

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.506.5

**Пространственное распределение направления потоков
CO₂ и CH₄ по акватории озера Байкал
(кругобайкальская экспедиция, июнь 2013 г.)**

**Д.А. Пестунов^{1,2}, В.М. Домышева³, В.Г. Иванов³,
А.М. Шамрин¹, М.В. Панченко^{1*}**

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 30

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

Поступила в редакцию 24.06.2015 г.

Дан анализ результатов исследования пространственного распределения концентрации углеродсодержащих парниковых газов в приповерхностной атмосфере и поверхностной воде оз. Байкал. Для уникальной экосистемы оз. Байкал изучение процесса газообмена CO₂ и CH₄ в системе «атмосфера–вода» имеет особое значение, поскольку их потоки, с одной стороны, во многом регулируются водной биотой, а с другой – оказывают существенное влияние на процессы ее жизнедеятельности.

Создание мобильного комплекса для регистрации парциального давления CO₂ и CH₄ в атмосфере и поверхностной воде по ходу судна позволило существенно расширить масштаб проводимых исследований и впервые в нашей практике осуществить одновременные измерения направления потоков углекислого газа и метана вдоль акватории Байкала.

Анализ данных о распределении направления потоков для всей пройденной акватории Байкала показал, что весенний период 2013 г. характеризовался преимущественным стоком углекислого газа на поверхность озера и, наоборот, по всему маршруту прохода судна наблюдался выход метана в атмосферу.

Ключевые слова: углекислый газ, метан, газообмен, система «атмосфера–вода», эквиперимент, картирование, озеро Байкал; carbon dioxide, methane, gas exchange, air–fresh water, equilibrator, mapping, Lake Baikal.

Введение

Изучению источников и стоков углекислого газа и метана в настоящее время уделяется особое внимание, поскольку наблюдающийся тренд роста их концентрации в атмосфере считается одним из важных факторов изменения климата [1, 2]. Внимание специалистов во многом сосредоточено на исследованиях процессов регионального масштаба [2, 3]. Особую потребность в детальном изучении цикла углерода определяет появление различного рода идей о снижении концентрации углеродсодержащих газов с помощью активных воздействий на состав атмосферы или вод океана, что без глубокого понимания всех аспектов этого сложного процесса может нанести непоправимый ущерб окружающей среде.

* Дмитрий Александрович Пестунов (pest@iao.ru); Валентина Михайловна Домышева (hydrochem@lin.irk.ru); Вячеслав Геннадьевич Иванов (vigo@lin.irk.ru); Артем Михайлович Шамрин (shamrin.ar@yandex.ru); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru).

С учетом уникальности экосистемы оз. Байкал исследование потоков CO₂ и CH₄ здесь имеет особое значение. В Байкал впадает более 300 рек, которые выносят большое количество не только биогенного вещества, но и растворенных углеродсодержащих газов [4]. В донных осадках идут процессы бактериального образования метана, имеются залежи газогидратов и организованные источники выхода газов из грязевых вулканов, которые во многом определяют жизнедеятельность биоты [5–7].

Ранее (см., например, [8]), исходя из возможностей имеющейся аппаратуры, нами проводились измерения разности парциальных давлений углекислого газа в атмосфере и в воде только на ограниченном числе гидрологических станций. Создание мобильного комплекса для регистрации парциального давления CO₂ и CH₄ в атмосфере и поверхностной воде во время хода судна позволило существенно расширить масштаб проводимых исследований и впервые в нашей практике осуществить измерения направления потоков метана по акватории.

рии Байкала на НИС «Г.Ю. Верещагин» с 29 мая по 8 июня 2013 г.

Отметим, что в настоящей статье при изложении результатов измерений содержания газов в воде применяются две разные размерности этих величин. Исходя из нашей основной задачи определения направления потоков в системе «атмосфера–вода» естественно использование такой единицы измерения парциального давления газа в поверхностной воде и атмосфере как микроатмосфера. При описании вертикального распределения метана по глубине мы переходим к размерности нанолитр на литр, которая, как правило, применяется для представления подобных данных (в некоторых публикациях – нл · CH₄ · л⁻¹).

Аппаратура и методика измерений

Измерения концентрации метана в экспедиции осуществлялись с применением двух следующих методов.

1. В первом методе на гидрологических станциях по всей вертикали на различных горизонтах от поверхности до придонной области и в поверхностной воде притоков Байкала производился отбор проб. Затем в судовой лаборатории концентрация метана в воде определялась методом *равновесного парофазного анализа* с применением газового хроматографа с детектором ионизации пламени (Эхо-EW, Россия) [9, 10].

2. Во втором методе последовательная регистрация парциальных давлений углекислого газа и метана в приводной атмосфере и поверхностной воде осуществлялась непрерывно с помощью мобильного комплекса [11]. В состав данного комплекса входят: газоанализатор CO₂/CH₄ – Picarro G2301-f, селектор каналов, эквипратор, метеоблок, блоки стабилизации напряжения и бесперебойного питания, персональный компьютер (ПК) со специальным программным обеспечением (ПО), навигационное оборудование и устройство забора пробы воды во время хода судна (рис. 1).

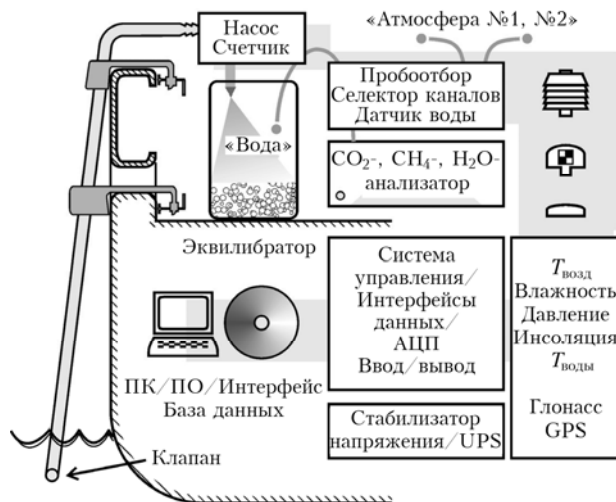


Рис. 1. Состав мобильного комплекса

Устройство для подачи воды в эквипратор крепится к борту судна и состоит из стального корпуса, внутри которого проходит гибкий шланг, соединенный с поверхностным вихревым насосом, а на его другом конце располагается водозаборный клапан. Полный внутренний объем эквипратора равен 25 л. Скорость прокачки воды составляет около 5 л/мин. Быстрая прокачка воды по подводным магистралям и через полость эквипратора исключает существенные изменения ее температуры и состава.

