51.70"/ 109°22'32.30"	210	<u>-</u> 0.14	<u>-</u> 0.008	** серо-голубой алеврит глинистый
ст. 410, 1.0 км от устья р. Чуна	55°42'20.40"/ 109°29'23.40"	32	<u>0.90</u> <u>0.03</u>	<u>0.013</u> <u>0.018</u>	коричневый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 412, 0.5 км от устья р. Кичера	55°46'00.18"/ 109°37'03.40"	45	<u>0.97</u> <u>1.81</u>	<u>0.830</u> <u>0.384</u>	черный песок сильноалевритистый
ст. 413, 1.0 км от устья р. Кичера	55°45'37.20"/ 109°36'58.40"	155	<u>-</u> 0.39	<u>-</u> -	черный алеврит глинисто-песчанистый
ст. 414а, 0.5 км от устья р. Верхняя Ангара	55°41'59.90"/ 109°51'59.90"	58	<u>3.69</u> -	<u>0.389</u> -	темно-серый алеврит глинистый
ст. 414б, 1.0 км от устья р. Верхняя Ангара	55°41'38.70"/ 109°51'48.00"	110	<u>-</u> 1.05	<u>-</u> 0.019	коричневый алеврит глинистый
ст. 415, 0.5 км от устья р. Томпуда	55°07'05.70"/ 109°43'59.90"	90	<u>0.04</u> <u>0.17</u>	<u>0.010</u> <u>0.072</u>	серо-голубой алеврит сильнопесчанистый
ст. 416, 1.5 км от устья р. Горячий	55°21'52.50"/ 109°46'55.10"	170	<u>0.03</u> <u><0.01</u>	<u>0.019</u> -	коричневый алеврит глинистый
ст. 417, 2.0 км от берега, район Дагарской губы	55°39'40.10"/ 109°53'34.80"	35	<u>-</u> <u><0.01</u>	<u>-</u> -	коричневый песок слабоалевритистый
Район впадения в озеро р. Селенги					
ст. 1-3	52°10'00.00"/ 106°06'00.00"	50	<u>0.03</u> -	<u>0.016</u> -	** серо-голубой алеврит глинистый
ст. 2-2	52°10'26.28"/ 106°09'38.46"	14	<u>-</u> 0.03	<u>-</u> 0.014	коричневый алеврит сильнопесчанистый
ст. 2-3	52°11'27.10"/ 106°07'24.10"	50	<u>2.69</u> -	<u>0.056</u> -	** серо-голубой алеврит глинистый
ст. 3-2	52°12'30.72"/ 106°08'58.70"	18	<u>-</u> 0.05	<u>-</u> 0.009	коричневая песчано-алевритовая неотсортированная порода
ст. 3-3	52°13'08.28"/ 106°06'37.50"	45	<u>0.48</u> <u>0.57</u>	<u>0.016</u> <u>0.025</u>	коричневый алеврит глинистый
ст. 4-2	52°14'00.72"/ 106°09'42.36"	20	<u>-</u> 0.09	<u>-</u> 0.042	** серый алеврит глинистый
ст. 4-3	52°14'14.40"/ 106°08'00.72"	45	<u>1.85</u> <u>0.83</u>	<u>0.019</u> <u>0.045</u>	черно-коричневый алеврит глинистый
ст. 5-2	52°15'11.84"/ 106°11'22.94"	19	<u>0.78</u> <u>0.17</u>	<u>0.013</u> <u>0.023</u>	** серо-коричневый алеврит песчано-глинистый
ст. 6-2	52°16'54.60"/ 106°11'56.16"	22	<u>0.22</u> <u>0.17</u>	<u>0.013</u> <u>0.028</u>	** серо-зеленый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 7-2	52°18'51.39"/ 106°13'27.43"	23	<u>0.08</u> <u><0.01</u>	<u>0.097</u> <u>0.003</u>	** серо-коричневый песок глинисто-алевритистый

Таблица 1. Продолжение

№№ станций и их местоположение	Координаты, с.ш./в.д.	Глубина, м	CH ₄ , мкг/г с.о.	ΣH ₂ S, мг/г с.о.	Цвет и литологический тип донных отложений
ст. 8-2	52°20'30.60"/ 106°15'41.50"	20	<u>0.68</u> 0.02	<u>0.017</u> 0.005	** коричнево-зеленый песок слабоалевритистый
ст. 9-2	52°21'51.84"/ 106°19'16.20"	18	- 0.02	- 0.013	серо-коричневый песок сильноалевритистый
ст. 10-2	52°24'02.40"/ 106°14'53.30"	20	<u>0.03</u> 0.04	<u>0.007</u> 0.008	серо-коричневый песок слабоалевритистый
ст. 12-1	52°25'03.00"/ 106°36'06.00"	20	<u>0.08</u> 0.04	<u>0.007</u> 0.007	коричневый песок слабоалевритистый
Южный район озера, зона влияния БЦБК					
ст. 1, р. Солзан, зона смещения	51°31'57.01"/ 104°09'32.60"	20	-	- 0.006	серо-коричневый песок алевритистый
ст. 22	51°30'09.40"/ 104°14'44.10"	22	-	- 0.026	серо-коричневый песок алевритистый
ст. 23	51°30'34.13"/ 104°15'5.74"	100	<u>0.27</u> 0.06	<u>0.030</u> 0.036	серо-голубой плотный алеврит сильнопесчанистый
ст. 25	51°30'53.48"/ 104°15'35.04"	210	- 1.24	- 0.016	серо-коричневый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 31	51°30'51.12"/ 104°14'02.35"	170	- 0.33	- 0.020	** серо-голубой алеврит глинистый
ст. 32	51°30'41.07"/ 104°14'27.88"	90	- <0.01	- 0.019	** серый алеврит сильнопесчанистый
ст. 34	51°31'13.34"/ 104°14'33.42"	<u>235</u> 200	<u>0.15</u> 0.03	<u>0.017</u> 0.021	коричневый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 37	51°31'15.50"/ 104°15'09.31"	247	- 0.34	- 0.017	коричневый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 50	51°30'54.63"/ 104°14'50.04"	190	- 0.58	- 0.049	** серо-голубой алеврит глинистый
ст. 52	51°30'04.08"/ 104°15'09.60"	25	<u>0.04</u> 0.02	<u>0.015</u> 0.004	серо-коричневый песок алевритистый
ст. 62	51°31'21.31"/ 104°13'38.24"	170	- 0.19	- 0.017	** серо-синий алеврит глинистый
ст. 63	51°31'22.56"/ 104°14'15.11"	250	- 0.21	- 0.017	** серо-голубой алеврит глинистый
ст. 64	51°30'53.80"/ 104°13'35.66"	<u>150</u> 135	<u>0.21</u> 0.06	<u>0.027</u> 0.015	серо-голубой алеврит глинистый
ст. 65	51°30'59.57"/ 104°13'10.28"	115	- 0.07	- 0.017	серо-зеленый алеврит песчанистый
ст. 66	51°30'36.03"/ 104°12'36.14"	20	- 0.02	- 0.013	серо-коричневый алеврит сильнопесчанистый
ст. 67	51°30'28.62"/ 104°12'52.68"	15	- 0.02	- 0.009	серо-коричневый алеврит сильнопесчанистый
ст. 68	51°30'57.06"/ 104°12'40.62"	90	<u>0.16</u> 0.02	<u>0.009</u> 0.003	серо-голубой алеврит сильнопесчанистый

