

УДК 556.5;551.588

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА КОНЦЕНТРАЦИЙ CH_4 И CO_2 ВО ВНУТРИБОЛОТНОМ ОЗЕРЕ СЕВЕРНОЕ

© 2024 г. С. Д. Прасолов^{а,*}, С. А. Забелина^а, С. И. Климов^а, А. В. Чупаков^а, Г. Н. Лосюк^а

^аФедеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова УрО РАН,
Никольский пр-кт, 20, Архангельск, 163020 Россия

*e-mail: sergeyprasolov1@gmail.com

Поступила в редакцию 31.10.2023 г.

После доработки 14.05.2024 г.

Принята к публикации 10.06.2024 г.

Болотные и озерные экосистемы бореального пояса признаются важными звеньями глобального биогеохимического цикла углерода, в то же время, многие аспекты динамики газового режима внутриболотных озер остаются малоизученными. В работе представлены результаты изучения сезонной динамики концентраций растворенных CH_4 и CO_2 в водной толще внутриболотного озера, расположенного в грядово-озерковом комплексе Иласского болотного массива – типичного представителя верховых болот северной тайги Северо-запада России. Выполнен анализ сезонного вертикального распределения парниковых газов в водной толще; динамики поверхностных концентраций с увеличенным временным разрешением; рассмотрены причины и закономерности их изменчивости, в том числе во взаимосвязи с характеристиками донных отложений. Концентрации CH_4 и CO_2 в водной толще в течение года изменяются в широких диапазонах: от 4 до 652 мкг/л и от 0.19 до 19 мг/л соответственно. Концентрации CH_4 в поверхностном горизонте находятся примерно на одном уровне с мая по август, при этом измеренные в воде значения (5.9–11 мкг/л) более чем стократно превышают равновесные с атмосферой концентрации (0.04–0.05 мкг/л), что указывает на поток метана в атмосферу. Концентрации CO_2 снижаются в течение всего периода открытой воды и к концу августа становятся ниже равновесных с атмосферой, что свидетельствует об изменении направления потока и поглощении CO_2 из атмосферы. Результаты показали, что в зависимости от сезона внутриболотное озеро может выступать не только в роли источника, но и в роли поглотителя атмосферного углерода, 90–99 % которого, согласно литературным данным, составляет CO_2 .

Ключевые слова: парниковые газы, внутриболотное озеро, метан, углекислый газ, Архангельская область

DOI: 10.31857/S0016752524100057, **EDN:** ILXHFR

ВВЕДЕНИЕ

Важную роль в регуляции теплового баланса Земли играют парниковые газы (ПГ), входящие в состав атмосферы, такие как метан (CH_4) и углекислый газ (CO_2). За последние 150 лет их концентрации в атмосфере почти удвоились (Forster et al., 2021) и к 2019 году достигли, соответственно, 1866 ppb и 410 ppm, а рост относительно 2011 года составил 3.5 и 5.0 % (Gulev et al., 2021). По разным оценкам, потенциал глобального потепления метана в 20-летний период (количество тепла, поглощаемое массой газа за единицу времени, выражаемое как множитель количества тепла, поглощенного CO_2 за то же время и такой же массой) может достигать 80 (Forster et al., 2021).

Болотные экосистемы играют важную роль в регуляции климата, выступая как источниками, так и поглотителями парниковых газов (Глаголев, 2010; Глаголев и др., 2010; Кривенок и др., 2014;

Романовская, 2023; Jammert et al., 2017). Наиболее исследованными в контексте изучения ПГ на территории России являются болотные экосистемы Западной Сибири (Глаголев, 2010; Голубятников, Казанцев, 2013; Dean et al., 2020; Karlsson et al., 2021), в то время как на Европейском Севере существуют лишь единичные исследования (Федоров и др., 2008; Magushchak et al., 2013). Согласно оценкам, болотные экосистемы России являются источниками эмиссии 731989.3 Гг CO_2 -экв. метана в атмосферу и поглощают 860125.3 Гг CO_2 -экв. углекислого газа (Романовская, 2023). Однако, необходимо отметить, что приведенные оценки характеризуются высокой степенью неопределенности – до 200 %. Количественные аспекты динамики газового режима внутриболотных озер, в частности, вертикальное распределение и сезонная изменчивость концентраций ПГ, остаются недостаточно изученными. Исследования внутриболотных озер Сибири (Глаголев и др., 2010а; Да-

выдов и др., 2022) показывают перенасыщение вод озер CH₄ и CO₂ и наличие их потока в атмосферу (средние значения потока: до 177.6 мг/м² в сутки для CH₄ и 3.3 г/м² в сутки для CO₂). В работе (Давыдов и др., 2022) отмечена значительная постоянная эмиссия CO₂ и CH₄ с поверхности болотных озер в июне–сентябре, измеренная с помощью плавающих камер. Отмечается преобладание пузырькового выхода ПГ из донных отложений над диффузионным потоком, особо заметное для потоков метана и менее значимое для углекислого газа. Глаголев с соавторами приводит значения потока метана из внутриболотных озер тундры Западной Сибири в августе: 0.01–4.27 мгС/м² час (Глаголев и др., 2010а). Однако в некоторых случаях (Repo et al., 2007) отмечается поглощение углекислого газа из атмосферы в летний период (0.07 г/м² в сутки).

Озерные экосистемы бореального пояса считаются важным звеном биогеохимического цикла углерода и вносят существенный вклад в эмиссию ПГ в атмосферу. Особую роль в этом процессе играют малые водоемы, так как скорость протекания биогеохимических процессов в них непропорционально высока (Downing, 2010). Несмотря на важность в биогеохимических циклах, существующая информация о малых внутриболотных водоемах является значительно более скудной, в сравнении с более изученными крупными озерами других ландшафтов. В то же время, вклад озер площадью менее 0.001 км² в глобальную эмиссию углерода из мировой озерной сети оценивается в 15 % выбросов CO₂ и до 37 % выбросов CH₄ (Holgerson, Raymond, 2016; Rosentreter et al., 2021).

Целью данной работы было изучение сезонной изменчивости концентраций CH₄ и CO₂ во внутриболотных водоемах Иласского болотного массива (Архангельская область), на примере небольшого озера Северное.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Характеристика объекта исследования

Иласский болотный массив, площадью 88.95 км², расположен в 20 км южнее Архангельска и в 50 км от вершины Двинского залива Белого моря (рис. 1), является характерным для зоны олиготрофных верховых болот. Основные торфообразующие растения Иласского болота – сфагновые мхи. Господствующим микроландшафтом является грядово-озерковый комплекс площадью 24.36 км², представленный озерками глубиной до 2 метров, чередующимися с торфяными грядами. На многочисленных мелких озерках приходится до 50 % площади комплекса. Кроме них, в гидрографическую сеть Иласского болотного массива входит ряд бо-



Рис. 1. Карта-схема озера Северное. Местоположение точки отбора проб отмечено звездой.

лее крупных первичных озер, площадью до 1.8 км² (Жила, Алюшкинская, 1972).