При определении разности парциальных давлений между атмосферой и растворенными в воде газами использование одного газоанализатора позволяет избавиться от возможных систематических ошибок, что является несомненным преимуществом данного комплекса. Калибровка газоанализатора осуществляется регулярно по поверочным газовым смесям в лабораторных условиях (CO₂: (352 ± 10) млн⁻¹, (412 ± 10) млн⁻¹; CH₄: 8 млн⁻¹ ± 5%. ООО «ПГС-сервис», ООО «Мониторинг», Россия). Контроль градуировки прибора в течение экспедиционных наблюдений осуществляется также в каждом измерительном цикле по регистрации сигнала от атмосферного воздуха (как будет показано далее, концентрация CH₄ в приводной атмосфере варьирует в диапазоне 1,86–2 млн⁻¹).

Для измерения температуры воды в эквипратор помещен полупроводниковый датчик (DS18B20, Maxim Integrated, США), абсолютная погрешность измерения которого менее 0,5 °C.

Программное обеспечение, предназначенное для работы с комплексом, не требует предустановки и совместимо со всеми Windows-платформами. Интерфейс программы содержит панель управления комплексом и окна вывода текущего состояния, мгновенных значений регистрируемых величин и графики их пространственного и временного хода. Отображение полученных данных осуществляется в режиме реального времени как по временной шкале, так и в пространственных координатах.

Оценка пространственного разрешения

Для определения промежутка времени, при котором в камере эквипратора достигается равновесное парциальное давление воздуха и прокачиваемой воды, была проведена серия тестовых экспериментов. Процесс выхода парциального давления в эквипраторе и достижение равновесного с прокачиваемой водой значения (для определения концентрации газа C₀ в воде) описываются экспоненциальным законом

$$c(t) = C_0 - Ae^{-t/\tau}, \quad (1)$$

где τ – постоянная времени для соответствующего газа [12]; C₀ – предполагаемая «реальная» концентрация.

В этом случае за время 3τ парциальное давление исследуемого газа в воздушном объеме эквипратора приблизится на 95% к его давлению в анализируемом потоке воды. Оценки показали, что постоянные времени τ_{CO₂} и τ_{CH₄} используемого

эквилибратора составили 3 и 16 мин для CO_2 и CH_4 соответственно. В наших предыдущих работах измерения проводились либо в условиях стационара, либо в судовых экспедициях на гидрологических станциях, где прокачка воды через эквилибратор осуществлялась в течение гораздо большего времени, чем 3τ , что практически гарантировало качество получаемых данных.

Совершенно иная ситуация возникает при измерении пространственного распределения газа и, главным образом, метана с борта движущегося НИС. Здесь длительность времени выхода на режим равновесного парциального давления в эквилибраторе значительно сказывается на пространственном разрешении распределения концентрации газов. В настоящее время пока не удалось техническими средствами существенно снизить τ_{CH_4} . В своих экспериментах мы использовали следующую расчетную процедуру привязки измеренных значений к координатной сетке. При движении судна, задав постоянные времени τ_{CO_2} , τ_{CH_4} для определения давления (концентрации газа) в воде в момент времени t_i после поступления следующего сигнала $c_{i+1}(t_{i+1})$ автоматически осуществлялся пересчет по формуле:

$$C_0 = c_i + (c_{i+1} - c_{i-1}) / (1 - e^{-\frac{t_{i+1} - t_{i-1}}{\tau}}), \quad (2)$$

где также τ – постоянная времени для измеряемого газа в используемом эквилибраторе; C_0 – предполагаемая «реальная» концентрация в текущий момент времени t_i ; c_{i-1} , c_i и c_{i+1} – предыдущее, текущее и последующее показания газоанализатора в моменты времени t_{i-1} , t_i и t_{i+1} соответственно.

Проведенные в рейсе эксперименты показали, что при скорости судна примерно 15 км/ч ошибка координатной привязки концентрации CH_4 составляет около 2 км (для $\text{CO}_2 \sim 500$ м). Понятно, что при меньших скоростях погрешность снижается, а при стоянке судна в точке более 1 ч она обуславливается только точностью навигаторов GPS. При регистрации по ходу судна аномальных значений концентрации газа в воде для точного определения места его выхода приходится осуществлять многократный проход в области рассчитанных координат (см. ниже пример на рис. 8). Естественно, что инерционность эквилибратора и необходимость пересчета величины концентрации газа в воде во время движения судна увеличивают и погрешность ее определения. Как показало проведенное нами сравнение величин концентраций CH_4 по данным, полученным в открытой литорали и пелагиали Байкала (вне зон точечных источников выхода газа) при подходе и отходе судна с гидрологических станций, эта ошибка при его максимальной скорости не превышает 30%.

Интеркалибровка

Для сопоставления результатов измерений содержания метана в воде двумя методами в период с 30 марта по 7 апреля 2013 г. на Байкальской ат-

мосферно-лимнологической обсерватории (БАЛО) производился анализ проб подледной воды. Далее в береговой лаборатории определялась концентрация метана с применением метода равновесного парофазного анализа [9]. Отбор воды осуществлялся непосредственно в месте ее подачи в эквилибратор в периоды, когда в подледной воде не наблюдалось резких выбросов CH_4 , и в течение нескольких часов по данным эквилибратора концентрация метана варьировала незначительно.

Результат сравнения двух методов в этом эксперименте представлен на рис. 2 (*a* – в тестовом эксперименте, коэффициент корреляции около 0,99, коэффициент наклона 1,01; *б* – на гидрологических станциях, коэффициент корреляции около 0,96, коэффициент наклона 0,938).

