

**Потоки углерода в процессе газообмена CO₂ и CH₄
в системе «атмосфера – водная среда»
прибрежной зоны Байкала**

*Д.А. Пестунов¹⁾, В.М. Домышева²⁾, А.М. Шамрин¹⁾, М.В. Сакирко²⁾,
М.В. Панченко¹⁾**

¹⁾Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,
Россия, 634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²⁾Лимнологический институт СО РАН,
Россия, 664033, г. Иркутск, ул. Улан-Баторская, 3

* Адрес для переписки: *pmv@iao.ru*

Реферат. В статье рассматриваются результаты измерений концентраций углекислого газа и метана в приземной атмосфере и их потоков в системе «атмосфера – водная среда» на акватории, примыкающей к западному побережью Южного Байкала (координаты 51°54'N, 105°05'E). Измерения проводились с 2012 г. по 2023 г. Показано, что в пункте наблюдений сток из атмосферы массы углекислого газа в озеро в расчете на один квадратный метр водной поверхности за весь период открытой воды приблизительно в 100 раз превышает выход метана из водной среды в атмосферу. С учетом соотношения этих потоков и потенциалов глобального потепления (ППП) CO₂ и CH₄ сделано заключение о том, что на исследуемой акватории в период открытой воды сток углекислого газа, как минимум, компенсирует радиационное воздействие, обусловленное эмиссией метана.

Ключевые слова. Байкал, газоанализатор, концентрация, потоки углекислого газа, потоки метана, суточный ход, углеродный цикл, радиационный эффект, потенциал глобального потепления.

**Carbon fluxes in the process of gas exchange of CO₂ and CH₄
in the “atmosphere – water” system
of the coastal zone of lake Baikal**

*D.A. Pestunov¹⁾, V.M. Domyшева²⁾, A.M. Shamrin¹⁾, M.V. Sakirko²⁾,
M.V. Panchenko¹⁾**

¹⁾V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
1, Square Academician Zueva, 634021, Tomsk, Russian Federation

²⁾Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
3, Ulan-Batorskaya, Irkutsk, 664033, P.O. Box 278, Russian Federation

*Correspondence address: *pmv@iao.ru*

Abstract. The article discusses the results of measurements of the concentrations of carbon dioxide and methane in the surface atmosphere and their fluxes in the “atmosphere-water” system in the aquatic area adjacent to the western coast of Southern Baikal (coordinates 51°54'N, 105°05'E). The measurements were carried out in 2012-2023. It was shown that at the observation point, the flux of carbon dioxide from the atmosphere into the lake per square meter of water surface over the entire period of open water is approximately 100 times higher than the release of methane from the lake into the atmosphere. Taking into account the relationship between these fluxes and global warming potentials (GWP) of CO₂ and CH₄, it was concluded that in the aquatic area, during the period of open water, the carbon dioxide absorption at least compensates radiative effect of methane emission.

Keywords. Baikal, gas analyzer, concentration, carbon dioxide fluxes, methane flux, diurnal course, carbon cycle, radiative effect, global warming potential.

Введение

В настоящее время одним из наиболее сложных вопросов, обсуждаемых на уровне правительств государств и международного научного сообщества, является проблема определения вклада антропогенных и природных источников в формирование уровней содержания парниковых газов в атмосфере планеты. По мнению многих исследователей, именно рост антропогенных эмиссий является ключевым фактором современного увеличения их концентрации в атмосфере и изменения климата (Семенов, 2004).

Обширная территория и разнообразие природных комплексов Сибири, которые во всех сценариях рассматриваются как один из важнейших регуляторов углеродного цикла в Северном полушарии, требуют особо тщательного изучения (Атлас. Байкальский регион: общество и природа, 2021; Оценка потоков парниковых газов..., 2023; Quegan et al., 2011; Tranvik et al., 2009).

Экосистема озера Байкал, являясь уникальным природным объектом мирового значения, несомненно, представляет особый интерес также и в этом отношении. В современный период, благодаря уникальной трофической цепи озера (по крайней мере, ежегодного ее обновления в фотической зоне), Байкал всегда «молодой». Действительно, многолетние исследования химического состава воды показали, что колебания концентраций основных катионов и анионов не выходят за пределы $\pm 1\%$ от среднего и, следовательно, вода Байкала может рассматриваться как естественный эталон чистой воды (Грачев и др., 2004).

Основная цель проводимых нами многолетних исследований – изучение межгодовой, сезонной и суточной изменчивости концентраций и потоков углеродосодержащих газов в системе «атмосфера – водная среда» и их связи с биологическими и гидрологическими процессами в воде оз. Байкал. Эта задача – многофакторная и для ее выполнения необходимо привлечение большого объема знаний практически обо всех процессах, определяющих функционирование экосистемы озера и экосистем окружающих его территорий. До начала наших работ измерения концентраций углекислого газа и метана в

атмосфере Байкала и их потоков в системе «атмосфера – водная среда» не проводились. Определение содержания CO_2 (Мизандронцев и др., 1998) и CH_4 (например, Karitanov et al., 2007) в воде осуществлялось только по результатам анализа проб, отобранных при стоянке исследовательских судов на станциях в периоды проведения экспедиций. Соответственно, только отдельные короткие серии наблюдений и отсутствие прямых измерений потоков обуславливали большую неопределенность результатов оценки газообмена в системе «атмосфера – водная среда».