Таблица 1. Окончание

№№ станций и их местоположение	Координаты, с.ш./в.д.	Глубина, м	CH ₄ , мкг/г с.о.	ΣH ₂ S, мг/г с.о.	Цвет и литологический тип донных отложений
ст. 69	51°30'33.31"/ 104°16'34.40"	200	<u>0.47</u> 0.11	<u>0.013</u> 0.021	** серо-голубой алеврит песчано-глинистый
ст. 70а	51°29'41.16"/ 104°16'04.32"	61	<u>0.14</u> -	<u>0.196</u> -	темно-серый алеврит глинисто-песчанистый
ст. 70б	51°29'45.89"/ 104°16'07.28"	100	<u>-</u> 0.07	<u>-</u> 0.031	серый алеврит глинисто- песчанистый
ст. 71	51°30'42.63"/ 104°15'51.65"	160	<u>-</u> 0.08	<u>-</u> 0.039	серо-черный алеврит глинисто-песчанистый
ст. 77	51°30'56.30"/ 104°16'47.03"	250	<u>-</u> 0.14	<u>-</u> 0.014	серый алеврит глинисто- песчанистый
ст. 78	51°31'07.66"/ 104°16'05.16"	240	<u>1.87</u> -	<u>0.017</u> -	серо-черный алеврит глинисто-песчанистый
ст. 79	51°29'46.81"/ 104°16'35.82"	92	<u>-</u> 0.05	<u>-</u> 0.006	серый алеврит сильнопесчанистый
ст. 80	51°29'54.41"/ 104°17'11.64"	118	<u>-</u> 0.16	<u>-</u> 0.026	** серый алеврит глинисто- песчанистый
ст. 81	51°29'35.25"/ 104°17'30.35"	62	<u>-</u> 0.02	<u>-</u> 0.023	серо-коричневый песок алевролитистый
ст. 82	51°31'48.60"/ 104°11'15.31"	38	<u>-</u> <0.01	<u>-</u> 0.008	серо-коричневый песок сильноалевролитистый
ст. 86	51°30'50.45"/ 104°16'17.58"	250	<u>-</u> 0.88	<u>-</u> 0.071	серо-синий алеврит глинисто-песчанистый
ст. 87	51°30'37.54"/ 104°17'42.42"	215	<u>-</u> 0.50	<u>-</u> 0.029	серо-голубой алеврит глинисто-песчанистый
ст. 89	51°30'15.46"/ 104°17'22.58"	165	<u>-</u> 0.19	<u>-</u> 0.026	серо-голубой алеврит глинисто-песчанистый
ст. 90	51°29'50.16"/ 104°17'41.39"	115	<u>-</u> <0.01	<u>-</u> 0.009	серо-голубой песок сильноалевролитистый
Южный район озера, фоновые участки					
ст. 101	51°36'38.40"/ 103°54'43.60"	60	<u>-</u> <0.01	<u>-</u> 0.003	коричнево-черный алеврит сильнопесчанистый
ст. 102	51°36'25.60"/ 103°55'40.30"	65	<u>-</u> <0.01	<u>-</u> 0.003	коричневый плотный алевролит сильнопесчанистый
ст. 103	51°37'18.40"/ 103°55'00.20"	120	<u>-</u> 0.07	<u>-</u> 0.104	серо-голубой алеврит песчанистый
ст. 104	51°37'02.35"/ 103°55'56.96"	120	<u>-</u> 0.04	<u>-</u> 0.017	серо-зеленый алеврит сильнопесчанистый
ст. 105	51°38'10.69"/ 103°55'29.89"	175	<u>-</u> 0.05	<u>-</u> 0.008	серый алеврит глинисто- песчанистый
ст. 106	51°37'49.01"/ 103°56'29.20"	180	<u>0.03</u> <0.01	<u>0.012</u> 0.007	коричневый алеврит сильнопесчанистый

* – В числителе приведены концентрации метана и сульфидной серы, измеренные в период проведения исследований 5–25 сентября 2014 г., в знаменателе – 3–20 сентября 2015 г.; ** – сверху находился слой желтовато-серого наилка (для анализа не отбирался). Прочерк (-) – измерения не проводились.