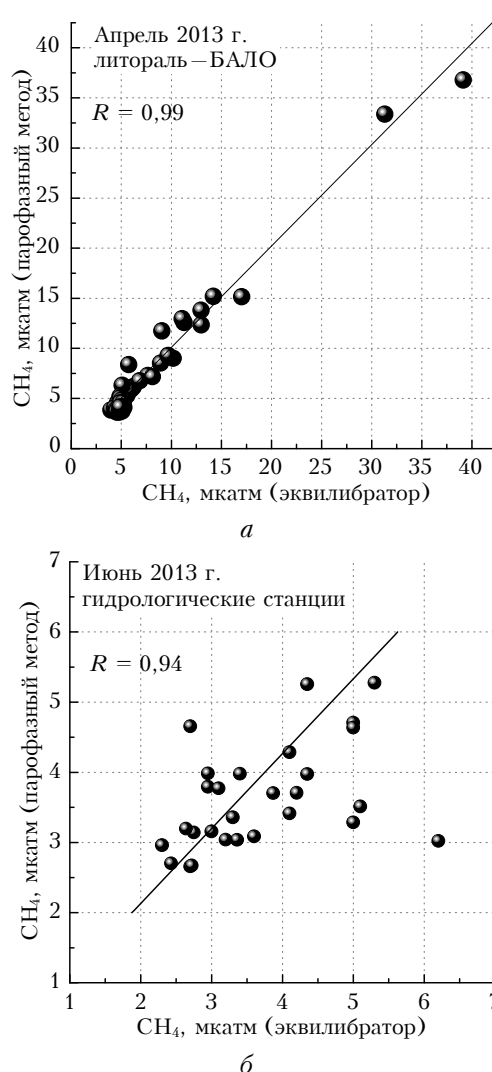


Рис. 2. Результаты сравнения двух методов измерения содержания CH_4 в воде

Большой разброс точек корреляционного поля на рис. 2, *б* по сравнению с тестовым экспериментом вполне объясним. Забор воды на гидрологических станциях осуществляется батометрами, из которых для парофазного анализа отбирается около

150 мл воды. В свою очередь, за время измерений на станции через эквиперимент прокачивается более 200 л анализируемой воды. И если в тестовом эксперименте сопоставление данных столь разномастных измерений осуществлялось только для устойчивых ситуаций, то в экспедиционных условиях неизбежно накладываются пространственно-временные вариации концентрации газа и температуры воды в каждой конкретной точке наблюдений. Тем не менее и в этом случае наблюдается тесная линейная корреляционная связь показаний двух методов ($R = 0,96$), что обеспечивает возможность корректного совместного использования этих данных при анализе и интерпретации результатов.

Обсуждение результатов

Измерения охватывали в разрезе всю акваторию Байкала (рис. 3). В начале экспедиции южная часть озера уже была полностью освобождена от ледового покрова, но в северном Байкале еще до 3 июня наблюдались ледовые поля. Температура поверхностной воды по акватории составила $(2,7 \pm 1) ^\circ\text{C}$.

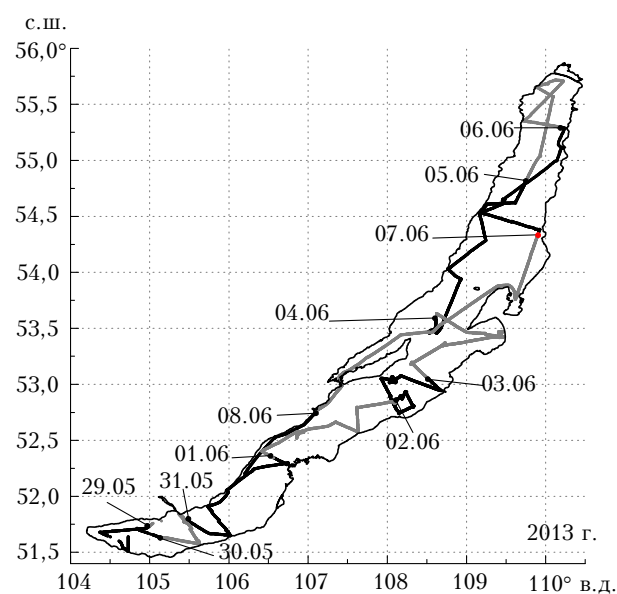


Рис. 3. Схема прохода судна по акватории Байкала в период экспедиции. Дата указана на начало суток

Для описания пространственной картины направления потоков углекислого газа и метана будем использовать значения разности парциальных давлений между водой и атмосферой, которые определяют *направление и амплитуду* потока $\Delta P = P_v - P_a$, где P_v , P_a — парциальное давление газа в поверхностной воде и в приводной атмосфере [8].

Прежде всего отметим, что на протяжении всего периода наблюдений (10 сут) парциальное давление углекислого газа в приводном слое атмосферы варьировало весьма незначительно — от 394 до 404 мкатм. Парциальное давление CH_4 изменялось в диапазоне 1,8–1,9 мкатм (даже в тех районах, где

его давление в воде превышало эти значения в десятки раз), в отличие от ранее полученных результатов работы [7], в которой отмечается больший диапазон изменения метана в приводном слое атмосферы в период наших наблюдений. Отметим, что такое содержание CO_2 и CH_4 в приводной атмосфере по величине хорошо согласуется со средним глобальным фоном (<http://climate.jpl.nasa.gov>) и данными измерений в атмосфере Сибири [13, 14].

Более того, из анализа межсуточной изменчивости атмосферного давления по ходу рейса следует, что даже этот диапазон парциального давления газов определялся изменением синоптических ситуаций, а не спецификой пространственного распределения концентрации CO_2 и CH_4 в атмосфере. Следовательно, обсуждаемые ниже особенности пространственного распределения величин ΔP_{CO_2} и ΔP_{CH_4} (рис. 4 и рис. 6, цв. вклейка) по акватории Байкала будут определяться именно изменением парциального давления газов в воде.