Учитывая актуальность проблемы, по предложению академика М.А. Грачева в 2001 г. был сформирован мультидисциплинарный коллектив специалистов. Для проведения регулярных, многолетних комплексных наблюдений в 2006 г. была организована Байкальская атмосферно-лимнологическая обсерватория (ЛИН СО РАН и ИОА СО РАН, 2020). С 2003 года в прибрежной зоне были начаты исследования углекислого газа в системе «атмосфера – водная среда», а с 2012 – одновременные измерения содержания углекислого газа и метана в приземном слое атмосферы, их концентраций в поверхностной и придонной воде, а также их потоков.

В настоящей работе обсуждаются результаты оценки соотношения потоков углекислого газа и метана в углеродном цикле в системе «атмосфера – водная среда», основанные на серии наблюдений в период открытой воды с 2012-2023 гг. в прибрежном районе на западном побережье Южного Байкала. Цель данной публикации – оценить интенсивность газообмена CO_2 и CH_4 между атмосферой и водной средой в этом районе. Это необходимо как для верификации математических климатических моделей, так и для объективной оценки вклада изучаемой части оз. Байкал в формирование радиационного баланса климатической системы Земли.

Методы и материалы

Представленные в данной работе результаты получены на исследовательском стационаре Лимнологического института СО РАН, который находится на западном побережье Южного Байкала (координаты $51^{\circ}54'N$, $105^{\circ}05'E$). Измерения проводились на примыкающей к стационару акватории в прибрежной части озера. Это открытый залив с каменистым песчаным дном. Здесь от береговой линии на протяжении примерно 100-120 метров происходит постепенное увеличение глубины (до 5-5.5 метров), а затем в районе свала происходит резкое увеличение глубины до более, чем 1 000 м.

Принципиальным аспектом при изучении углеродосодержащих газов, кислорода и биогенных элементов, содержание которых в воде тесно связано с жизнедеятельностью водной биоты, является необходимость проведения наблюдений с хорошим временным разрешением для количественного описания суточного хода измеряемых характеристик. В дальнейшем в цикле наших работ было показано, что такой подход, основанный на анализе суточного хода в длинной серии измерений, дает возможность понять основные ритмы межгодовой и сезонной изменчивости и выявить воздействие конкрет-

ных факторов (Pestunov et al., 2017, Panchenko et al., 2020). Учитывая ранее опубликованные работы авторов, ниже мы ограничимся лишь кратким описанием приборного комплекса и методологии оценки потоков.

Приборный комплекс размещен на оконечности пирса на расстоянии 40 метров от берега. Глубина озера в месте отбора воды вследствие межгодовой и сезонной изменчивости уровня Байкала варьировала в диапазоне от 2 до 3 м. Здесь расположена мачта для измерения метеорологических характеристик, магистрали подачи воды и помещение для газоаналитического комплекса. Вблизи пирса в сторону открытой литорали определена зона отбора проб, где на поверхности воды размещается полупогружная камера для измерения потоков газов.

Исходя из поставленной задачи комплексного измерения физических, химических и биологических составляющих в ходе процесса газообмена в системе «атмосфера – водная среда» в литорали озера, из различных методов определения потоков газа был выбран, на наш взгляд, единственно приемлемый метод «плавающих камер». Этот выбор был продиктован спецификой проведения исследований в прибрежной зоне, т.е. на границе раздела существенно различающихся по рельефу и температурному режиму сред. Иные методы, применяемые в практике подобных измерений в морских, болотных и степных локациях (Goulden et al., 1996), требуют высокоточного определения средних концентраций исследуемого газа и метеорологических величин и их высших статистических моментов (Монин, Обухов, 1954). Более того, в рамках нашей задачи применение камеры имеет еще и то преимущество, что позволяет осуществить забор проб воды для анализа газового, химического и биологического состава непосредственно в месте определения потоков газов.

Суть метода можно кратко описать следующим образом. На поверхность воды каждый час опускается камера, в которой концентрации CO_2 и CH_4 соответствуют атмосферным значениям. Проветривание осуществляется естественным путем, пока камера в течение 40 минут находится в подвешенном над водой положении. После спуска камеры на воду в ней происходит газообмен: при выходе газа из воды его парциальное давление в камере увеличивается, а при стоке наоборот. При этом концентрации CO_2 и CH_4 в воздухе камеры непрерывно регистрируются в течение 15-20 мин. Зная исходную атмосферную концентрацию газов, объем камеры, площадь накрываемой поверхности и скорость увеличения или снижения концентрации каждого из газов в воздухе камеры, вычисляются значения потоков.