В период исследований, как и в предыдущие годы наблюдений (Федоров и др., 1997, 2007), максимальные концентрации метана в отложениях (1.81–3.69 мкг/г с.о.) были характерны для северного района озера, куда впадают воды рек Верхней Ангары и Кичеры. Здесь же зафиксированы и наиболее высокие концентрации сульфидной серы в отложениях (0.384–0.830 мг/г с.о.). Относительно высокие концентрации метана (1.85–2.69 мкг/г с.о.) и сульфидной серы (0.056–0.097 мг/г с.о.) определены также в отложениях отдельных станций (№№ 2-3, 4-3 и 7-2) профиля, проложенного вдоль устьевой зоны реки Селенги.

Содержание метана в донных отложениях большинства станций, расположенных в зоне влияния закрытого в 2013 году Байкальского целлюлозно-бумажного комбината, незначительно отличались от наблюдаемых в донных отложениях на фоновых участках – станции №№ 101–106 (до 0.07 мкг/г с.о.). Исключением являются донные отложения 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 (0.58–1.87 мкг/г с.о.) значительно превышали фоновые. В отложениях отдельных станций (№№ 70а и 86) южного района озера определены также и относительно высокие концентрации сульфидной серы (0.071–0.196 мг/г с.о.). Для большинства же станций этого района были характерны низкие ее концентрации, как правило, не превышающие 0.03 мг/г с.о.

Наблюдается отчетливая зависимость распределения концентраций метана и сульфидной серы от гранулометрического состава донных отложений (табл. 2), что характерно и для других водных объектов (Гарькуша, Федоров, 2010; Федоров и др., 2006, 2007). При этом, если с увеличением доли песчаной фракции (>0.05 мм) концентрации метана и сульфидной серы снижаются (рис. 2а), то с увеличением доли более тонкозернистых фракций (алевритовой и пелитовой размерности) их концентрации, наоборот, возрастают. Причем с пелитовой фракцией (<0.005 мм), доля которой не превышает 8.7% 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, сульфидной серы и гранулометрическим составом донных отложений выражается, в том числе, в увеличении концентраций данных показателей в направлении «пески → алевриты сильнопесчанистые и песчанистые → алевриты глинисто-песчанистые и песчано-глинистые → алевриты глинистые» (рис. 2б). В этом же направлении увеличивается и количество органического вещества (рис. 3а), которое наряду с содержанием растворенного кислорода в придонном слое воды обычно является основным фактором, лимитирующим скорости метаногенеза и сульфатредукции в донных отложениях (Кузнецов и др., 1985; Федоров и др., 2007; Гарькуша, Федоров, 2010 и др.). Сказанное подтверждается тесными прямолинейными зависимостями между $C_{орг}$ и концентрациями метана и сульфидной серы (рис. 3б), что характерно и для других водных

Таблица 2. Парные коэффициенты корреляции (r) между концентрациями метана, сульфидной серы, $C_{орг}$, $N_{орг}$ и гранулометрическими фракциями в донных отложениях

Определяемые показатели	CH ₄ , мкг/г с.о.	ΣH ₂ S, мг/г с.о.	Фракция, %			Влажность, %	C _{орг} , мг/г с.о.	N _{орг} , мг/г с.о.
			0.05–0.5 мм	0.005–0.05 мм	<0.005 мм			
CH ₄ , мкг/г с.о.	1.0	-	-	-	-	-	-	-
ΣH ₂ S, мг/г с.о.	0.62	1.0	-	-	-	-	-	-
Фракция 0.05–0.5 мм, %	-0.47	-0.55	1.0	-	-	-	-	-
Фракция 0.005–0.05 мм, %	0.48	0.56	-0.99	1.0	-	-	-	-
Фракция <0.005 мм, %	0.33	0.36	-0.78	0.73	1.0	-	-	-
Влажность, %	0.48	0.53	-0.82	0.82	0.63	1.0	-	-
C _{орг} , мг/г с.о.	0.68	0.63	-0.77	0.78	0.53	0.79	1.0	-
N _{орг} , мг/г с.о.	0.50	0.53	-0.68	0.68	0.49	0.62	0.81	1.0