Углекислый газ

На рис. 4 (цв. вклейка) представлены результаты измерения распределения разности парциального давления углекислого газа в поверхностной воде ΔP_{CO_2} по всей трассе прохода судна и на поперечных разрезах (указаны стрелками).

Как видим, для большей части акватории Байкала в этот период характерен сток углекислого газа из атмосферы на водную поверхность (отрицательные значения ΔP_{CO_2}). Выход углекислого газа в атмосферу был зарегистрирован при прохождении судна в литоральной зоне, в 12 км от Култука, в начале разреза Кадильный — Мишиха, на разрезе Ухан — Тонкий и на отдельных участках в среднем Байкале.

Отметим, что в литоральной зоне озера в отличие от пелагиали на пространственную изменчивость ΔP_{CO_2} сильное влияние оказывает ее суточный ход [15]. Для примера на вставке 1 (см. рис. 4, цв. вклейка) приведен график временного хода ΔP_{CO_2} при проходе судна по южной оконечности Байкала. Как видим, здесь наблюдаются типичный для этого сезона года ночной выход углекислого газа с водной поверхности и сток в дневное время [16].

В целом результаты измерений пространственного распределения ΔP_{CO_2} для всей пройденной акватории Байкала указывают на то, что в этот период сток углекислого газа на поверхность озера превалирует над его выходом в атмосферу.

Сравнение значений ΔP_{CO_2} в измерениях 2013 г. с результатами, полученными в весенний период на гидрологических станциях оз. Байкал в 2010–2012 гг. (рис. 5), показывает, что за исключением северной части Байкала такой характер пространственного распределения типичен для этого периода года и вполне укладывается в рамки имеющихся представлений о межгодовой изменчивости этой величины [8].

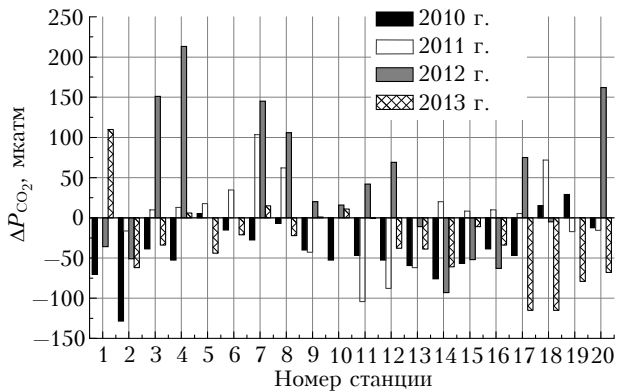


Рис. 5. Пространственное распределение разности парциальных давлений углекислого газа между поверхностной водой и приводной атмосферой ΔP_{CO_2} на гидрологических станциях в весенний период 2010–2013 гг. [8]

Метан

На рис. 6 (цв. вклейка) представлены результаты измерения распределения разности парциального давления метана ΔP_{CH_4} по всей трассе прохода судна и ряд поперечных разрезов парциального давления метана в поверхностной воде. Отметим, что по всей акватории оз. Байкал парциальное давление метана в поверхностной воде превышало атмосферное. Зарегистрированные значения изменялись от 2,3 до 100 мкатм.

По всему маршруту минимальные значения парциального давления CH_4 в поверхностной воде (см. рис. 6, цв. вклейка) регистрировались в пелагиали озера. Наиболее высокое содержание метана в воде Байкала наблюдалось вблизи берегов, и в первую очередь около рек. Так, на обширном участке акватории озера напротив р. Селенга давление

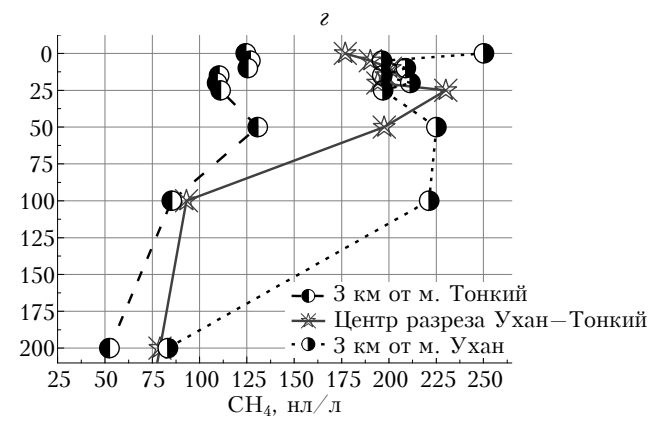
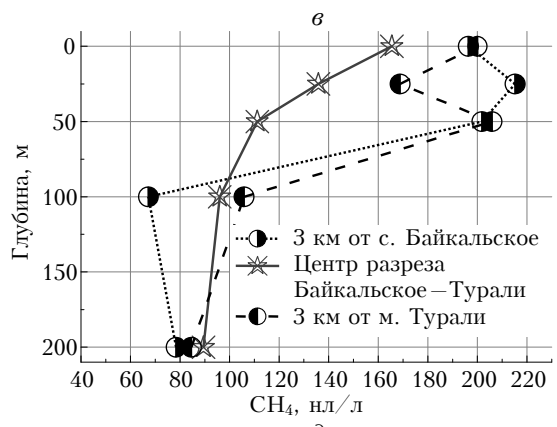
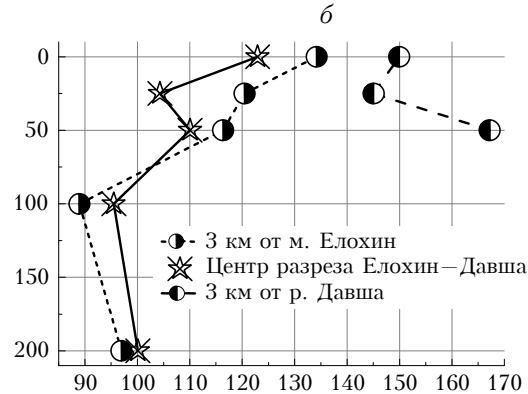
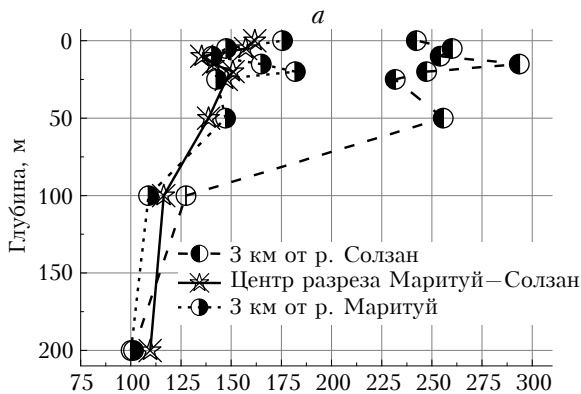
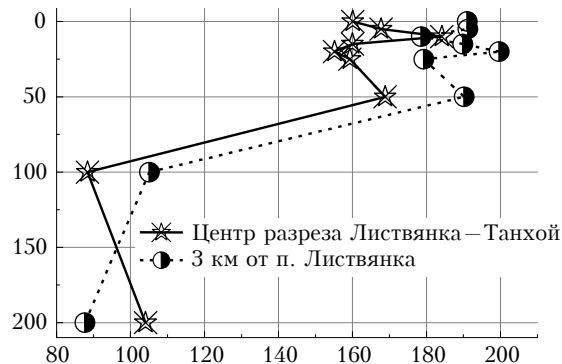
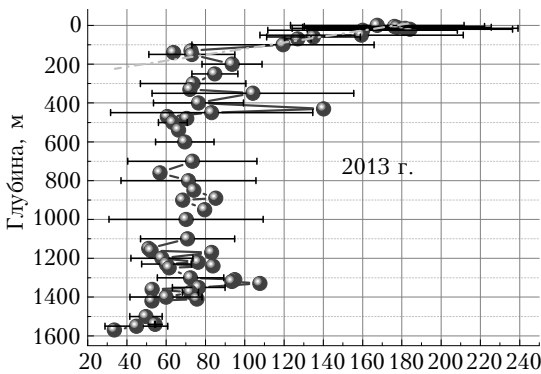