Измерения фактических значений концентраций углекислого газа и метана в поверхностной и придонной воде осуществляются с применением эквипракторов. Эквипрактор – это прибор, в который непрерывно подается исследуемая вода и затем осуществляется ее распыление в герметичной камере. Здесь через определенное время устанавливается равновесное парциальное давление изучаемого газа между водой и воздухом, т.е. $p\text{CO}_2$ и $p\text{CH}_4$ в воздухе становится равным таковому в воде. Далее этот воздух поступает в газоанализатор, и концентрация газа в воде рассчитывается по измеренному равновесному парциальному давлению с учетом растворимости газа в воде и скорости ее подачи в

эквивалентатор. Для непрерывной подачи воды в эквивалентаторы в зоне отбора проб установлены два насоса («поверхность» – расположен на глубине 25-50 см и «дно» – на высоте 10 см от дна). По этим магистралям также производится отбор проб воды для лабораторного анализа содержания кислорода, биогенных элементов, хлорофилла и измерения флуоресцентных характеристик.

Регистрация парциального давления газов осуществляется газоанализатором Picarro G2301-f, обеспечивающим одновременное измерение парциального давления CO_2 (точность регистрации – 0.3 ppm) и CH_4 (точность регистрации – 3 ppb). В газоанализатор по заданной программе через систему автоматических клапанов поочередно поступает воздух из атмосферы, двух эквивалентаторов и плавающей камеры. По программе измерений осуществляется регулярное проветривание камеры, путем отрыва ее с водной поверхности.

Для отработки методики организации регулярных наблюдений в разные сезоны года было проведено несколько циклов измерений продолжительностью около 30 дней. Далее, основываясь на анализе полученных результатов, для изучения межгодовой и сезонной изменчивости суточного хода исследуемых характеристик было принято решение проводить регулярные серии измерений продолжительностью 10-15 суток. Как показал опыт, в такой отрезок времени обычно укладываются несколько синоптических процессов, а температурный режим воды и состояние биоты, как правило, не претерпевают кардинальных изменений. Это позволяет обеспечить получение вполне репрезентативных данных и оптимизировать материальные и трудовые затраты.

Результаты и обсуждение

Регулярные исследования концентраций углекислого газа в приводной атмосфере в воде и потоков на Байкале были нами начаты с 2003 г. Но только появление в 2012 г. высокоточного газоанализатора Picarro-G2301-f позволило начать одновременные измерения углекислого газа и метана. За период с марта 2012 г. по март 2024 г. во все сезоны было проведено 36 продолжительных серий комплексных наблюдений в прибрежной зоне Байкала.

Приступая к анализу обсуждаемых серий измерений, необходимо было оценить, насколько данные, полученные в одном наблюдательном пункте, отражают процессы, происходящие в прибрежной зоне озера в целом. Для решения этой задачи нами в летние периоды 2014 г. (Южный Байкал), 2016 г. (Северный Байкал) и 2017 г. (Средний Байкал) были проведены судовые измерения пространственного распределения содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере, поверхностной воде и определения преимущественного направления потоков. Регистрация парциального давления углекислого газа и метана в приводном слое атмосферы и поверхностном слое воды проводилась непрерывно по всей трассе, а измерение потоков осуществлялось при продолжительной стоянке судна вблизи берега. Результаты измерений выявили, что в летний период практически по всему периметру прибрежной зоны озера концентрации газов в приводной атмосфере варьировали незначительно, по трассе прохода судна в основном наблюдались только отрицательные значения разности парциаль-

ных давлений CO_2 между водой и атмосферой (т.е. поглощение водной средой), а давление метана в воде всегда превышало атмосферное (эмиссия). Только в закрытых заливах, испытывающих очевидное антропогенное воздействие, наблюдались потоки углекислого газа в атмосферу и аномально высокие концентрации метана (Panchenko et al., 2018). Результаты этого ограниченного цикла измерений по порядку величины соотношения потоков вполне соответствовали обсуждаемым в работе данным, полученным в летний период (средний суточный сток CO_2 $\text{мг м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ и выход CH_4 $\text{мкг м}^{-2} \text{ час}^{-1}$ с водной поверхности в атмосферу).

CO_2 и CH_4 в приводном слое атмосферы

На рис. 1 для каждого цикла в период с 2012 по 2024 гг. представлены статистические характеристики парциальных давлений CO_2 (а) и CH_4 (б) в приводном слое атмосферы на исследуемой акватории. Как видим из данных на рис. 1, несмотря на значительные вариации концентраций углекислого газа и метана в приводном слое атмосферы, обусловленных спецификой ветрового режима, за этот период отчетливо проявляется увеличение их среднего содержания. Очевидно, что детальный расчет наблюдающихся трендов в нашем массиве данных нецелесообразен (статистически ряды не однородны). В то же время сопоставление этого ряда с результатами мониторинговых измерений (Антонович и др., 2022; Тимохина и др., 2015; Belikov et al., 2019) показало, что по средним значениям концентраций CO_2 и CH_4 и по динамике их роста год от года представленные на рис. 1 данные вполне укладываются в диапазон изменчивости этих характеристик, наблюдаемых в разных экосистемах Сибири.