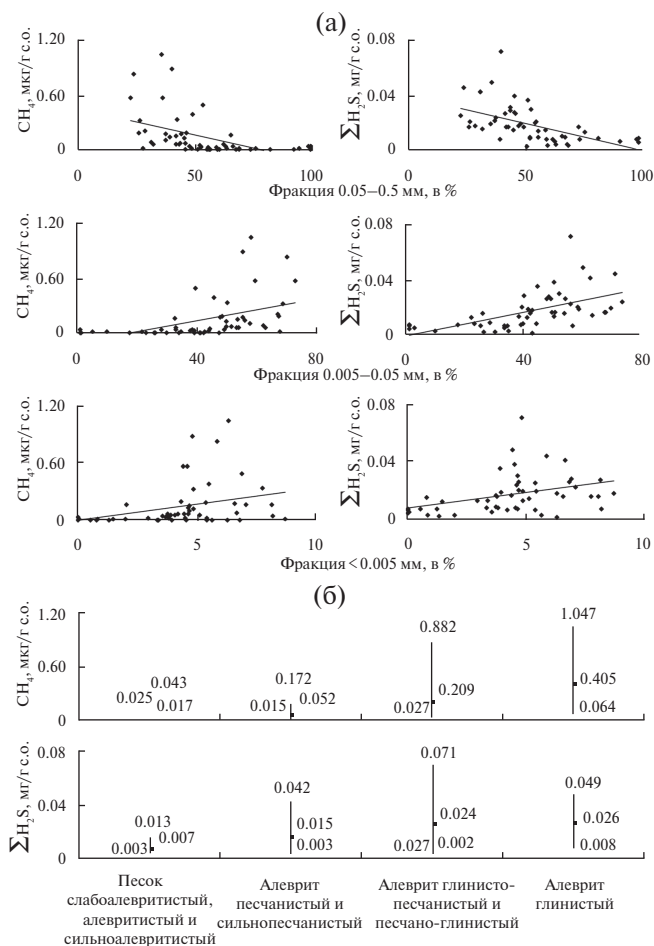


Рис. 2. Изменение концентраций метана и сульфидной серы (ΣH_2S) в зависимости от гранулометрического состава (а) и литологических типов донных отложений (б) исследуемых районов озера Байкал (по данным 2015 г.). На рис. 2б приведены минимальные, средние и максимальные концентрации метана и сульфидной серы в донных отложениях различных литологических типов.

объектов (Гарькуша, Федоров, 2010; Федоров и др., 2006; 2007).

Такие же тесные корреляционные связи наблюдаются между концентрациями изученных восстановленных газов и $N_{орг}$ (рис. 4а). Обращает внимание, что в среднем во всех исследованных районах озера, за исключением зоны БЦБК, отношение $C_{орг}/N_{орг}$ не превышает 10 (рис. 4б), что свидетельствует о преимущественно автохтонном происхождении органического вещества осадков (Леин и др., 2000). Увеличение поступления в донные отложения южного района озера вместе со стоками БЦБК и г. Байкальска значительной примеси терригенного органического вещества сказывается на росте средней величины отношения $C_{орг}/N_{орг}$ до 11.9 (макси-

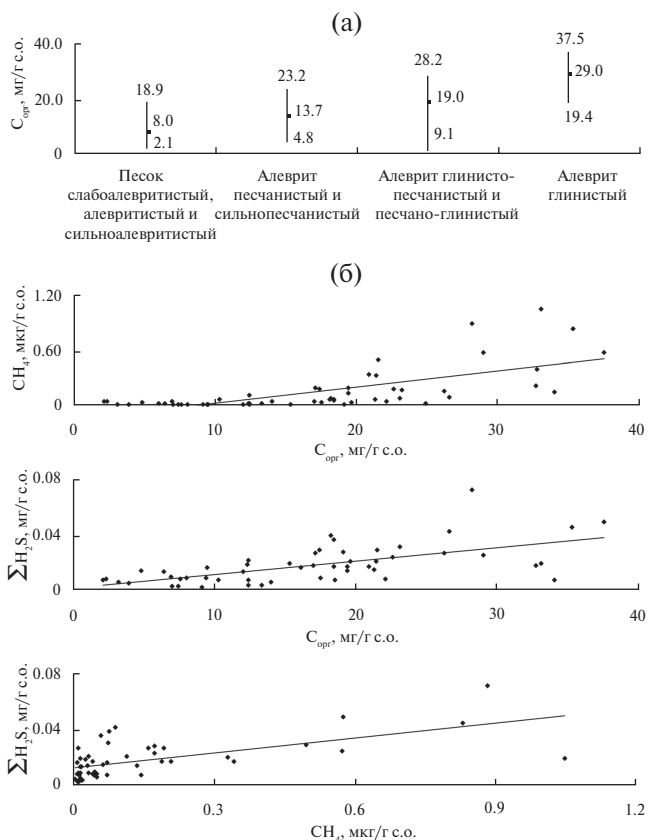


Рис. 3. Изменение концентрации $C_{орг}$ в зависимости от литологических типов донных отложений (а), а также зависимости между концентрациями $C_{орг}$, метана и сульфидной серы (б) в отложениях исследованных районов озера Байкал (по данным 2015 г.).

мум – 26.8). На фоновых участках южного района озера это отношение колеблется в диапазоне 5.5–10 (в среднем 8). Наблюдается тенденция снижения значения отношения $C_{орг}/N_{орг}$ по мере увеличения крупности слагающих отложения фракций (рис. 4б).

Ингибирующее влияние процесса сульфат-редукции на образование метана в изученном верхнем слое донных отложений озера Байкал, характерное для некоторых водных объектов, и особенно для восстановленных морских осадков и озер с высоким содержанием сульфатов (Кузнецов и др., 1985; Леин, Иванов, 2009; Федоров и др., 2007; Winfrey, Zeikus, 1977 и др.), не установлено. Распределение концентраций метана и сульфидной серы, а также ранее полученные данные по изотопному составу серы и кислорода сульфатных ионов (Федоров и др., 1992) свидетельствуют об интенсивных процессах сульфатредукции на тех же станциях, где фиксируются и наиболее высокие концентрации метана, что выражается тесной прямоли-