Рис. 7. Распределение концентрации метана по глубине (а – средняя по всем гидрологическим станциям; б–е – на поперечных разрезах)

метана превышало 90 мкатм, сходная картина наблюдалась в районах выноса рек Анга, Баргузин, Верхняя Ангара, Турка. Измеренное парциальное давление метана в поверхностной воде непосредственно в устьях рек существенно выше. В частности, в реках Анга и Баргузин – 130, а в Верхней Ангаре – 245 мкатм (вставка 1 на рис. 6, цв. вклейка). Отмеченные особенности распределения концентрации CH_4 по акватории озера, вероятнее всего, свидетельствуют о том, что именно речной вынос растворенного газа во многом определяет картину пространственного формирования содержания метана в поверхностной воде Байкала.

Для подтверждения этого вывода рассмотрим результаты измерения вертикального распределения концентрации метана, приведенные на рис. 7. При анализе вертикального содержания метана более приемлемо использование размерности нл/л. Для удобства сопоставления этих данных с ранее приведенными результатами [17] отметим, что при температуре поверхностной воды около 2 °С парциальное давление метана 1 мкатм в среднем соответствует $50 \text{ нл} \cdot \text{л}^{-1} \text{ CH}_4$.

На рис. 7, а представлен средний профиль содержания CH_4 от поверхности до максимальных глубин по всем гидрологическим станциям (33 станции) в экспедиции май–июнь 2013 г. Как видим, на первых 200 м от поверхности содержание метана уменьшается в среднем в 2 раза, что весьма убедительно указывает на наличие основного источника CH_4 в приповерхностном слое.

Анализируя вертикальное распределение метана на поперечных разрезах (рис. 7, б–д), можно отметить, что здесь именно на центральных станциях регистрируются минимальные значения концентрации CH_4 в верхнем 50-метровом слое воды по сравнению с данными, полученными в 3 км от берега. Следовательно, резонно полагать, что обогащение этого слоя растворенным газом происходит вблизи береговой зоны.

Иной характер пространственного распределения CH_4 наблюдался на разрезе Ухан–Тонкий (рис. 7, е), где при переходе от м. Ухан к центральной точке разреза концентрация метана в верхнем 50-метровом слое снизилась незначительно, и здесь ее величина оказалась заметно больше, чем на других центральных станциях. Примечательно также, что в 3 км от м. Ухан вплоть до глубины 100 м концентрация метана в 2 раза превышала значения, наблюдаемые в 3 км от м. Тонкий. И если характер пространственной изменчивости вертикального профиля метана в верхнем 200-метровом слое воды на остальных разрезах вполне соответствует предположению о поступлении в озеро CH_4 с прибрежных заболоченных территорий и с выносом рек, то на южном берегу о. Ольхон очевидные мощные источники метана отсутствуют. Интересно отметить, что в этом же районе на удалении около 10 км от берега нами были зарегистрированы локальное повышение температуры, давления метана в поверхностном слое воды и выход углекислого газа (рис. 8). Для более тщательного исследования

этой аномалии несколько раз был осуществлен проход судна по схеме «бабочка», и полученные результаты представлены на рис. 8.