Объектом исследования являлось типичное внутриболотное оз. Северное (64°20'N, 40°36'E), расположенное в грядово-озерковом комплексе. Объект был классифицирован по различным морфометрическим и термическим показателям, описанным в (Потахин, 2006). По площади зеркала (0.013 км²) водоем относится к озеркам, имеет вытянутую форму длиной 270 м и шириной 70 м и максимальную глубину до 2.5 м. По показателю относительной глубины (отношение средней глубины к кубическому корню из площади зеркала) является глубоким, а по показателю открытости (отношение площади к средней глубине) слабо открытым. Озеро характеризуется ультрапресной водой с удельной электропроводностью 18–40 мкСм/см, низкими значениями рН (3.9–4.8) и низкой прозрачностью по диску Секки (≤ 2 м). Тип летней стратификации – эпитезмический.

Выбор местоположения точки пробоотбора обусловлен сочетанием ряда факторов: точка отражает максимальные глубины в водоеме, удалена от островов в центральной части озера. К выбранной оконечности озера оборудована тропа гидропоста Северного УГМС, что обеспечивает удобство подхода и доступность в периоды межсезонья.

Методы исследования

Отбор проб воды по всему профилю водной толщи проводился 18 марта, 20 мая, 23 августа и 10 ноября 2022 г. Пробы воды для определения концентраций CH₄ и CO₂ с поверхностного (0–1 м) горизонта отбирались с помощью закрепленных на шесте 160-мл шприцев, а с нижележащих – горизонтальным батометром. Разница между парал-

лельными отборами обоими способами, а также разница между параллельными отборами с одной глубины не превышали инструментальную погрешность метода определения концентраций.

Отбор проводился в соответствии с методикой, описанной в (Zabelina et al., 2021) в 60-мл флаконы, которые закрывались без пузырьков воздуха резиновыми пробками с алюминиевыми крышками и немедленно фиксировались добавлением 0.2 мл насыщенного раствора HgCl_2 . Одновременно измерялась температура воды и концентрация растворенного кислорода (зонд-оксиметр WTW Oxi 330i с датчиком CellOx 325), электропроводность (кондуктометр WTW 3110 с ячейкой TetraCon325), и pH поверхностного слоя воды (pH-метр WTW ProfLine 3110).

Дополнительно проводился пробоотбор в поверхностном слое воды (0.15 м) в июне и июле и в подледном горизонте (ближайший к нижней кромке льда слой воды, на глубине ~ 0.5 м) в апреле и декабре. В марте, апреле и декабре отбор проб проводился со льда (общая толщина льда 57, 52 и 25 см соответственно); пробоотбор в ноябре совпал с началом установления устойчивого ледового покрова (толщина льда 1–2 см). В июле 2023 г. проводился отбор донных отложений с помощью ударной прямоточной грунтовой трубки, для определения содержания (% от массы сухого вещества) общего и органического азота ($N_{\text{общ}}$ и $N_{\text{орг}}$) и углерода ($C_{\text{общ}}$ и $C_{\text{орг}}$). Отобранная колонка разделена на горизонты 0–5, 5–10 и 10–12 см.

Концентрации ПГ в пробах определялись в лабораторных условиях на газовом хроматографе “Хроматэк–Кристалл 5000” с пламенно-ионизационным детектором (ПИД). Хроматограф оснащен стальной колонкой длиной 2 м и внутренним диаметром 2 мм и предколонкой длиной 1 м, наполненными сорбентом Hayesep Q 80/100. Для определения концентраций CO_2 хроматограф оснащен метанатором. Для создания газовой фазы в пробах и в качестве газа-носителя использовался азот, расход газа-носителя – 10 мл/мин. Температура порта ввода, колонок и ПИД составляла, соответственно, 160, 50 и 170 °С. Каждый образец определялся в двух-трехкратной повторности, погрешность между повторностями не превышала 3–5 %. После каждых 10 образцов проводилась калибровка, с использованием поверочной газовой смеси (14.5 ppm CH_4 и 990 ppm CO_2). Для расчета концентраций ПГ в жидкой фазе использовалась удельная растворимость (Yamamoto et al., 1976; Weiss, 1974). Дополнительно, для первичной оценки направления потока ПГ между озером и атмосферой были рассчитаны равновесные с атмосферой концентрации (Lammers, Suess, 1994; Weiss, 1974).

Определение массовой доли общего и органического углерода и азота проводилось с использованием анализатора элементного состава Euro Vector EA3000. Диапазон измерения массовой доли каждого элемента составляет от 0.01 до 100 %. Среднее квадратичное отклонение случайной составляющей погрешности измерений, массовая доля: C – 0.3; N – 0.1 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Метеорологические и гидрологические условия в период исследования

Характеристика погодных условий района исследования дается по метеостанции М-2 Холмогоры. Температурный режим зимой 2021–2022 гг. соответствовал климатической норме за период 1991–2020 гг.; весной и осенью 2022 г. температурные условия также были близки к норме. Лето, в свою очередь, было теплым, а среднемесячное значение температуры воздуха в августе составило 17.7 °С, что превысило максимум за 30-тилетний период, и соответствовало температурным условиям июля. Теплое лето обусловило задержку начала осеннего выхолаживания и сохранение летней стратификации вод в течение августа.

Устойчивые переходы через температуры воздуха 0, 4 и 10 °С весной произошли соответственно 6 апреля, 6 и 28 мая; осенью переходы через 0 и 4 °С произошли 18 октября и 1 ноября. Сход устойчивого ледового покрова весной произошел в первой декаде мая, становление осенью – в первой декаде ноября.

В марте отмечалась резкая обратная температурная стратификация вод до дна (рис. 2а). Температура росла от 0.2 °С в подледном горизонте, до 3.8 °С в придонном. Вода была слабо насыщена кислородом: его концентрация в подледном горизонте составляла 8.8 мг/л, насыщенность 61 %. С глубиной концентрация кислорода снижалась до 1 мг/л в придонном горизонте; оксиклин находился на глубине ~ 1 м (рис. 2б).

В мае на момент отбора проб происходило конвективное перемешивание вод вследствие наступившего похолодания: днем температура воздуха составляла 3.9 °С, что привело к гомотермии вод озера при температуре 8.6 °С и гомооксигении при содержании 11.3 мг/л. Во второй половине лета температура верхнего слоя воды превысила 20 °С, на глубине ~ 1.5 м отмечался термоклин. Там же отмечался и оксиклин: содержание кислорода в эпилимнионе составляло 9.7–9.4 мг/л, а в придонном горизонте уменьшалось до 4.3 мг/л. В период предзимья произошло перемешивание вод до дна и началось формирование обратной температурной стратификации вод. Температура воды