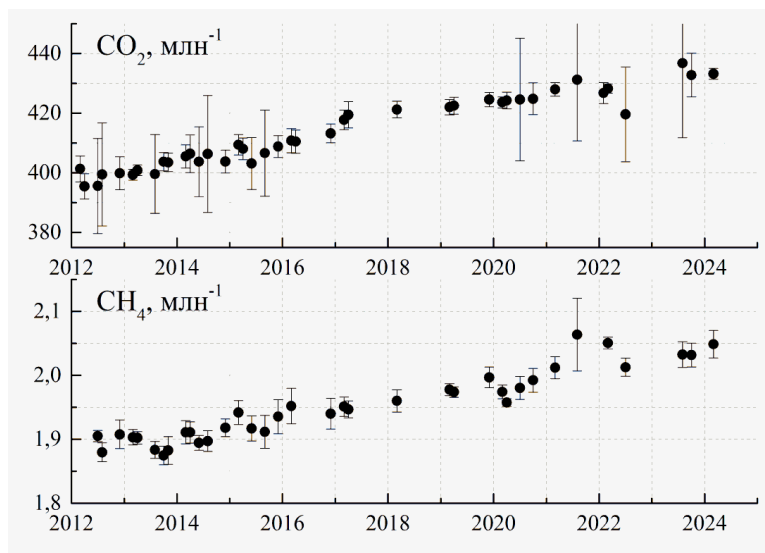


Рисунок 1. Концентрация CO_2 и CH_4 в приводном слое атмосферы в измерительных циклах март 2012 г. – март 2024 г.

Вертикальными отрезками указаны стандартные отклонения

Figure 1. CO_2 and CH_4 concentrations in the atmospheric layer above water in measurement cycles March 2012 – March 2024

The vertical bars indicate standard deviations

Потоки CO_2 и CH_4 в системе «атмосфера – водная среда»

Переходя к анализу потоков, в первую очередь, необходимо обратить внимание, что анализируемая серия наших наблюдений была проведена, когда на Байкале происходили значительные изменения уровня воды. В 2013 г. завершился относительно стабильный период, затем, с наступлением маловодных лет, в весенне-летний сезоны 2016-2017 гг. уровень достиг минимальной отметки, а с 2018 г. начался его рост и в весенние периоды 2021-2022 гг. наблюдались значения, близкие к критически максимальным (<https://allrivers.info/gauge/baykal>, Гармаев и др., 2019). Но, как отмечено в наших работах, анализ содержания растворенных газов и биогенных элементов в поверхностной воде Байкала показывает, что на фоне значительных сезонных и межгодовых вариаций их концентраций, обусловленных сильной изменчивостью региональных погодных факторов, однонаправленные тренды не проявляются (см. например, Panchenko et al., 2020).

Анализ потоков углекислого газа и метана в период открытой воды в прибрежной зоне Байкала в 2012-2023 гг. был проведен на основе данных 16 стандартных серий измерений. На рис. 2а,б для полного массива имеющихся данных в разные месяцы в период открытой воды представлены среднечасовые значения в суточном ходе потоков. Вертикальными тонкими линиями указаны диапазоны «среднемноголетнее значение \pm среднеквадратическое отклонение».

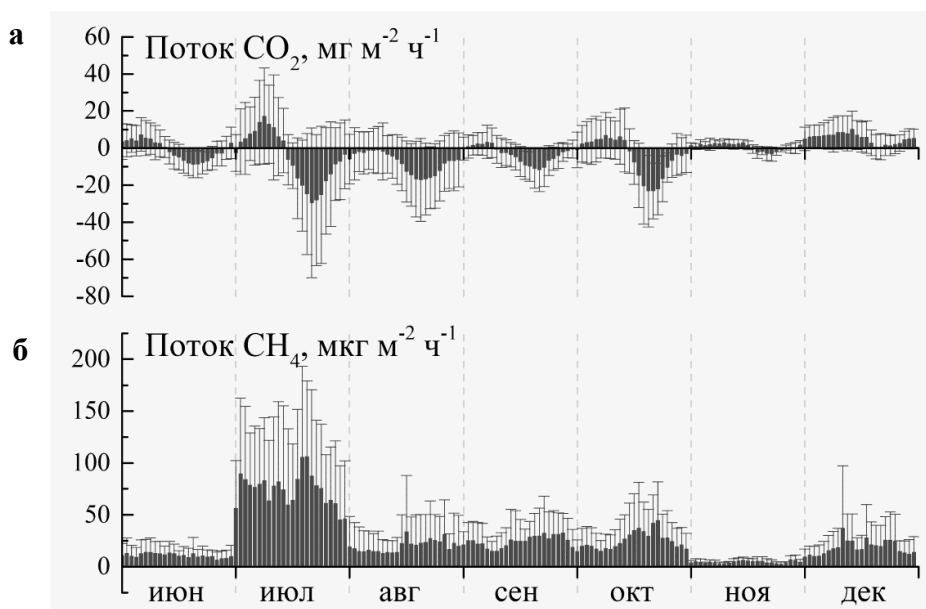


Рисунок 2. Среднечасовые значения потоков в их суточном ходе в разные месяцы периода открытой воды для углекислого газа (а) и метана (б)