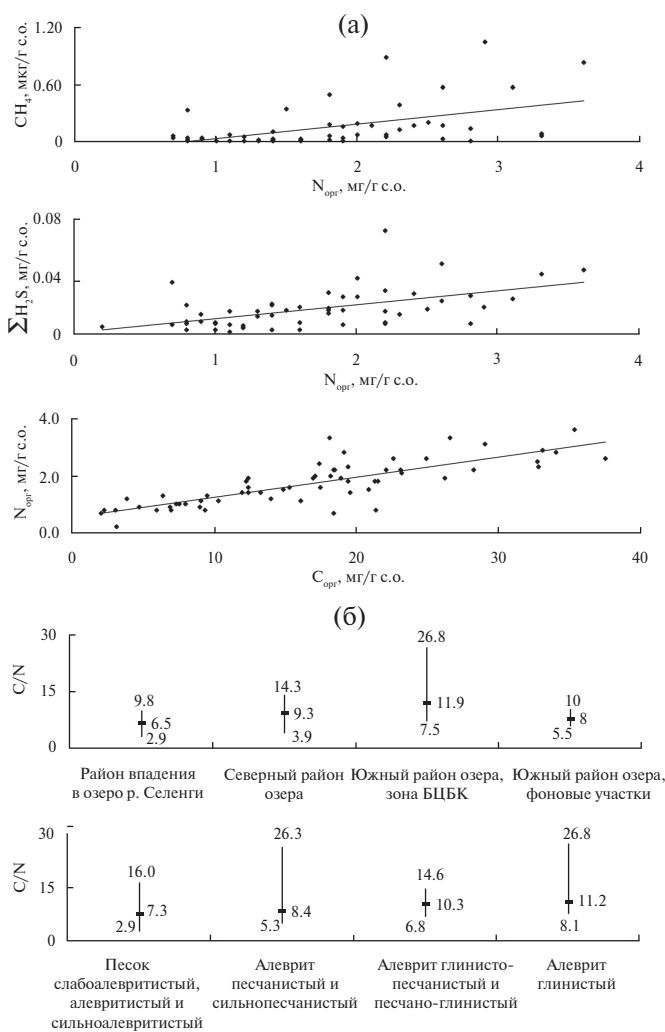


Рис. 4. Зависимости между концентрацией $N_{орг}$ и концентрациями метана, сульфидной серы и $C_{орг}$ (а) в отложениях исследованных районов озера Байкал, а также изменение величины отношения $C_{орг}/N_{орг}$ в зависимости от района исследования и литологических типов донных отложений (б) (по данным 2015 г.).

нейной связью между данными показателями (рис. 3б). Это указывает на сопряженные процессы их генерации, особенно интенсивной на участках постоянного антропогенного давления, каковыми являются районы впадения некоторых рек и зона подводного сброса сточных вод закрытого БЦБК. На таких участках происходит накопление повышенного количества органического вещества, а также сульфатов (Гоман, 1975; Федоров, 1999), что нивелирует конкурентные взаимоотношения между сульфатредуцирующими и метанобразующими бактериями за обладание питательными субстратами (Winfrey, Zeikus, 1977; Кузнецов и др., 1985; Федоров и др., 2007). Обнаружение таких же тесных прямолинейных зависимостей между концентрациями сульфид-

ной серы и метана в донных отложениях Рыбинского водохранилища (Федоров и др., 2007), устьевых участков рек Северная Двина (Гарькуша, Федоров, 2014) и Дон (Гарькуша, Федоров, 2010) свидетельствует о распространенности описанной взаимосвязи в отложениях пресноводных объектов на участках, подверженных мощному антропогенному давлению. Не исключено также, что данное явление связано с развитием альтернативных процессов генерации восстановленных газов, которые контролируются не ингибирующими друг друга бактериальными консорциумами (Гарькуша, Федоров, 2014). Это, прежде всего, процесс образования сероводорода с участием гнилостных бактерий (Федоров и др., 2004а). Определенный вклад в генерацию сульфидной серы может вносить гидролиз древесины, затопленной в зонах впадения рек, а также деструкция сульфатного лигнина, поступившего в озеро Байкал при производстве целлюлозы на БЦБК (Гарькуша, Федоров, 2014). По всей видимости, некоторое количество сероводорода (до 11%, по данным Леин, Иванова, 2009; Jorgensen et al., 2001) в условиях восстановленных осадков может образовываться сульфатредуцирующими бактериями синхронно с процессом окисления метана анаэробными метанотрофными археями, филогенетически близкими к метаногенам (Voetius et al., 2000), что также будет способствовать усилению связи между концентрациями метана и сульфидной серы.

Ряд станций, характеризующихся высокими концентрациями метана (станции №№ 405, 406, 412 и 25) и сульфидной серы (станции №№ 406, 412, 415, 22, 81 и 103), при относительно большой доле песчаных частиц и невысоком содержании $C_{орг}$, существенно отклоняются от линий, аппроксимирующих все описанные зависимости. Поэтому при представлении зависимостей на рисунках 2а, 3б, 4а и при расчете коэффициентов корреляции, приведенных в табл. 2, эти станции не учитывались. Повышенные содержания данных показателей, несмотря на относительно невысокие значения $C_{орг}$, могут быть обусловлены большей лабильностью органического вещества в отложениях этих станций, приуроченных в основном к зонам впадения рек и сброса сточных вод БЦБК, а для сульфидной серы – также и высокими концентрациями сульфатов.

По данным Лимнологического института АН СССР (Государственные доклады ..., 2004–2015), среднее содержание сульфидной серы в отложениях Северного Байкала с конца 50-х и в 60-е годы прошлого века было на уровне 0.06 мг/г

с.о., в Южном Байкале несколько меньше — до 0.05 мг/г. По данным исследований, проведенных в конце 70-х годов в Южной и Северной акваториях озера (Лазо, 1980), концентрация сульфидной серы, которая была представлена в основном коллоидным сульфидом железа — гидротроилитом, варьировала в пределах 0.01–1.03 мг/г (в среднем 0.10 мг/г), с максимальными значениями в отложениях Северной котловины. В периоды исследований, проведенных Иркутским УГМС с 2000 по 2014 гг. (Государственные доклады..., 2004–2015), максимальные концентрации сульфидной серы также наблюдались в отложениях Северного района озера — от 0 до 0.54 мг/г (в среднем за период с 2000 по 2014 г. до 0.11 мг/г). Несколько меньшие концентрации были характерны для района сброса сточных вод БЦБК — от 0 до 0.24 мг/г (в среднем до 0.07 мг/г) и района впадения реки Селенги — от 0 до 0.26 мг/г (в среднем до 0.05 мг/г). По данным нашей экспедиции, проведенной в сентябре 2014 г., концентрация сульфидной серы в донных отложениях изменялась в пределах 0.005–0.19 мг/г (в среднем 0.02 мг/г), с максимальными значениями в Северном районе озера (в среднем 0.06 мг/г) и минимальными — в районе сброса сточных вод БЦБК (в среднем 0.01 мг/г), что в целом согласуется с данными Иркутского УГМС за этот период. Следует отметить, что, начиная с 2013 года, методика определения содержания сульфидной серы в отложениях озера Байкал Иркутским УГМС была усовершенствована и стала идентичной методике, применяемой авторами в ходе исследований в 2014 и 2015 годах. Построенная авторами настоящей статьи по средним за 1989–2014 годы данным, приведенным в работах (Государственные доклады ..., 2004–2015), зависимость между содержаниями $C_{\text{орг}}$ и сульфидной серы в отложениях озера Байкал (рис. 5) указывает на отчетливую связь между данными компонентами ($r = 0.54$, $P < 0.01$), что