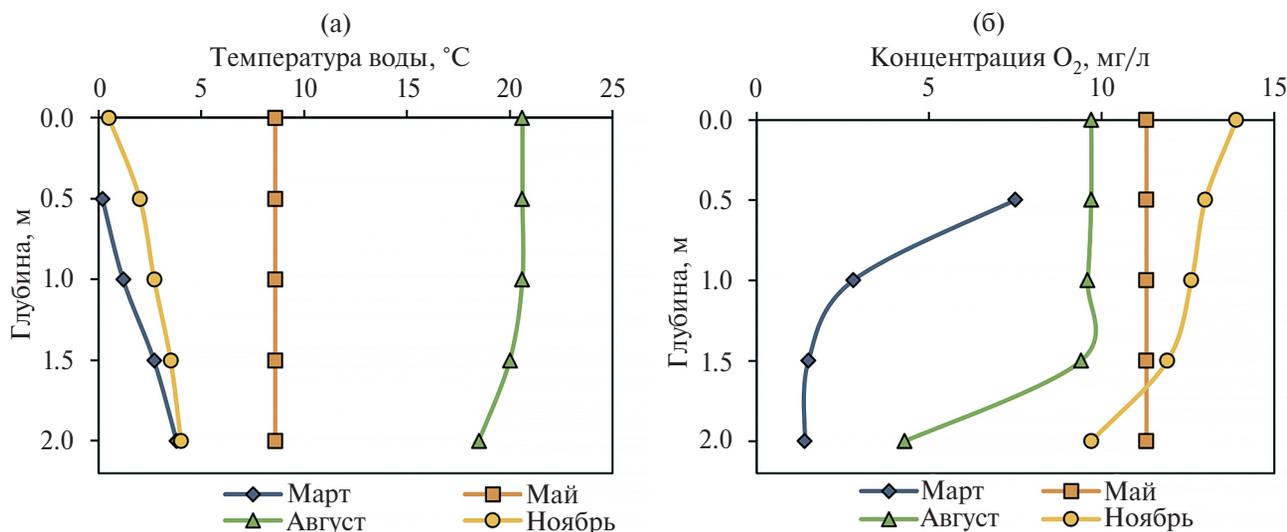


Рис. 2. Вертикальное распределение (а) – температуры воды и (б) – растворенного кислорода в разные сезоны года.

на поверхности, вследствие выхолаживания, опустилась до 0.5 °С, а у дна составляла 4.0 °С. Концентрации растворенного кислорода составляли 13.9 мг/л у поверхности и 9.7 мг/л у дна, с оксигенированием на глубине 1.5 м.

Донные осадки

Донные отложения озера Северное представляют собой полуразложившийся торф с растительными остатками, бурого цвета в верхнем слое и буро-оранжевого в нижней части колонки. Необходимо отметить, что говорить о донных отложениях в классическом понимании этого термина для данных водных объектов не совсем корректно. Озерки грядово-озеркового комплекса сформированы в теле торфяной залежи и на их дне залегает торф окружающего болотного массива, а низкая продуктивность подобных экосистем (дистрофные озера) не приводит к образованию достаточного седиментационного потока. Как следствие, свойства донных отложений подобных водоемов будут определяться в большей степени особенностями окружающего торфяника.

Верхний слой отложений (0–5) см очень сильно обводнен, состоит из мелких частиц, неоформлен. В горизонте 5–10 см присутствуют неразложившиеся остатки сфагнума, сосновая хвоя; в нижней части колонки (10–12 см) отмечается большое количество неразложившихся растительных остатков, фрагментов травы, веточек длиной ~ 1 см. Влажность отложений (массовая доля воды в пробе) высокая, с глубиной незначительно снижается и находится в пределах 99–96 %.

В донных отложениях с глубиной наблюдается небольшое повышение содержания углерода: $C_{\text{общ}}$ повышается с 44.2 до 48.3 % и $C_{\text{орг}}$ с 39.5 до 44.1 %,

при этом, как видно, $C_{\text{орг}}$ составляет основную массу углерода донных отложений, (до 91 % от $C_{\text{общ}}$), что свидетельствует о низкой степени разложения поступающего в донные отложения органического вещества. Эти результаты закономерны – минерализация органического вещества происходит медленно (что характерно для торфяников) и интенсивнее в верхней части донных отложений. По имеющимся литературным данным, содержание общего углерода в верхнем слое торфа Иласского болота оценивается в 44.7–47.6 %, а азота в 0.93–1.79 % (Селянина и др., 2017; Zubov et al., 2022). Таким образом, содержание общего углерода в донных отложениях озера согласуется с верхним горизонтом торфа и в два раза превышает известные значения для других озер Архангельской области (Вахрамеева, Кокрятская, 2019), в то время как общего азота в верхних горизонтах донных отложений озера обнаруживается больше, что, вероятно, связано с образованием автохтонного органического вещества в водной толще и оседанием его на дно. Массовая доля азота в отложениях озера Северное с глубиной снижается: $N_{\text{общ}}$ от 2.7 до 1.7 % и $N_{\text{орг}}$ от 2.2 до 1.5 %. Обогащение верхнего горизонта донных отложений азотом скорее всего связано с вкладом, хоть и небольшим, автохтонного взвешенного органического вещества, что подтверждается более низкими значениями $C_{\text{орг}}/N_{\text{орг}}$.

Соотношение $C_{\text{орг}}/N_{\text{орг}}$ в донных отложениях показывает долю аллохтонного и автохтонного органического вещества в водоеме. Если соотношение находится в промежутке 12–47, это говорит о присутствии в озере как аллохтонной, так и автохтонной органики (Хатчинсон, 1969). Чем меньше данное соотношение, тем больший вклад вносят автохтонные процессы. Показатель $C_{\text{орг}}/N_{\text{орг}}$ в донных

осадках оз. Северное попадает в обозначенный промежуток, принимая значения в широком диапазоне: от 18 в поверхностном горизонте и увеличиваясь до 30 в нижней части колонки. Такое распределение показывает, что с наибольшей скоростью процессы деструкции протекают в поверхностном горизонте, куда поступает свежий детрит, а в нижележащих слоях накапливаются труднорастворимые органические остатки, чаще всего имеющие гумусовую природу (Мартынова, 2010; Бикбулатов, 1993).

Кислая среда и анаэробные условия обуславливают низкую скорость разложения органического вещества в донных отложениях озера, как и, собственно, в самих торфяниках. Важную роль в этом играет преобладание сфагнома в качестве торфообразующего растения. Как было показано в (Zubov et al., 2022), ботанический состав торфа Иласского болотного массива характеризовался высокой степенью однородности по всему профилю. Степень разложения верхнего слоя торфа (0–20 см) составила 0–5 %. Верхние слои торфяной залежи (0–240 см) сложены видами *Sphagnum*. Как известно, его сложный полисахаридный состав плохо подвергается деструкции, как бактериями, так и грибами, а фенольные соединения ингибируют деструкцию в анаэробных условиях (Добровольская и др., 2013).

Более интенсивно процесс деструкции органического вещества выражен на границе вода–дно (Zubov et al., 2022), что связано как с физико-химическими параметрами (такими как взмучивание, перемешивание, периодический контакт с кислородсодержащими водами), так и с влиянием автохтонного звена озера, которое вносит более легкоокисляемую фракцию органического вещества в общее содержание.

Малые глубины озер, ветровое и конвективное перемешивание предполагают, что основным источником ПГ в этих водоемах, как и в болотах в целом, будут являться сформированные торфом донные отложения. Это подтверждают последние исследования. В работе Taillardat et al. (Taillardat et al., 2024), проведен радиоизотопный анализ и исследованы концентрации CH_4 и CO_2 в пяти небольших внутриболотных озерах и поровых водах окружающего торфа. Авторы приходят к выводу, что большая часть этих газов поступает в водоемы из поровых вод окружающей торфяной залежи.