Отрицательные значения соответствуют стоку в водную среду. Вертикальными тонкими линиями указаны диапазоны «среднемноголетнее значение \pm среднеквадратическое отклонение»

Figure 2. Mean hourly CO_2 (a) and CH_4 (b) fluxes in their daily patterns in different months for the open water period

Negative values correspond to sink into the aquatic environment. The vertical thin lines indicate the ranges of "mean annual value \pm standard deviation"

Как показали наши многолетние исследования, в течение всего года концентрация углекислого газа в воде (и потоков в теплый период) имеет хорошо выраженный суточный ход, характеристики которого регулируются интенсивностью и суточным ритмом фотосинтеза водной биоты (см., например, Pestunov et al., 2017). Отметим, что представленные на рис. 2а данные по потокам углекислого газа за период с 2012 по 2023 гг. хорошо согласуются с результатами измерений в течение предыдущего периода с 2003 г. Из рис. 2а видим, что наибольшее различие потоков CO_2 – ночного выхода и дневного стока – регистрируется в июле. В августе и сентябре в суточном ходе заметно превалирует дневной поток углекислого газа из атмосферы. Далее, к ноябрю амплитуда суточного хода снижается почти до нуля, а в декабре при постоянном выходе CO_2 в атмосферу в послеполуденное время наблюдается небольшое снижение потока.

Концентрация метана в воде определяется процессами иного пространственно-временного масштаба (см., например, Karitanov et al., 2007). Поток метана с поверхности озера всегда направлен в атмосферу, а сезонный и суточный ход практически не выражены (рис. 2б).

К совместной оценке потоков углекислого газа и метана в период открытой воды

Для того чтобы ориентировочно оценить баланс потоков CO_2 и CH_4 на основе их средних суточных значений (рис. 2а и 2б), был проведен расчет суммарных потоков за каждый месяц периода открытой воды, когда и происходит газообмен между водной поверхностью Байкала и атмосферой. В табл. 1 приведены оценки среднемесячных потоков F_{CO_2} и F_{CH_4} , их отношения $F_{\text{CO}_2}/F_{\text{CH}_4}$ и суммарные значения за весь период открытой воды, а в табл. 2 результаты их пересчета на чистый углерод С.

Таблица 1. Потоки углекислого газа и метана в период открытой воды

Table 1. Carbon dioxide and methane fluxes during the open water period

Обозначение, размерность	Средние потоки газов и их отношение							
	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	Весь период
F_{CO_2} , $\text{г м}^{-2} \text{мес.}^{-1}$	-1.7	-5.4	-9.	-1.6	-2.2	+0.3	+6.4	-13.1 г м^{-2}
F_{CH_4} , $\text{мг м}^{-2} \text{мес.}^{-1}$	9.1	41.8	14.3	17.7	15.4	3.3	18.2	+0.12 г м^{-2}
$F_{\text{CO}_2}/F_{\text{CH}_4}$	-187	-129	-629	-90	-143	+90	+351	-109

Итак, по нашим данным, поглощение из атмосферы углекислого газа в расчете на один квадратный метр поверхности воды в каждый месяц с июня по ноябрь по массе более чем в 90 раз (в августе – более чем в 600) превышает эмиссию метана. В ноябре и декабре, когда идет поступление этих газов в атмосферу, также поток углекислого газа намного превосходит поток метана.

Из табл. 2 следует, что в расчете на углерод его поглощение водной средой с потоками углекислого газа за период открытой воды суммарно в 40 раз превосходит эмиссию углерода с потоками метана.

Таблица 2. Потоки углерода в период открытой воды (пересчет данных табл. 1)

Table 2. Carbon fluxes during the open water period (recalculated data from Table 1)

Обозначение, размерность	Средние потоки углерода и их отношение							Весь период
	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	
C_{CO_2} , г м ⁻² мес. ⁻¹	-0.5	-1.5	-2.5	-0.4	-0.6	+0.1	+1.8	-3.6 г м ⁻²
C_{CH_4} , мг м ⁻² мес. ⁻¹	6.8	30.7	10.7	13.3	11.6	2.5	13.7	+0.09 г м ⁻²
C_{CO_2}/C_{CH_4}	-74	-49	-234	-30	-5	+40	+131	-40

К сожалению, и до настоящего времени подобные измерения потоков парниковых газов в системе «атмосфера – водная среда» на Байкале проводятся только коллективом авторов этой работы, что не позволяет провести сравнения полученных данных.

Одним из важных результатов проведенного исследования является возможность на основе соотношения масс CO_2 и CH_4 провести оценку возможного радиационного эффекта, обусловленного их потоками. Для количественного определения способности вещества производить радиационное воздействие на систему «атмосфера – земная поверхность» во многих публикациях и документах зачастую используется понятие потенциала глобального потепления – ПГП или GWP – global warming potential (Семенов и др., 2018). При оценках радиационного эффекта от эмиссии конкретного газа ПГП рассматривается в CO_2 -эквиваленте. Соответствующие весовые коэффициенты зависят от времени прошедшего с момента поступления газа в атмосферу. По мере совершенствования радиационных моделей и различных сценариев климатических изменений оценка ПГП уточняется. К настоящему времени документы Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) рекомендуют в случае оценки последствий выброса метана на период 20 лет использовать $ПГП_{20} = 81.2$, а в вековом масштабе времени – $ПГП_{100} = 28$ (IPCC, 2022).