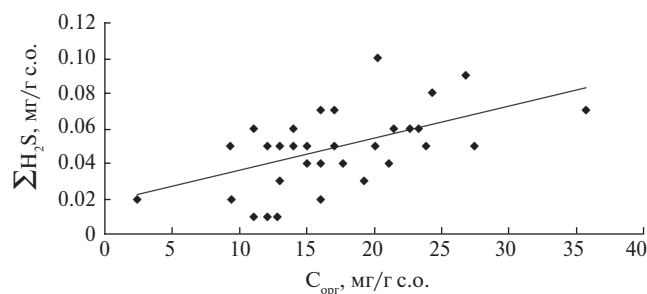


Рис. 5. Зависимость между содержаниями $C_{\text{орг}}$ и сульфидной серы в отложениях озера Байкал, построенная по средним за 1989–2014 годы данным, приведенным в работах (Государственные доклады ..., 2004–2015).

согласуется с результатами наших исследований (см. выше).

В табл. 3 приведен ряд имеющихся к настоящему моменту данных по концентрациям метана в донных отложениях озера Байкал. Как видно из таблицы, максимальные концентрации газа в отложениях приурочены к зоне впадения реки Фролихи в одноименную губу, расположенную в северной части озера, несколько меньшие — к зонам впадения рек Верхней Ангары и Кичеры. Это обусловлено накоплением органического вещества в таких зонах, что благоприятно для протекания метаногенеза и сульфатредукции (Намсараев и др., 1995а, б; Федоров и др., 1997; 2007).

Отдельно можно отметить anomalously высокую концентрацию метана (112 мл/дм³) в донных отложениях глубоководной зоны Южной котловины озера (станция «Посольская Банка»), зафиксированную в 50 см от поверхности дна, что связано с близким залеганием газовых гидратов (Павлова и др., 2014). Здесь же, в газонасыщенных отложениях над газогидратсодержащими илами до глубины 40–50 см сохранялась заметная активность сульфатредуцирующих бактерий, в то время как на мелководных станциях активная сульфатредукция ограничивалась 5–15-сантиметровым горизонтом (Пименов и др., 2014). В поверхностных горизонтах отложений данной станции концентрация метана заметно снижается и мало отличается от его содержания в донных отложениях, расположенных вне зон нахождения газогидратов (табл. 3).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В период исследований в 2014 и 2015 гг., как и в предыдущие годы наблюдений, максимальные концентрации метана в донных отложениях озера Байкал были характерны для северного района, куда впадают воды рек Верхней Ангары, Кичеры, отдельных станций профиля, проложенного вдоль устьевой зоны реки Селенги, а также станций, расположенных в зоне подводного выпуска сточных вод г. Байкальска и БЦБК, закрытого в 2013 году. Это связано с активным поступлением органического вещества в донные отложения таких зон, и его последующим разложением до субстратов, используемых метаногенными археями. Сопоставление распределения концентраций метана и сульфидной серы свидетельствует об активной сульфатредукции на тех же станциях, где фиксируются и наиболее высокие концентрации метана, что

Таблица 3. Обобщенные данные по концентрации метана в донных отложениях озера Байкал (мкл/дм³ влажного осадка)

Район отбора проб	Дата отбора проб					
	07.1988 ¹	08.1994 ^{1,2}	1991–2000 ³	07.2012 ^{4,5}	09.2014 ⁶	09.2015 ⁶
<i>Северная котловина озера</i>						
Мелководная зона, глубина 0.5–200 м	$\frac{<10-18\ 400}{1890\ (9)^*}$	-	-	-	$\frac{10-1020}{310\ (5)}$	$\frac{<10-410}{90\ (15)}$
Губа Фролиха, глубина 22–690 м	-	-	$\frac{6-81\ 700}{6008\ (13)}$	-	-	-
<i>Глубоководные участки</i>						
Центральная котловина озера, мыс Заворотный, глубина 825 м	-	-	$\frac{8-1000}{340\ (3)}$	-	-	-
<i>Южная котловина озера</i>						
Зона впадения в озеро р. Селенги, глубина 25–50 м	-	-	-	-	$\frac{10-850}{240\ (10)}$	$\frac{<10-220}{60\ (12)}$
Посольская Банка: • мелководная зона (51–111 м), горизонт 0–20 см • глубоководная зона (500–850 м) – в 0–50 см от поверхности и в пределах 25 см над газогидратами	-	-	-	до 1028 2057– 112000	-	-
Район БЦБК, глубина 15–250 м	$\frac{20-6550}{520\ (15)}$	$\frac{<10-1460}{200\ (34)}$	-	-	$\frac{20-400}{110\ (9)}$	$\frac{<10-390}{40\ (33)}$
Район Хара-Муринской банки, глубина 15–200 м	-	$\frac{20-790}{190\ (9)}$	-	-	-	-

* – В числителе приведены пределы изменения, в знаменателе – среднее значение, в скобках – количество измерений, прочерк (-) – нет данных. ¹ – по данным (Федоров и др., 1997), ² – по (Федоров и др., 2007), ³ – по (Дагурова и др., 2004), ⁴ – по (Пименов и др., 2014), ⁵ – по (Павлова и др., 2014), ⁶ – данная работа.