Вертикальное распределение концентраций CH_4 и CO_2

При достижении донными водами предела насыщения парниковыми газами, в них образуются пузырьки, формирующие поток ПГ в атмосферу. Однако, во время прохождения через водную толщу, газ в пузырьках практически с ней не взаимодействует (Bastviken et al., 2004; Ordóñez et al., 2023). Растворенные ПГ попадают в водную толщу из донных отложений диффузионным переносом (Bastviken et al., 2004).

Концентрации ПГ в марте (рис. 3а, б) составили 4–652 мкг/л CH_4 и 12–19 мг/л CO_2 . В вертикальном распределении высокие значения концентраций обоих газов отмечены ниже 1 м, и достигают максимума в придонном горизонте. Ледовый покров, устанавливающийся на озерах в зимний период, препятствует газообмену между водоемом и атмосферой, что ведет к накоплению в толще воды растворенных газов, а низкая температура воды способствует их растворимости. Концентрации метана в подледном горизонте мало отличаются от значений в период открытой воды, а с глубиной повышаются и достигают максимальных значе-

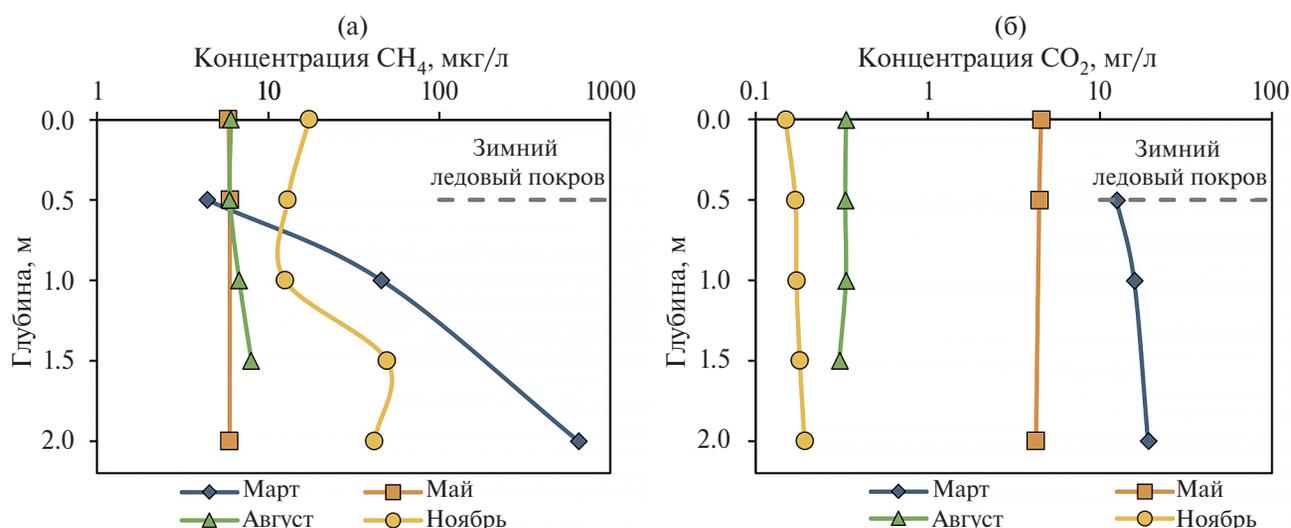


Рис. 3. Вертикальное распределение (а) – концентраций CH_4 и (б) – концентраций CO_2 в разные сезоны года.

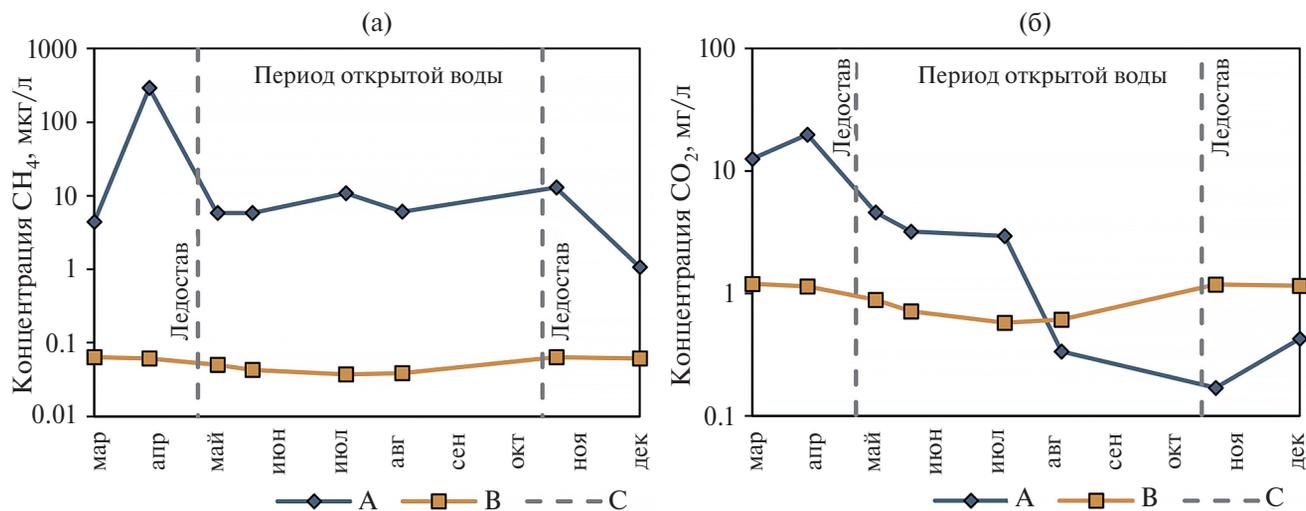


Рис. 4. Сезонный ход (а) – поверхностных концентраций CH₄ и (б) – поверхностных концентраций CO₂. А – фактические измеренные концентрации; В – равновесные с атмосферой; С – границы периодов открытой воды и устойчивого ледового покрова.

ний в придонном горизонте. Концентрации углекислого газа по всему профилю в зимний период, в целом, значительно превышают значения, полученные в остальные сезоны (от 3 раз по сравнению с майскими концентрациями, до 100 раз по сравнению со значениями в ноябре). Подобная динамика концентраций CO₂ отмечается в работе (Kortelainen et al., 2006) где приведены результаты исследований 209 бореальных озер Финляндии. В исследованных озерах также наблюдались максимальные концентрации CO₂ в подледный период и их снижение в периоды весенней и осенней гомотермии, с увеличением в гипolimнионе в период летней стратификации.

В зимний период происходит накопление рассматриваемых ПГ в придонных слоях, что связано с процессами аэробной минерализации органического вещества на границе вода–дно, а также анаэробной деструкции органического вещества в донных отложениях. В отсутствие турбулентного и конвективного перемешивания распределение в водной толще обуславливается внутриводоёмными процессами.

В мае произошло конвективное перемешивание вод до дна и установление гомотермии, которое привело к высвобождению накопленного в зимний период запаса парниковых газов и почти равномерному распределению их концентраций по всей водной толще. Кроме того, при увеличении температуры воды снижается и растворимость газов. В результате, весенние концентрации CH₄ неизменны по всей глубине озера (6 мкг/л). Концентрации CO₂ значительно снизились по сравнению с зимним периодом, до 4–5 мг/л,

но остаются более высокими, чем в остальные сезоны. На концентрацию CO₂ также оказывает влияние и его поглощение в результате процесса фотосинтеза. В придонном горизонте концентрации незначительно снижены относительно поверхности, что может быть связано с деятельностью, как фитопланктона, так и бентосных водорослей. Прозрачность вод в период открытой воды составляет около 1.5 м, следовательно, фотический слой распространяется на всю глубину озера, а максимальные концентрации биогенных элементов в условиях их острого дефицита в подобных объектах приурочены к донным отложениям. При отборе образцов донных отложений были обнаружены бентосные водоросли в виде темно зеленых колоний в слизистой оболочке диаметром не более 1 см, что также является подтверждением того факта, что фотосинтетическая активность в подобных мелководных экосистемах может проявляться также и в придонных горизонтах и верхнем слое донных отложений.