Очевидно, что полученная нами оценка отношения $F_{CO_2}/F_{CH_4}=109$ на основе ограниченного набора эмпирических данных может рассматриваться лишь как приблизительная. Но, ориентируясь на это значение ПГП и то обстоятельство, что, одновременно с выходом метана из атмосферы уходит углекислый газ, можно сделать следующий вывод: в период открытой воды на изучаемой нами акватории поглощение углекислого газа, как минимум, компенсирует радиационный эффект, обусловленный эмиссией метана.

Заключение

На основе наблюдений, проведенных с 2012 по 2023 гг. отдельными сериями в периоды открытой воды (июнь-декабрь) в прибрежной зоне на западном побережье Южного Байкала, сделан анализ данных измерений концентраций углекислого газа и метана в приводном слое атмосферы и их потоков в системе «атмосфера – водная среда». Выявлено, что за этот период в атмосфере наблюдается увеличение концентраций CO_2 и CH_4 , которое вполне согласуется с процессами, происходящими в атмосфере разных экосистем Сибири. Определено, что на исследуемой акватории в периоды открытой воды (июнь-декабрь) поглощение углерода водной средой с потоками CO_2 , в 40 раз превосходит его эмиссию, обусловленную потоками метана.

Показано, что за период июнь-декабрь суммарный поток углекислого газа из атмосферы в водную среду примерно на два порядка величины превышает эмиссию метана. На этой основе сделан вывод о том, что в период открытой воды на исследуемой акватории в прибрежной зоне на западе Южного Байкала сток углекислого газа, как минимум, компенсирует радиационный эффект, обусловленный эмиссией метана.

Работа выполнена в рамках государственных заданий ИОА СО РАН № 121031500342-0 и ЛИИ СО РАН № 121032300199-9.

Список литературы

Антонович, В.В., Антохина, О.Ю., Антохин, П.Н., Аршинова, В.Г., Аршинов, М.Ю., Белан, Б.Д., Белан, С.Б., Давыдов, Д.К., Ивлев, Г.А., Козлов, А.В., Максюттов, Ш.Ш., Мачида, Т., Пестунов, Д.А., Пташник, И.В., Рассказчикова, Т.М., Савкин, Д.Е., Сасакава, Симоненков, Д.В., Скляднева, Т.К., Толмачев, Г.Н., Фофонов, А.В. (2022) Карбоновые полигоны ИОА СО РАН для исследования динамики парниковых газов в атмосфере, *Системы контроля окружающей среды*, вып. 4 (50), с. 46-60, doi: 10.33075/2220-5861-2022-4-46-60.

Атлас. Байкальский регион: общество и природа (2021) М., Паулсен, 320 с.

Гармаев, Е.Ж., Цыдыпов, Б.З. (2019) Уровенный режим оз. Байкал: состояние и перспективы в новых условиях регламентации, *Вестник Бурятского государственного университета. Биология, география*, № 1, с. 37-44.

Грачев, М.А., Домышева, В.М., Ходжер, Т.В., Коровякова, Н.В., Голобокова, Л.П., Погодаева, Т.В., Верещагин, А.Л., Гранин, Н.Г., Гнатовский, Р.Ю., Косторнова, Т.Я. (2004) Глубинная вода озера Байкал – природный стандарт пресной воды, *Химия в интересах устойчивого развития*, № 12, с. 417-429.

Мизандронцев, И.Б., Горбунова, Л.А., Домышева, В.М., Мизандронцева, К.Н., Томберг, И.В., Шимараев, М.Н. (1998) Газообмен Байкала с атмосферой в осенний период, *География и природные ресурсы*, № 1, с. 61-70.

Монин, А.С., Обухов, А.М. (1954) Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы, *Труды Геофизического института АН СССР*, № 24 (151), с. 163-187.

Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации (2023) Под ред. А.А. Романовской, М., ИГКЭ, ООО «Принт», 343 с.

Семенов, С.М. (2004) *Парниковые газы и современный климат Земли*, М., Метеорология и гидрология, 175 с.

Семенов, С.М., Говор, И.Л., Уварова, Н.Е. (2018) *Роль метана в современном изменении климата*, Москва, 105 с.

Тимохина, А.В., Панов, А.В., Прокушкин, А.С., Онучин, А.А., Хайманн, М. (2015) Временная изменчивость концентрации CO₂ и CH₄ в атмосфере среднетаежных экосистем Сибири, *Известия РАН. Серия Географическая*, № 2, с. 112-121.

Belikov, D., Arshinov, M., Belan, B., Davydov, D., Fofonov, A., Machida Toshinobu, Sasakawa Motoki (2019) Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO₂ and CH₄ at tower network in Siberia during 2005-2016, *Atmosphere*, vol. 10, no. 11, p. 689, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos10110689>.