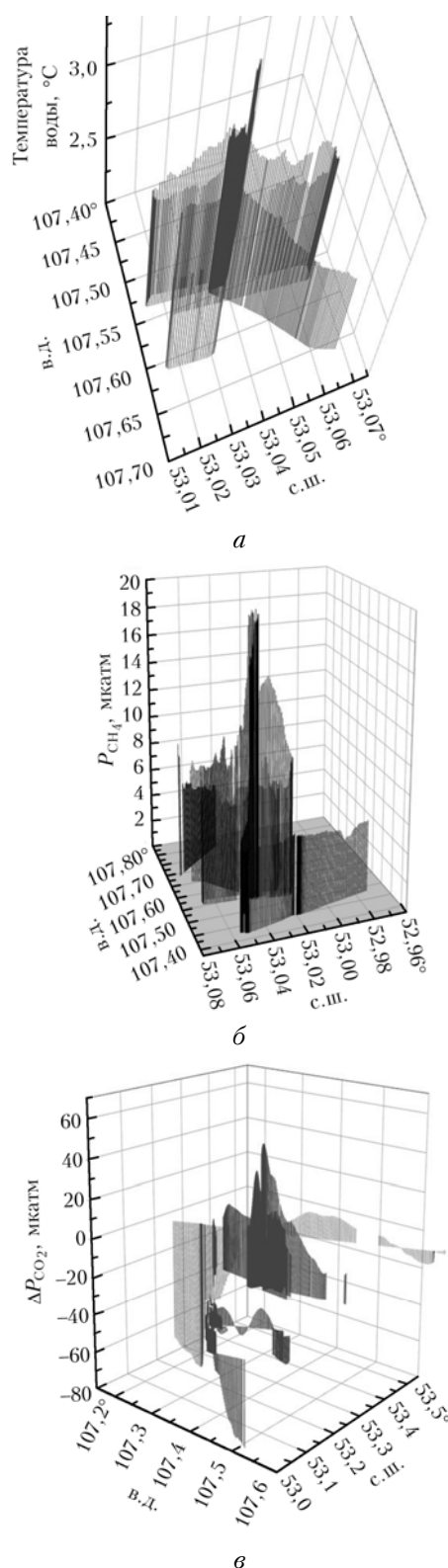


Рис. 8. Результаты измерений в области локального повышения температуры (а), парциального давления метана в поверхностном слое воды (б) и выхода углекислого газа (в)

Видно, что на сравнительно небольшом пространстве (примерно 4×4 км) температура воды повышается от 2,6 до 3,25 °С, рост парциального давления метана P_{CH_4} от 4,3 до 19,6 мкатм и изменение ΔP_{CO_2} от –80 до 64 мкатм.

Учитывая инерционность эквиправатора при измерении равновесного парциального давления метана и углекислого газа, полагаем, что координаты центра локального выброса наиболее точно определены по месту, где зафиксирован максимум температуры поверхностной воды ($T_{\text{max}} - 53^\circ 02' 07''$ с.ш. и $107^\circ 32' 34''$ в.д., $\Delta P_{\text{CH}_4 \text{max}} - 53^\circ 02' 09''$ с.ш. и $107^\circ 32' 36''$ в.д., $\Delta P_{\text{CO}_2 \text{max}} - 53^\circ 02' 05''$ с.ш. и $107^\circ 32' 50''$ в.д.).

Высокое содержание метана в верхнем 50–100-метровом слое воды от побережья о. Ольхон до центра озера на разрезе Ухан – Тонкий и обнаружение локального повышения температуры в поверхностном слое воды, давления метана и выхода углекислого газа в этом же районе явно указывают на наличие достаточно сильного источника, обеспечивающего поступление растворенных газов. В настоящее время мы не располагаем необходимой полной информацией для определения возможного источника или процесса, но надеемся, что сопоставление наших данных с результатами, полученными другими исследовательскими группами, будут полезны для выяснения этого вопроса и постановки дальнейших исследований.

Заключение

Обобщая результаты работы, следует отметить, что была проведена апробация созданного мобильного комплекса в реальных судовых условиях, которая позволила впервые провести одновременное измерение парциального давления CO_2 и CH_4 в атмосфере и поверхностной воде по всему экспедиционному маршруту. Применение этой аппаратуры позволило существенно расширить масштаб проводимых исследований и наших представлений о характере пространственной изменчивости направления потоков углеродсодержащих газов по акватории Байкала.

Результаты измерений показали, что характер пространственного распределения разности парциальных давлений углекислого газа между водной поверхностью и атмосферой вполне соответствует ранее проведенным исследованиям и укладывается в рамки имеющихся сведений о межгодовой изменчивости этой величины в весенний период.

Суммируя ΔP_{CO_2} по пройденной акватории Байкала, можно сделать вывод, что здесь сток углекислого газа в воду заметно превалирует над его выходом в атмосферу. В свою очередь, данные о распределении аналогичной характеристики для метана ΔP_{CH_4} указывают на то, что вся поверхность озера является источником CH_4 .

Анализ пространственного распределения метана в приводном слое атмосферы и поверхностной воде на поперечных разрезах и результаты картирования вблизи береговой зоны и непосредственно

в устьях рек, на наш взгляд, подтверждают вывод о преимущественном влиянии вод прибрежной зоны и в особенности речных выносов растворенного CH_4 на его содержание в верхнем слое по всей акватории Байкала и в основном не противоречат ранее опубликованным данным.

Применительно к циклу углерода в системе «атмосфера–водная поверхность» следует заключить, что формальное суммирование ΔP_{CO_2} и ΔP_{CH_4} (в пересчете на углерод) по трассе прохода судна показывает, что сток углерода из атмосферы, обусловленный потоками углекислого газа, на 1–2 порядка превышает его выход с поверхности воды за счет эвазии метана.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 14-05-00277а), Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле РАН № 10 и экспедиционных грантов СО РАН.