В августе концентрации CH₄ мало отличаются от весенних значений, лишь незначительно возрастая ниже 1 м до 8 мкг/л, что связано с формированием придонной температурной стратификации и влиянием донных отложений. Интересен тот факт, что, несмотря на прогрев водной толщи (на 12 °С в поверхностном горизонте), содержание метана не уменьшилось по сравнению с весной. Возможно, температурный эффект компенсируется увеличением диффузионного потока из донных отложений в результате прогрева придонных горизонтов, однако данный вопрос по большей части остается открытым.

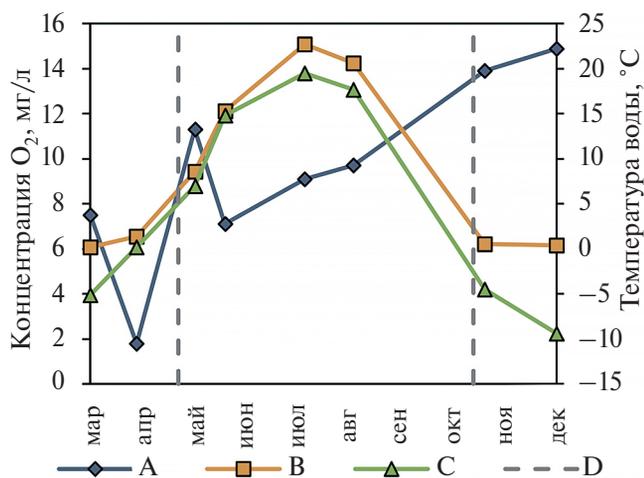


Рис. 5. Сезонный ход А — концентраций растворенного O₂, В — температуры поверхностного слоя воды и С — средней месячной температуры воздуха по М-2 Холмогоры; D — границы периодов открытой воды и устойчивого ледового покрова.

Вследствие дальнейшего прогрева водной толщи и интенсификации фотосинтетической активности, содержание CO₂ продолжает падать по сравнению с предыдущими сезонами, достигая концентрации 0.3 мг/л. “Придонная” вегетационная активность приводит к незначительному уменьшению концентрации вблизи дна, по сравнению с верхними горизонтами.

В период предзимья концентрации метана возрастают до 13–17 мкг/л в эпилимнионе, а в районе оксиклина достигают 49 мкг/л. Повышение концентраций в поверхностном горизонте, вероятно, связано с понижением температуры и начавшимся установлением ледового покрова, из-за чего происходило накопление растворенных газов. Для углекислого газа в свою очередь зафиксированы минимальные годовые концентрации (0.15–0.19 мг/л), почти равномерно распределенные по водной толще, с тенденцией увеличения к придонным горизонтам. Поведение углекислого газа, как и содержание метана в летний период, противоречит зависимости его растворимости от температуры.

Вероятно, что после интенсивного осеннего перемешивания вод, обилия ветров и осадков, и, как следствие, насыщенности водной толщи кислородом, концентрация метана также была минимальной, однако начала восстанавливаться в начале установления гомотермии и образования ледового покрова. Снижение концентрации кислорода в придонном горизонте также указывает на протекающие там процессы деструкции органического вещества, следствием которых является повышение концентраций CH₄ и CO₂.

Сезонная динамика концентраций CH₄ и CO₂

Более высокое временное разрешение сезонной динамики концентраций ПГ в озере Северное установлено для поверхностного горизонта (рис. 4а, б). Концентрации вблизи нижней кромки льда резко возрастают к концу зимы. Это может быть связано с истончением снежного и ледового покрова, ведущим к проникновению солнечной радиации в толщу воды и, как следствие, началу прогрева воды (рис. 5). В результате происходит разрушение зимней стратификации, что приводит к подъему насыщенной газами воды из нижележащих слоев к поверхности. После схода ледового покрова в первой декаде мая, перемешивания всей толщи воды и высвобождения накопленного в течение зимы запаса, концентрации ПГ резко падают.

Динамика концентраций обоих газов в период открытой воды различна. Концентрации CH₄ находятся на одном уровне с мая по август. В июле отмечается повышение концентраций, что может быть связано с наблюдавшимся в это время периодом обильных дождей, приводящих к поступлению в озеро с окружающего ландшафта органического вещества с поверхностным стоком. В ноябре, во время установления ледового покрова, в поверхностном горизонте наблюдается повышение содержания газа относительно летних значений. Однако к третьей декаде декабря концентрации снижаются. В течение периода открытой воды наблюдается более чем стократное превышение фактических концентраций CH₄ (5.9–11 мкг/л) над равновесными с атмосферой значениями (0.04–0.05 мкг/л) (рис. 4а), что указывает на активный поток метана в атмосферу.

Концентрации CO₂, в свою очередь, снижаются в течение всего периода открытой воды. В июле, однако, понижение менее выражено, чем в остальное время, что, как и в случае с метаном, вероятно связано с периодом дождей и поверхностным стоком органического вещества с окружающего ландшафта. Концентрации достигают минимума в ноябре, в начале установления ледового покрова. В декабре, после ледостава, начинается их незначительное повышение. Вода весной и в начале лета перенасыщена CO₂, но к концу августа наблюдаемые концентрации становятся ниже равновесных с атмосферой (рис. 4б). Происходит поглощение растворенного в воде CO₂ фитопланктоном в результате его развития и активной жизнедеятельности в вегетационный период. Понижение фактических концентраций ниже равновесных свидетельствует об изменении направления потока и поглощении CO₂ из атмосферы.

Исследования (Cole et al., 1994; Holgerson, 2015) показывают, что в целом озера перенасы-

щени CH_4 и CO_2 . Так, согласно (Cole et al., 1994) в бореальном и арктическом регионах перенасыщение отмечается для более чем 80 % озер. В то же время, в (Golub et al., 2023), на основании данных, полученных методом турбулентных пульсаций на 13 озерах, расположенных в различных частях северного полушария, авторы показывают, что озера могут выступать поглотителем CO_2 . Однако продолжительность этих периодов мала и составляла 11 % времени наблюдений. В исследовании (Huotari et al., 2009) авторы также отмечают, что гуминовые озера в отдельные периоды могут выступать поглотителями CO_2 . Однако для установления этих периодов требуются более подробные исследования.

Поглощение CO_2 в конце августа было обнаружено в мелководном болотном озере (Repo et al., 2007) в Западной Сибири. Как и рассматриваемое нами озеро Северное, объект имеет торфяное дно и расположен в зоне тайги, на территории, где преобладающими типами торфяников являются грядово-мочажинные комплексы и олиготрофные болота. Периодическое поглощение CO_2 отмечается также в летний период в скандинавских озерах: внутриболотном озере на севере Швеции (Jammot et al., 2017) и небольшом гуминовом озере на юге Финляндии (Huotari et al., 2011; Huotari et al., 2009).