Goulden, M.L., Munger, J.W., Fan, S.M., Daube, B.C., Wofsy, S.C. (1996) Measurements of carbon storage by long-term eddy correlation: Methods and a critical evaluation of accuracy, *Glob. Change Biol.*, vol. 2, no. 3, pp. 169-182.

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, New York, Cambridge University Press, 3056 p., doi:10.1017/9781009325844.

Капитанов, В.А., Тырышкин, И.С., Криволутский, Н.П., Пonomarev, Ю.Н., Де Батист, М., Гнатовский, Р.Ю. (2007) Spatial distribution of methane over Lake Baikal surface, *Spectrochimica Acta Part A.*, no. 66, pp. 788-795.

Panchenko, M.V., Domysheva, V.M., Pestunov, D.A., Sakirko, M.V., Shamrin, A.M., Shmargunov, V.P. (2020) Carbon dioxide in the atmosphere-water system and biogenic elements in the littoral zone of Lake Baikal during period 2004-2018, *J. Great Lakes Res.*, no. 46, pp. 85-94, doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.016.

Panchenko, M.V., Domysheva, V.M., Pestunov, D.A., Shmargunov, V.P. (2018) Spatial distribution of the carbon-containing gas fluxes direction in the "water – atmosphere" system in the littoral zone of Lake Baikal in summer, *International Journal of Hydrology*, vol. 2, no. 2, pp. 195-196, doi: 10.15406/ijh.2018.02.00068.

Pestunov, D.A., Shamrin, A.M., Domysheva, V.M., Sakirko, M.V., Panchenko M.V. (2017) Diurnal behavior of the flux and partial pressure of carbon dioxide in the surface water in solar time coordinates (the period of open water in

the south Baikal littoral in 2004-2015), *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 30, no. 4, pp. 372-381.

Quegan, S., Beer, C., Shvidenko, A., McCallum, I., Handoh, I.C., Peylin, P., Rödenbeck, C., Lucht, W., Nilsson, S., Schimmler, C. (2011) Estimating the carbon balance of central Siberia using landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and dynamic global vegetation models, *Glob. Change Biol.*, vol. 17, pp. 351-365, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02275.x.

Tranvik, L.J., Downing, J.A., Cotner, J.B., Loiselle, S.A., Striegl, R.G., Ballatore, T.J., Dillon, P., Finlay, K. et al. (2009) Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 54, no. 6, part 2, pp. 2298-2314.

References

Antonovich, V.V., Antokhina, O.Yu., Antokhin, P.N., Arshinova, V.G., Arshinov, M.Yu., Belan, B.D., Belan, S.B., Davydov, D.K., Ivlev, G.A., Kozlov, A.V., Maksyutov, Sh.Sh., Machida, T., Pestunov, D.A., Ptashnik, I.V., Rasskazchikova, T.M., Savkin, D.E., Sasakawa, Simonenkov, D.V., Sklyadneva, T.K., Tolmachev, G.N., Fofonov, A.V. (2022) Carbonovie poligoni IOA SO RAN dly issledovanie dinamici parnicovih gazov v atmosphere [Carbon testing sites of the IOA SB RAS for studying the dynamics of greenhouse gases in the atmosphere], *Sistemy kontroly okruzhayushoi sredy*, vol. 4 (50), pp. 46-60, doi: 10.33075/2220-5861-2022-4-46-60.

Atlas. Baicalskii region: obshestvo i priroda [Atlas. Baikal region: society and nature] (2021) Paulsen, Moscow, Russia, 320 p.

Garmaev, E.Zh., Tsydypov, B.Z. (2019) Urovnevii regim oz. Baical: sostoynie i perspektivy v novih usloviyah reglamentatsii [Lake Baikal water level regime: status and prospects under new regulatory conditions], *Vestnic Buryatskogo gosudarstvennogo universiteta. Biology, geography*, no. 1, pp. 37-44.

Grachev, M.A., Domysheva, V.M., Khodzher, T.V., Korovyakova, N.V., Golobokova, L.P., Pogodaeva, T.V., Vereshchagin, A.L., Granin, N.G., Gnatovsky, R.Yu., Kostornova, T.Ya. (2004) Glubinay voda ozera Baikal – prirodniy standart presnoy vody [Deep water of Lake Baikal – a natural standard of fresh water], *Chimiy v interesah ustoichivogo razviniya*, no. 12, pp. 417-429.

Mizandrontsev, I.B., Gorbunova, L.A., Domysheva, V.M., Mizandrontseva, K.N., Tomberg, I.V., Shimaraev, M.N. (1998) Gazoobmen Baikala s atmosferoi v osennii period [Gas exchange of Lake Baikal with the atmosphere in autumn], *Geografiya i prirodnie resursy*, no. 1, pp. 61-70.

Monin, A.S., Obukhov, A.M. (1954) Osnovnie zakonomernosti turbulentnogo peremeshivaniya v prizemnom sloe atmosfery [Basic patterns of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere], *Trudi Geofizicheskogo instituta AN USSR*, no. 24 (151), pp. 163-187.

Ocenka potokov parnikovih gazov v ekosistemah regionov Rossijskoi Federacii [Assessment of greenhouse gas fluxes in ecosystems of the regions of the Russian Federation] (2023) In A.A. Romanovskaya (ed.), OOO Print, Moscow, Russia, 343 p.