1. *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change © Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012. 594 p.
2. *Bakker D.C.E., Bange H.W., Gruber N., Johannessen T., Upstill-Goddard R.C., Borges A.V., Delille B., Löscher C.R., Naqvi S.W.A., Omar A.M., Santana-Casiano M.J.* Air-sea interactions of natural long-lived greenhouse gases (CO_2 , N_2O , CH_4) in a changing climate // *Ocean-Atmosphere Interactions of Gases and Particles* / ed. by P. Liss, M.T. Johnson, Springer Earth System Sciences. Berlin: Springer, 2014. P. 113–169. DOI: 10.1007/978-3-642-25643-1_3.
3. *Renbin Zhu, Yashu Liu, Hua Xu, Tao Huang, Jianjun Sun, Erdeng Ma, Liguang Sun.* Carbon dioxide and methane fluxes in the littoral zones of two lakes, east Antarctica // *Atmos. Environ.* 2010. V. 44, iss. 3. P. 304–311.
4. *Вотинцев К.К., Мещерякова А.И., Поповская Г.И.* Круговорот органического вещества в озере Байкал. Новосибирск: Наука, 1975. 189 с.
5. *Намсараев Б.Б., Земская Т.И.* Микробиологические процессы круговорота углерода в донных осадках озера Байкал. Новосибирск: Изд-во СО РАН, Филлиал «ГЕО», 2000. 160 с.
6. *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.
7. *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.
8. *Домышева В.М., Усольцева М.В., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Шимараев М.Н., Поповская Г.И., Панченко М.В.* Пространственное распределение потоков углекислого газа, биогенных элементов и биомассы фитопланктона в пелагиали оз. Байкал в весенний период 2010–2012 гг. // *Оптика атмосфер. и океана*. 2014. Т. 27, № 6. С. 539–545.
9. *Большаков А.М., Егоров А.В.* Об использовании методики фазово-равновесной дегазации при газометрических исследованиях // *Океанология*. 1987. Т. 37, № 5. С. 861–862.

10. *Wiessenburg D.A., Guinasso N.L.* Equilibrium solubility of methane, carbon dioxide, and hydrogen in water and sea water // *J. Chem. Engin. Data.* 1979. V. 24, N 4. P. 356–360.
11. *Мобильный* комплекс для исследования пространственного распределения потоков газов в системе «атмосфера–вода»: патент № 149753. Д.А. Пестунов, М.В. Панченко, А.М. Шамрин. заявлен 24.06.14.
12. *Пестунов Д.А., Шмаргунов В.П., Панченко М.В.* Измеритель содержания CO₂, растворенного в воде // *Приборы и техн. эксперим.* 2008. № 5. С. 143–145.
13. *Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуи Г., Краснов О.А., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофонов А.В., Шимояма К.* Пространственная и временная изменчивость концентрации CO₂ и CH₄ в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 2. С. 183–192.
14. *Антохин П.Н., Аришинова В.Г., Аришинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nédélec P., Paris J.D., Рассказчиков Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В.* Крупномасштабные исследования газового и аэрозольного состава воздуха над Сибирским регионом // *Оптика атмосф. и океана.* 2014. Т. 27, № 3. С. 232–239.
15. *Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В.* Экспериментальная оценка стока углекислого газа в системе «атмосфера–вода» в литорали и пелагиали озера Байкал в период гидрологического лета // *Докл. РАН.* 2010. Т. 431, № 6. С. 822–826.
16. *Panchenko M., Pestunov D., Sakirko M., Domyshcheva V.* Air-Water Carbon Dioxide Exchange in the Littoral Zone of Lake Baikal (Ice-Free Period) // *Int. J. Geosci.* 2013. V. 4, N 10. P. 1339–1345. DOI: 10.4236/ijg.2013.410130.
17. *Гранин Н.Г., Мизандронцев И.Б., Обжиров А.И., Верецагина О.Ф., Гнатовский Р.Ю., Жданов А.А.* Окисление метана в водной толще озера Байкал // *Докл. РАН.* 2013. Т. 451, № 3. С. 332–335. DOI: 10.7868/S0869565213210214.

Pestunov D.A., Domyshcheva V.M., Ivanov V.G., Shamrin A.M., Panchenko M.V. **Spatial distribution of CO₂ and CH₄ fluxes directions over water surface of Lake Baikal (round-Baikal expedition, June, 2013).**

This paper is aimed at analyzing the spatial distribution of carbon dioxide and methane concentrations in the atmosphere and in the surface water of Lake Baikal. Investigation of interaction processes between air and fresh water is of special importance for the unique lake ecosystem since the gas exchange is governed predominantly by aquatic biota on the one hand, and it has a significant impact on biota activity on the other hand.

In recent years we have significantly improved our capabilities when measuring CO₂ and CH₄ partial pressures in the surface water along the research vessel route by means of designing a unique mobile station. This made it possible to extend significantly our scope of research and to pioneer carrying out simultaneous measurements of the flux direction of carbon dioxide and methane in the waters of Lake Baikal.

Analysis of the flux distribution data showed that during spring campaign 2013 fluxes were characterized by the predominant sink of carbon dioxide into the lake surface, and vice versa, we observed a release of methane into the atmosphere during the whole route of research vessel.