Полученные нами концентрации CO_2 и CH_4 для озерак грядово-озеркового комплекса верхового болота северной тайги в целом находятся в том же диапазоне концентраций, что и опубликованные данные для других подобных объектов бореального пояса. Поверхностные концентрации ПГ в исследовании (Repo et al., 2007) находятся в пределах, близких к результатам настоящего исследования (CH_4 – 1.06–125.1 мкг/л; CO_2 – 0.97–7.04 мг/л). В работе (Sabrekov et al., 2017) приводятся концентрации метана во внутриболотных озерах Западной Сибири. Средние концентрации на глубине 1 м, приведенные авторами по шести озерам, находятся в диапазоне 0.55–28.5 мкг/л. В исследовании (Pelletier et al., 2014) рассматриваются небольшие водоемы, расположенные в верховом болоте на морском побережье (Квебек, Канада). Приведенные авторами поверхностные концентрации метана в период открытой воды находятся в более широком диапазоне 0.26–327 мкг/л, а концентрации CO_2 в диапазоне 0.25–2.69 мг/л. В работе (Arsenault et al., 2018), приводятся средние концентрации для более чем 150 небольших внутриболотных водоемов, находящиеся в диапазонах 18.03–68.80 мкг/л (CH_4) и 0.53–0.93 мг/л (CO_2).

Анализ литературных источников показал не столь значимую, по сравнению с сезонной,

межгодовую изменчивость потоков и концентраций ПГ во внутриболотных и схожих с ними термокарстовых озерах. Изменения газового режима водоема зависят, главным образом от сезонного хода температур и биологических процессов. Так, результаты исследования динамики концентраций CO_2 в небольшом гуминовом бореальном озере в течение двух лет (Huotari et al., 2009) показали выраженный сезонный ход потоков парниковых газов. Сезонная изменчивость концентраций при этом составила 4–9 раз, в то время как межгодовая изменчивость была незначительной (в 1.4–1.5 раза) как для максимальных, так и для минимальных концентраций). Это подтверждается и проводившимися на этом же озере многолетними исследованиями методом турбулентных пульсаций (Huotari et al., 2011). Исследование (Golub et al., 2023) также показывает значительную внутригодовую изменчивость потоков.

Исследования межгодовой изменчивости концентраций и потоков CO_2 и CH_4 (Zabelina et al., 2021) в термокарстовых озерах Большеземельской тундры, сходных по биогеохимическим характеристикам с внутриболотными озерками (Arsenault et al., 2018), не выявили статистически значимой связи с такими факторами, как межгодовая изменчивость режима температуры и осадков. Несмотря на значительный контраст средних температур и количества осадков в летние периоды 2015 и 2018, в эти годы не было выявлено различий в концентрациях и потоках CO_2 и CH_4 . Исследования (Marushchak et al., 2013) также показали незначительную межгодовую изменчивость потоков CO_2 из термокарстовых озер. Таким образом, поскольку межгодовая изменчивость концентраций и потоков ПГ в объектах, подобных исследуемому, как правило, менее значима, чем внутригодовая, можно сделать выводы об основных закономерностях сезонного хода концентраций CH_4 и CO_2 .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ, ВЫВОДЫ

Исследования показывают, что северные озера перенасыщены парниковыми газами (Глаголев и др., 2010а; Давыдов и др., 2022; McCallister, del Giorgio, 2008; Repo et al., 2007), при этом именно на CO_2 , как правило, приходится 90–99 % эмиссии углерода в атмосферу с поверхности озер, что показывают как данные прямых измерений, так расчетные модели (Lundin et al., 2015; Repo et al., 2007; Zabelina et al., 2021).

Проведенные исследования сезонной динамики парниковых газов в озере Северное показывают, что в зимний период происходит накопление CH_4 и CO_2 в придонных слоях, в связи с протекающими в донных отложениях процессами деструкции органического вещества, а их вертикальное распре-

деление по водной толще, в отсутствие турбулентного и конвективного перемешивания, обусловлено внутриводоемными процессами. К концу зимы начинается прогрев воды, вызывающий подъем насыщенных CH_4 и CO_2 придонных вод к поверхности. После схода льда и последующего установления гомотермии в результате конвективного перемешивания вод, отмечается почти равномерное распределение концентраций CH_4 и CO_2 по всей водной толще.

Как метан, так и углекислый газ в озере Северное демонстрируют поведение, противоречащее зависимостям их растворимости от температуры. Концентрации CH_4 в период открытой воды остаются относительно стабильными и не снижаются летом относительно весенних значений, несмотря на снижение растворимости из-за прогрева воды. Концентрации CO_2 , в свою очередь, снижаются и к концу лета достигают значений ниже равновесных с атмосферой, продолжая уменьшаться и в предзимье, несмотря на выхолаживание озера, ведущее к повышению растворимости.

Перенасыщенность вод метаном в течение всего периода наблюдений и углекислым газом в первую его половину свидетельствует о наличии потока этих парниковых газов в атмосферу. Снижение же в конце лета концентраций CO_2 ниже равновесных с атмосферой значений указывает об изменении направления потока и свидетельствует о том, что в зависимости от сезона года озеро может выступать не только в роли источника, но и в роли поглотителя атмосферного углерода.

Важно отметить, что водная толща мелководных озер в период открытой воды находится под постоянным воздействием ветрового и конвективного перемешивания, что приводит к регулярному перемешиванию и нарушению сезонной стратификации (Ford et al., 2002). Это может вносить неточность в оценки различных аспектов динамики газового режима озер, если для них проводятся однократные измерения в дневное время. Влияние суточной динамики гидрометеорологических и биогеохимических процессов на концентрации ПГ в поверхностных водах в настоящей работе не учитывалось, однако его следует принимать во внимание в дальнейших исследованиях, для получения более точных оценок.

Авторы выражают благодарность научному редактору М.И. Дину и анонимным рецензентам за конструктивные замечания, позволившие улучшить качество статьи.

Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда № 22-27-00828, <http://rscf.ru/project/22-27-00828/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бикбулатов Э.С. (ред.) (1993) Органическое вещество донных отложений волжских водохранилищ. Труды ИБВВ РАН, вып. 66 (69). С.-Пб.: Гидрометеиздат, 144 с.
- Вахрамеева Е.А., Кокрятская Н.М. (2019) Гранулометрический состав донных отложений меромиктических озер (бассейн Белого моря). *Геология морей и океанов: Материалы XIII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Том 3*. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук, 115–118.
- Глаголев М.В., Клепцова И.Е., Казанцев В.С., Филиппов И.В., Максютлов Ш.Ш. (2010) Эмиссия метана из болотных ландшафтов тундры. *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 3 (93), 78–86.
- Глаголев М.В., Сирин А.А., Лапшина Е.Д., Филиппов И.В. (2010а) Изучение потоков углеродсодержащих парниковых газов в болотных экосистемах Западной Сибири. *Вестник Томского государственного педагогического университета*. 3 (93), 120–127.
- Глаголев М.В. (2010) Аннотированный список литературных источников по результатам измерений потоков CH_4 и CO_2 на болотах России. *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 1 (2).
- Голубятников Л.Л., Казанцев В.С. (2013) Вклад тундровых озер западной Сибири в метановый бюджет атмосферы. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*. 49 (4), 430–438. doi: 10.7868/S0002351513040044.
- Давыдов Д.К., Краснов О.А., Симоненков Д.В., Фофанов А.В., Головацкая Е.А., Максютлов Ш.Ш. (2022) Исследование потоков парниковых газов в болотных экосистемах (участок Плотниково Бакчарского болота). *Геосферные исследования*. 4, 67–75. doi: 10.17223/25421379/25/4.
- Добровольская Т.Г., Головаченко А.В., Звягинцев Д.Г., Инишева Л.И., Кураков А.В., Смагин А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Семенова Т.А., Степанов А.Л., Глушакова А.М., Початкова Т.Н., Кухаренко О.С., Качалкин А.В., Якушев А.В., Поздняков Л.А., Богданова О.Ю. (2013) Функционирование микробных комплексов верховых торфяников – анализ причин медленной деструкции торфа / Под ред. И.Ю. Чернова. М.: Товарищество научных изданий КМК, 128 с.
- Жила И.М., Алюшкинская Н.М. (1972) Ресурсы поверхностных вод СССР. Т. 3: Северный край. Л.: Гидрометиздат, 663 с.
- Кривенок Л.А., Глаголев М.В., Фастовец И.А., Смоленцев Б.А., Максютлов Ш.Ш. (2014) Удельные потоки метана из экосистем южной тундры Западной Сибири. *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата*. 5 (1), 26–42.
- Мартынова М.В. (2010) Донные отложения как составляющая лимнических экосистем. М.: Наука, 242 с.
- Потахин М.С. (2006) Обзор классификаций водоемов Карелии. *Водная среда Карелии: исследование, использование, охрана. Материалы II республиканской школы-конференции молодых ученых (20–21.02.2006)*. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 16–21.

- Романовская А.А. (ред.) (2023) Оценка потоков парниковых газов в экосистемах регионов Российской Федерации. М.: ИГКЭ, ООО "Принт", 343 с.
- Сеянина С.Б., Труфанова М.В., Ярыгина О.Н., Орлов А.С., Пономарева Т.И., Титова К.В., Зубов И.Н. (2017) Особенности биотрансформации органических веществ в условиях болотных экосистем Севера (на примере Иласского болотного массива). *Труды института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанова РАН*. **79** (82), 200–206. doi: 10.24411/0320-3557-2017-10040.
- Федоров Ю.А., Гарькуша Д.И., Хромов М.И. (2008) Эмиссия метана с торфяных залежей Иласского болотного массива Архангельской области. *Известия Русского географического общества*. **140** (5), 40–47.
- Хатчинсон Д.Э. (1969) Лимнология: географические, физические и химические характеристики озер. М.: Прогресс, 591 с.
- Arsenault J., Talbot J., Moore T.R. (2018) Environmental controls of C, N and P biogeochemistry in peatland pools. *Sci. Total Environ.* **631–632**, 714–722. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.03.064.
- Bastviken D., Cole J. Pace M., Tranvik L. (2004) Methane emissions from lakes: Dependence of lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate. *Global Biogeochemical Cycles*. **18** (4). doi: 10.1029/2004GB002238.
- Cole J., Caraco N., Kling G., Kratz T. (1994) Carbon Dioxide Supersaturation in the Surface Waters of Lakes. *Science*. **265** (5178), 1568–1570. doi: 10.1126/science.265.5178.1568.
- Dean J.F., Meisel O.H., Martyn Rosco M., Marchesini L.B., Garnett M.H., Lenderink H., van Logtestijn R., Borges A.V., Bouillon S., Lambert T., Röckmann T., Maximov T., Petrov R., Karsanaev S., Aerts R., van Huissteden J., Vonk J.E., Dolman A.J. (2020) East Siberian Arctic inland waters emit mostly contemporary carbon. *Nat. Commun.* **11**(1), 1627. doi: 10.1038/s41467-020-15511-6.
- Downing J.A. (2010) Emerging global role of small lakes and ponds: little things mean a lot. *Limnetica* **29** (1), 9–24. doi: 10.23818/limn.29.02.
- Ford P.W., Boon P.I., Lee K. (2002) Methane and oxygen dynamics in a shallow floodplain lake: the significance of periodic stratification. *Hydrobiologia* **485** (1), 97–110. doi: 10.1023/A:1021379532665.
- Forster P., Storelmo T., Armour K., Collins W., Dufresne J.-L., Frame D., Lunt D.J., Mauritsen T., Palmer M.D., Watanabe M., Wild M., Zhang H. (2021) The Earth's energy budget, climate feedbacks, and climate sensitivity. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 923–1054.
- Golub M., Koupaei-Abyazani N., Vesala T., Mammarella I., Ojala A., Bohrer G., Weyhenmeyer G.A., Blanken P.D., Eugster W., Koebsch F., Chen J., Czajkowski K., Deshmukh C., Guérin F., Heiskanen J., Humphreys E., Jonsson A., Karlsson J., Kling G., Lee X., Liu H., Lohila A., Lundin E., Morin T., Podgrajsek E., Provenzale M., Rutgersson A., Sachs T., Sahlée E., Serça D., Shao C., Spence C., Strachan I.B., Xiao W., Desai A.R. (2023) Diel, seasonal, and inter-annual variation in carbon dioxide effluxes from lakes and reservoirs. *Environ. Res. Lett.* **18** (3), 034046. doi: 10.1088/1748-9326/acb834.
- Gulev S.K., Thorne P.W., Ahn J., Dentener F.J., Domingues C.M., Gerland S., Gong D., Kaufman D.S., Nnamchi H.C., Quaas J., Rivera J.A., Sathyendranath S., Smith S.L., Trewin B., von Schuckmann K., Vose R.S. (2021) Changing state of the climate system. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 287–422.
- Holgerson M.A. (2015) Drivers of carbon dioxide and methane supersaturation in small, temporary ponds. *Biogeochemistry*. **124** (1), 305–318. doi: 10.1007/s10533-015-0099-y.
- Holgerson M.A., Raymond P.A. (2016) Large contribution to inland water CO₂ and CH₄ emissions from very small ponds. *Nat. Geosci.* **9** (3), 222–26. doi: 10.1038/ngeo2654.
- Huotari J., Ojala A., Peltomaa E., Pumpanen J., Hari P., Vesala T. (2009) Temporal variations in surface water CO₂ concentration in a boreal humic lake based on high-frequency measurements. *Boreal Environ. Res.* **14**, 48–60.
- Huotari J., Ojala A., Peltomaa E., Nordbo A., Launiainen S., Pumpanen J., Rasilo T., Hari P., Vesala T. (2011) Long-term direct CO₂ flux measurements over a boreal lake: Five years of eddy covariance data. *Geophys. Res. Lett.* **38**, L18401. doi: 10.1029/2011GL048753.
- Jammet M., Dengel S., Kettner E., Parmentier F.-J.W., Wik M., Crill P., Friborg T. (2017) Year-round CH₄ and CO₂ flux dynamics in two contrasting freshwater ecosystems of the subarctic. *Biogeosciences*. **14** (22), 5189–5216. doi: 10.5194/bg-14-5189-2017.
- Karlsson J., Serikova S., Vorobyev S.N., Rocher-Ros G., Denfeld B., Pokrovsky O.S. (2021) Carbon emission from Western Siberian inland waters. *Nat. Commun.* **12** (1), 825. doi: 10.1038/s41467-021-21054-1.
- Kortelainen P., Rantakari M., Huttunen J.T., Mattsson T., Alm J., Juutinen S., Larmola T., Silvola J., Martikainen P.J. (2006) Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes. *Global Change Biol.* **12** (8), 1554–1567.
- Lammers S., Suess E. (1994) An improved head-space analysis method for methane in seawater. *Mar. Chem.* **47** (2), 115–125. doi: 10.1016/0304-4203(94)90103-1.
- Lundin E.J., Klaminder J., Bastviken D., Olid C., Hansson S.V., Karlsson J. Large difference in carbon emission – burial balances between boreal and arctic lakes *Sci. Rep.* **5** (1), 14248. doi: 10.1038/srep14248.
- Marushchak M.E., Kiepe I., Biasi C., Elsakov V., Friborg T., Johansson T., Soegaard H., Virtanen T., Martikainen P.J. (2013) Carbon dioxide balance of subarctic tundra from plot to regional scales. *Biogeosciences*. **10** (1), 437–452. doi: 10.5194/bg-10-437-2013.
- McCallister S.L., del Giorgio P.A. (2008) Direct measurement of the d¹³C signature of carbon respired by bacteria in lakes: Linkages to potential carbon sources, ecosystem baseline metabolism, and CO₂ fluxes. *Limnol. Oceanogr.* **53** (4), 1204–1216. doi: 10.4319/lo.2008.53.4.1204.
- Ordóñez C., DelSontro T., Langenegger T., Donis D., Suarez E.L., McGinnis D.F. (2023) Evaluation of the methane