Semenov, S.M. (2004) *Parnicovye gazy I sovremennii klimat Zemli* [Greenhouse gases and the modern climate of the Earth], Meteorology and hydrology, Moscow, Russia, 175 p.

Semenov, S.M., Govor, I.L., Uvarova, N.E. (2018) *Rol' metana v sovremennom izmenenii klimata* [The role of methane in modern climate change], Moscow, Russia, 105 p.

Timokhina, A.V., Panov, A.V., Prokushkin, A.S., Onuchin, A.A., Heimann, M. (2015) Vremennay izmenchivost koncentracii CO₂ i CH₄ v atmosfere srednetaegnih ecosystem Sibiri [Temporal variability of CO₂ and CH₄ concentrations in the atmosphere of middle taiga ecosystems of Siberia], *Izvestiya RAN Seriy Geograficheskay*, no. 2, pp. 112-121.

Belikov, D., Arshinov, M., Belan, B., Davydov, D., Fofonov, A., Machida Toshinobu, Sasakawa Motoki (2019) Analysis of the diurnal, weekly, and seasonal cycles and annual trends in atmospheric CO₂ and CH₄ at tower network in Siberia during 2005-2016, *Atmosphere*, vol. 10, no. 11, p. 689, available at: <https://doi.org/10.3390/atmos10110689>.

Goulden, M.L., Munger, J.W., Fan, S.M., Daube, B.C., Wofsy, S.C. (1996) Measurements of carbon storage by long-term eddy correlation: Methods and a critical evaluation of accuracy, *Glob. Change Biol.*, vol. 2, no. 3, pp. 169-182.

IPCC (2022) *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, New York, Cambridge University Press, 3056 p., doi:10.1017/9781009325844.

Kapitanov, V.A., Tyryshkin, I.S., Krivolutskii, N.P., Ponomarev, Yu.N., De Batist, M., Gnatovsky, R.Yu. (2007) Spatial distribution of methane over Lake Baikal surface, *Spectrochimica Acta Part A.*, no. 66, pp. 788-795.

Panchenko, M.V., Domyshcheva, V.M., Pestunov, D.A., Sakirko, M.V., Shamrin, A.M., Shmargunov, V.P. (2020) Carbon dioxide in the atmosphere-water system and biogenic elements in the littoral zone of Lake Baikal during period 2004-2018, *J. Great Lakes Res.*, no. 46, pp. 85-94, doi.org/10.1016/j.jglr.2019.10.016.

Panchenko, M.V., Domyshcheva, V.M., Pestunov, D.A., Shmargunov, V.P. (2018) Spatial distribution of the carbon-containing gas fluxes direction in the "water – atmosphere" system in the littoral zone of Lake Baikal in summer, *International Journal of Hydrology*, vol. 2, no. 2, pp. 195-196, doi: 10.15406/ijh.2018.02.00068.

Pestunov, D.A., Shamrin, A.M., Domyshcheva, V.M., Sakirko, M.V., Panchenko M.V. (2017) Diurnal behavior of the flux and partial pressure of carbon

dioxide in the surface water in solar time coordinates (the period of open water in the south Baikal littoral in 2004-2015), *Atmospheric and Oceanic Optics*, vol. 30, no. 4, pp. 372-381.

Quegan, S., Beer, C., Shvidenko, A., McCallum, I., Handoh, I.C., Peylin, P., Rödenbeck, C., Lucht, W., Nilsson, S., Schmullius, C. (2011) Estimating the carbon balance of central Siberia using landscape-ecosystem approach, atmospheric inversion and dynamic global vegetation models, *Glob. Change Biol.*, vol. 17, pp. 351-365, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02275.x.

Tranvik, L.J., Downing, J.A., Cotner, J.B., Loiselle, S.A., Striegl, R.G., Ballatore, T.J., Dillon, P., Finlay, K. et al. (2009) Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate, *Limnol. Oceanogr.*, vol. 54, no. 6, part 2, pp. 2298-2314.

Статья поступила в редакцию (Received): 07.05.2024;

Статья доработана после рецензирования (Revised): 01.07.2024;

Принята к публикации (Accepted): 08.08.2024.

Для цитирования / For citation:

Пестунов, Д.А., Домышева, В.М., Шамрин, А.М., Сакирко, М.В., Панченко, М.В. (2024) Потоки углерода в процессе газообмена CO₂ и CH₄ в системе «атмосфера – водная среда» прибрежной зоны Байкала, *Фундаментальная и прикладная климатология*, т. 10, № 3, с. 399-412, doi:10.21513/2410-8758-2024-3-399-412.

Pestunov, D.A., Domyshcheva, V.M., Shamrin, A.M., Sakirko, M.V., Panchenko, M.V. (2024) Carbon fluxes in the process of gas exchange of CO₂ and CH₄ in the “atmosphere-water” system of the coastal zone of lake Baikal, *Fundamental and Applied Climatology*, vol. 10, no. 3, pp. 399-412, doi:10.21513/2410-8758-2024-3-399-412.