указывает на сопряженные процессы их генерации, особенно интенсивные в районах впадения крупных рек и зоне сброса в озеро сточных вод.

Приуроченность повышенных концентраций метана к районам антропогенного давления и зонам впадения крупных рек, и его тесная связь с концентрациями $C_{орг}$, $N_{орг}$ и сульфидной серы в донных отложениях свидетельствуют о преобладании в отложениях исследованных участков метана современного бактериального происхождения. Существование повышенных или пониженных концентраций метана и сульфидной серы в изученных горизонтах отложений оз. Байкал наряду с различиями в мощности антропогенного влияния обусловлено изменчивостью условий (глубина, течения, наличие притоков и т.п.) и темпов осадконакопления, определяющих гранулометрический состав, содержание и лабильность органического вещества, и, как следствие, окислительно-восстановительные условия и интенсивность метаногенеза и сульфатредукции.

Обобщение и анализ наших исследований и данных многолетних систематических наблюдений Иркутского УГМС за динамикой сульфидной серы показали, что ее концентрации в целом подвержены незначительным временным флуктуациям, связанным главным образом с изменчивостью количества органического вещества, поступающего в отложения озера. В то же время, несмотря на то, что первые данные об уровне содержания метана в озере появились более чем 20 лет назад, отсутствие систематических наблюдений, их эпизодичность еще не позволяет говорить о каких-либо четких временных трендах в динамике концентраций метана в донных отложениях озера. Для обоснованно установленных изменений необходимо проведение систематических сезонных наблюдений за уровнем концентраций метана и сульфидной серы, главным образом в глубоководной зоне озера и очагах антропогенного давления, каковыми являются зоны впадения крупных рек и район

подводного выпуска сточных вод г. Байкальска и ныне закрытого БЦБК.

Благодарности

Авторы благодарят заведующего лабораторией гидрохимии озер Гидрохимического института, к.г.-м.н. С.А. Резникова за любезно предоставленные данные анализов содержания $C_{орг}$, $N_{орг}$ и гранулометрического состава донных отложений.

Источник финансирования

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01229).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аниканова М.Н. (2009) Соединения серы сточных вод Байкальского целлюлозно-бумажного комбината (состав, методы анализа, мониторинг). М.: Научный мир, 128 с.
- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. (2014) Метан в воде и донных отложениях устьевой области Северной Двины в зимний период. *Океанология* **54**(2), 178–188.
- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А. (2010) Метан в устьевой области реки Дон. Ростов-на-Дону – Москва: ЗАО “Ростиздат”, 181 с.
- Гарькуша Д.Н., Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С. (2013) Метан как индикатор условий раннего диагенеза и экологического состояния водных экосистем. *Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Серия естественные науки* (6), 78–82.
- Геодекян А.А., Авилов В.И., Авилова С.Д. (1990) Геоэкологические исследования Байкала. *ДАН СССР* **310**(6), 1442–1446.
- Гоман Г.А. (1975) Бактериальное восстановление сульфатов и окисление сульфидов в грунтах Байкала. *Гидробиологический журнал* **11**(5), 18–22.
- Государственные доклады “О состоянии озера Байкал и мерах по его охране...” в 2003, 2004, ..., 2014 гг. Иркутск: Сибирский филиал ФГУНПП “Росгеолфонд”.
- Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Обжиров А.И., Верещагина О.Ф., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А. (2013) Окисление метана в водной толще озера Байкал. *ДАН* **451**(3), 332–335.
- Дагурова О.П., Намсараев Б.Б., Козырева Л.П., Земская Т.И., Дулов Л.Е. (2004) Бактериальные процессы цикла метана в донных осадках озера Байкал. *Микробиология* **73**(2), 248–257.
- Кузнецов С.И., Саралов А.Е., Назина Т.Н. (1985) Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. М.: Наука, 213 с.
- Лазо Ф.И. (1980) Геохимия серы в донных отложениях озера Байкал. *Геохимия* (1), 109–115.
- Леин А.Ю., Иванов М.В. (2009) Биогеохимический цикл метана в океане / Отв. ред. А.П. Лисицын. М.: Наука, 576 с.
- Леин А.Ю., Пименов Н.В., Саввичев А.С., Павлова Г.А., Русанов И.И., Миллер Ю.М., Иванов М.В. (2000) Геохимические особенности диагенеза голоценовых отложений в районе архипелага Шпицберген. *Океанология* **40**(2), 247–256.
- Намсараев Б.Б., Дулов Л.Е., Земская Е.Б., Карабанов Е.В. (1995а) Геохимическая деятельность сульфатредуцирующих бактерий в донных осадках озера Байкал. *Микробиология* **64**(3), 405–410.
- Намсараев Б.Б., Дулов Л.Е., Соколова Е.Н., Земская Т.И. (1995б) Бактериальное образование метана в донных осадках озера Байкал. *Микробиология* **64**(3), 411–417.
- 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. (2014) Образование углеводородных газов микробным сообществом донных осадков озера Байкал. *Микробиология* **83**(6), 694–702.
- Пименов Н.В., Захарова Е.Е., Брюханов А.Л., Корнеева В.А., Кузнецов Б.Б., Турова Т.П., Погодаева Т.В., Калмычков Г.В., Земская Т.И. (2014) Активность и структура сообщества сульфатредуцирующих бактерий в осадках Южной котловины оз. Байкал. *Микробиология* **83**(2), 180–190.
- РД 52.24.511-2013 (2013) Массовая доля метана в донных отложениях. Методика измерений газохроматографическим методом с использованием анализа равновесного пара. Росгидромет, ГУ “Гидрохимический институт”, 19 с.
- РД 52.24.525-2011. (2011) Массовая доля сульфидной серы в донных отложениях. Методика выполнения измерений фотометрическим методом с N,N-диметил-п-фенилендиаминном. Росгидромет, ГУ “Гидрохимический институт”, 26 с.
- Федоров Ю.А. (1999) Стабильные изотопы и эволюция гидросферы. М.: МО РФ Центр “Истина”, 370 с.
- Федоров Ю.А., Никаноров А.М., Гриненко В.А., Кроузе Р. (1992) Первые данные о распределении изотопного состава серы сульфатов в воде озера Байкал. *ДАН* **325**(4), 814–817.
- Федоров Ю.А., Гриненко В.А., Устинов В.И. (2004а) Особенности фракционирования изотопов серы и кислорода сульфатов озера Большой Тамбукан. *Геохимия* (1), 111–115.
- Федоров Ю.А., Никаноров А.М., Тамбиева Н.С. (1997) Первые данные о распределении содержания биогенного метана в воде и донных отложениях оз. Байкал. *ДАН* **353**(3), 394–397.
- Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. (2006) Влияние природных и антропогенных факторов и процессов на распределение концентрации метана в воде и донных отложениях Ладожского озера. *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология* (5), 412–424.

- Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н. (2004б) Метан как показатель экологического состояния пресноводных водоемов (на примере озер Валдай и Ужин). *Метеорология и гидрология* (6), 88–96.
- Федоров Ю.А., Тамбиева Н.С., Гарькуша Д.Н., Хорошевская В.О. (2007) Метан в водных экосистемах. 2-е изд., перераб. и доп. Ростов-на-Дону – Москва: ЗАО “Ростиздат”, С. 179–230.
- Япаскерт О.В. (2008) Литология: учебник для студентов ВУЗов. М.: Издательский центр “Академия”, 336 с.
- Boetius A., Ravensschlag K., Schubert C., Rickert D., Widdel F., Gieseke A., Amann R., Jorgensen B.B., Witte U., Pfannkuche O. (2000) A marine microbial consortium apparently mediating anaerobic oxidation of methane. *Nature* **407**(5), 623–627.
- Jorgensen B.B., Weber A., Zopfi J. (2001) Sulfate reduction and anaerobic methane oxidation in Black Sea sediments. *Deep-Sea Res.* **48**(PI), 2097–2120.
- Schmid M., De Batist M., Granin N.G., Kapitanov V.A., McGinnis D.F., Mizandrontsev I.B., Obzhairov A.I., Wüest A. (2007) Sources and sinks of methane in Lake Baikal: A synthesis of measurements and modeling. *Limnol. Oceanogr.* **52**(5), 1824–1837.
- Winfrey M.R., Zeikus I.G. (1977) Effect of sulphate on carbon and electron flow during microbial methanogenesis in freshwater sediments. *Appl. Environ. Microbiol.* **22**(2), 275–281.
- Zemskaya T., Egorov A., Khlystov O., Shubenkova O., Nam-saraev B., Chernitsina S., Dagurova O., Kalmychkov G., Grachev M. (2005) Biogeochemical cycles of methane in Lake Baikal. *Geophys. Res. Abstr.* **7**, 03994.

METHANE AND SULFIDE SULFUR IN THE BOTTOM SEDIMENTS OF LAKE BAIKAL

© 2019 D. N. Gar’kusha^{a,*}, Yu. A. Fedorov^a, Yu. A. Andreev^b,
N. S. Tambieva^b, O. A. Mikhailenko^b

^a Institute for Earth Sciences, Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russia

^b Hydrochemical Institute, Rostov-on-Don, Russia

*e-mail: gardim1@yandex.ru

Received: 27.05.2017

Received version received: 20.10.2017

Accepted: 13.11.2017

The paper analyzes data on the distribution of methane and sulfide sulfur concentrations in the upper layer of the bottom sediments in different areas of Lake Baikal obtained during expeditions in 2014 and 2015. During the study, concentrations of methane and sulfide sulfur in lake sediments varied from <0.01 to 3.69 µg/g dry sediment (mean 0.34 µg/g) and from 0.002 to 0.830 mg/g dry sediment (mean 0.042 mg/g), respectively. The maximum concentrations of methane were typical of the Northern region, where the waters of the Upper Angara, Kichera rivers flow, and separate stations of profile along the estuary zone of the Selenga River, as well as stations located in the zone of underwater wastewater discharge of Baikalsk and the Baikal pulp and paper mill closed in 2013. A comparison of the distribution of methane and sulfide sulfur concentrations indicates an intense sulfate reduction at the stations with the highest methane concentrations, which suggests the conjugate processes of their generation. Variations of methane and sulfide sulfur concentrations in the studied upper layers of Lake Baikal sediments are caused by the differences in the anthropogenic impact and also by the variability of sedimentation conditions that determine the grain size composition and the content of organic matter, and, as a consequence, the intensity of methanogenesis and sulfate reduction.

Keywords: bottom sediments, grain size composition, methane, sulfide sulfur, organic carbon, organic nitrogen, spatial distribution

(For citation): Gar’kusha D.N., Fedorov Yu.A., Andreev Yu.A., Tambieva N.S., Mikhailenko O.A. Methane and Sulfide Sulfur in the Bottom Sediments of Lake Baikal. *Geokhimiya*. 2019;64(4):427–439. DOI: 10.31857/S0016-7525644427-439)