- paradox in four adjacent pre-alpine lakes across a trophic gradient. *Nat Commun.* **14**, 2165. doi: 10.1038/s41467-023-37861-7.
- Pelletier L., Strachan I.B., Garneau M., Roulet N.T. (2014), Carbon release from boreal peatland open water pools: Implication for the contemporary C exchange, *J. Geophys. Res. Biogeosci.* **119** (3), 207–222. doi: 10.1002/2013JG002423.
- Repo E., Huttunen J.T., Naumov A.V., Chichulin A.V., Lapshina E.D., Bleuten W., Martikainen P.J. (2007) Release of CO₂ and CH₄ from small wetland lakes in Western Siberia. *Tellus B.* **59** (5), 788–796. doi: 10.1111/j.1600-0889.2007.00301.x.
- Rosentreter J.A., Borges A.V., Deemer B.R., Holgerson M.A., Liu S., Song C., Melack J., Raymond P.A., Duarte C.M., Allen G.H., Olefeldt D., Poulter B., Battin T.I., Eyre B.D. (2021) Half of global methane emissions come from highly variable aquatic ecosystem sources. *Nat. Geosci.* **14** (4), 225–230. doi: 10.1038/s41561-021-00715-2.
- Sabrekov A.F., Runkle B.R.K., Glagolev M.V., Terentieva I.E., Stepanenko V.M., Kotsyurbenko O.R., Maksyutov S.S., Pokrovsky O.S. (2017) Variability in methane emissions from West Siberia's shallow boreal lakes on a regional scale and its environmental controls. *Biogeosciences.* **14** (15), 3715–3742. doi: 10.5194/bg-14-3715-2017.
- Taillardat P., Linkhorst A., Deblois C., Prijac A., Gandois L., Tremblay A., Garneau M. A (2024) Carbon Source in a Carbon Sink: Carbon Dioxide and Methane Dynamics in Open-Water Peatland Pools. *Global Biogeochem.* **38** (4), e2023GB007909. doi: 10.1029/2023GB007909.
- Weiss R.F. (1974) Carbon dioxide in water and seawater: The solubility of a non-ideal gas. *Mar. Chem.* **2** (3), 203–215. doi: 10.1016/0304-4203(74)90015-2.
- Wik M., Varner R.K., Anthony K.W., MacIntyre S., Bastviken D. (2016) Climate-sensitive northern lakes and ponds are critical components of methane release. *Nat. Geosci.* **9** (2), 99–105. doi: 10.1038/ngeo2578.
- Yamamoto S., Alkuskas J.B., Crosier T.E. (1976) Solubility of methane in distilled water and seawater. *J. Chem. Eng. Data.* **21** (1), 78–80.
- Zabelina S.A., Shirokova L.S., Klimov S.I., Chupakov A.V., Lim A.G., Polishchuk Yu.M., Polishchuk V.Yu., Bogdanov A.N., Muratov I.N., Guerin F., Karlsson J., Pokrovsky O.S. (2021) Carbon emission from thermokarst lakes in NE European tundra. *Limnol. Oceanogr.* **66** (S1), 216–230. doi: 10.1002/lno.11560.
- Zubov I.N., Orlov A.S., Selyanina S.B., Zabelina S.A., Ponomareva T.I. (2022) Redox potential and acidity of peat are key diagnostic physicochemical properties for the stratigraphic zones of a boreal raised bog. *Mires and Peat.* **28**. doi: 10.19189/MaP.2020.GDC.StA.1987.

SEASONAL DYNAMICS OF CH₄ AND CO₂ CONCENTRATIONS IN THE BOG LAKE SEVERNOE

S. D. Prasolov^a, *, S. A. Zabelina^a, S. I. Klimov^a, A. V. Chupakov^a, G. N. Losyuk^a

^aLaverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Nikolskiy prospekt, 20, Arkhangeksk, 163020 Russian Federation

*e-mail: sergeyprasolov1@gmail.com

Received October 31, 2023; revised May 14, 2024; accepted June 10, 2024

Bog and lake ecosystems of the boreal region are recognized as important parts of the global biogeochemical carbon cycle. At the same time, many aspects of the dynamics of the gas conditions of bog lakes remain understudied. The paper presents the results of the study of seasonal dynamics of dissolved CH₄ and CO₂ concentrations in the bog lake located in the ridge-lake complex of the Ilassky bog complex, a typical raised bogs of the northern taiga of northwestern Russia. An analysis of the seasonal vertical distribution of greenhouse gases in the water column and the dynamics of surface concentrations with increased time resolution was performed. The reasons and patterns of their variability are considered, including in relation to the characteristics of bottom sediments. Concentrations of CH₄ and CO₂ in the water column during the year vary in wide ranges: from 4 to 652 µg/l and from 0.19 to 19 mg/l, respectively. CH₄ concentrations in surface layer are approximately at the same level from May through August, with values measured in the water (5.9 to 11 µg/L) more than one hundred times higher than equilibrium concentrations with the atmosphere (0.04 to 0.05 µg/L), indicating methane flux to the atmosphere. CO₂ concentrations decrease throughout the open water period and become below equilibrium concentrations with the atmosphere by the end of August, indicating a change in the flux direction and uptake of CO₂ from the atmosphere. The results showed that, depending on the season, a bog lake can act not only as a source but also as a sink for atmospheric carbon, 90–99 % of which is CO₂ according to literature.

Keywords: Arkhangelsk region, greenhouse gases, bog lake, methane, carbon dioxide