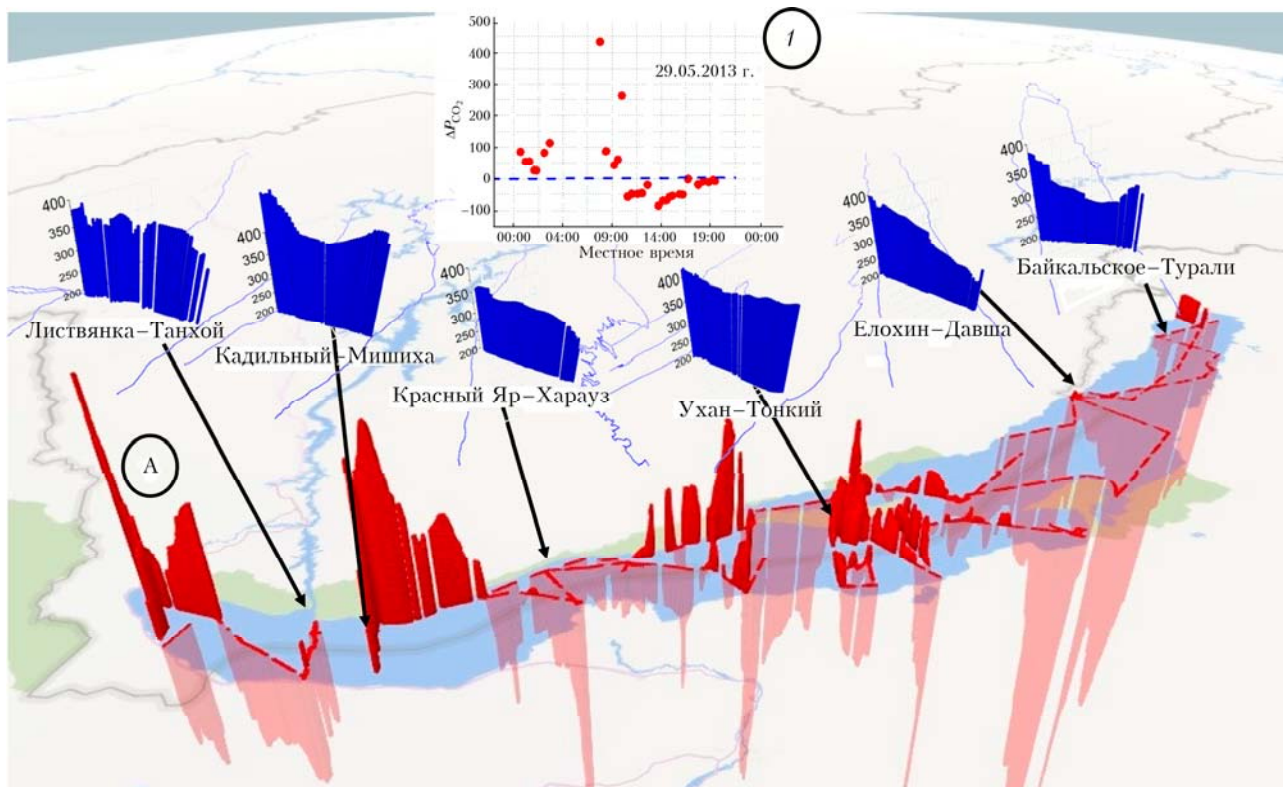


Рис. 4. Пространственное распределение разности парциальных давлений углекислого газа между поверхностной водой и приводной атмосферой ΔP_{CO_2} (мкатм) ($\Delta P_{CO_2min} = -305$ мкатм – $53^{\circ}25'37''$ с.ш. и $108^{\circ}57'11''$ в.д.; $\Delta P_{CO_2max} = 433$ мкатм – $51^{\circ}40'37''$ с.ш. и $103^{\circ}52'27''$ в.д.). На вставке 1 – временной ход ΔP_{CO_2} в литоральной зоне Южного Байкала на участке А, на остальных вставках – парциальное давление CO_2 в поверхностной воде на поперечных разрезах, мкатм

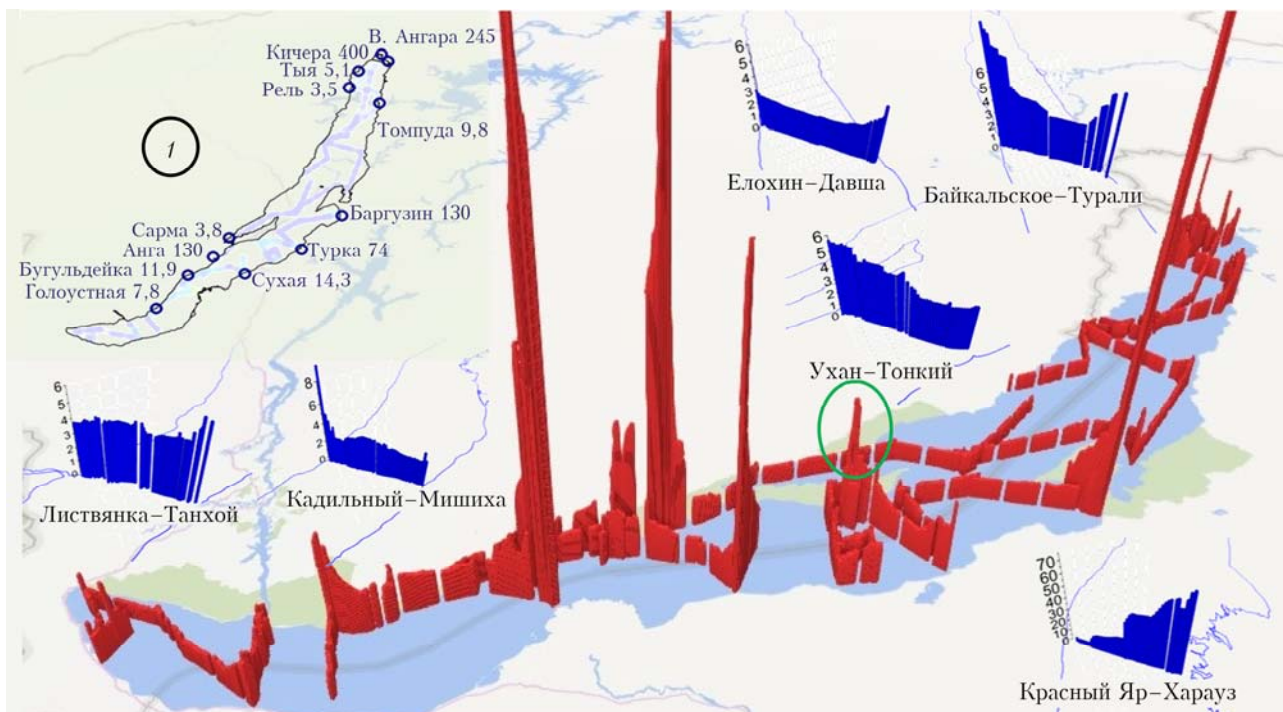


Рис. 6. Пространственное распределение разности парциальных давлений метана между поверхностной водой и приводной атмосферой ΔP_{CH_4} (мкатм) ($\Delta P_{CH_4min} = 0,11$ мкатм – $52^{\circ}57'$ с.ш. и $108^{\circ}10'48''$ в.д.; $\Delta P_{CH_4max} = 98$ мкатм – $52^{\circ}46'12''$ с.ш. и $106^{\circ}35'24''$ в.д.). На вставке 1 – парциальное давление CH_4 (мкатм) в поверхностной воде, измеренное непосредственно в устье рек; на других вставках – на поперечных разрезах Байкала; овалом отмечен обнаруженный участок локального выхода метана и углекислого газа