

УДК 579.68

О.С. Покровский^{1,2}, Л.С. Широкова², С.Н. Кирпотин³

¹ *Национальный центр научных исследований Франции (г. Тулуза, Франция)*

² *Институт экологических проблем Севера УроРАН (г. Архангельск)*

³ *Биологический институт Томского государственного университета (г. Томск)*

МИКРОБИОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, КОНТРОЛИРУЮЩИЕ ЦИКЛ УГЛЕРОДА В ТЕРМОКАРСТОВЫХ ВОДНЫХ ОБЪЕКТАХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

Работа выполнена в рамках ФЦП (ГК № 14.740.11.0935, шифр 2011-1.5-505-008) и при финансовой поддержке РФФИ-Франция (грант 08-05-92496-НЦНИЛ_а).

Представлены результаты совместных российско-французских исследований, проводящихся с 2008 г. в различных регионах Западной Сибири, в ходе которых были выявлены концептуально новые закономерности биогеохимических процессов трансформации углекислоты в системе тундровых болот и озер, позволяющие более детально прогнозировать развитие арктического региона. Выяснилось, что трансформация органического углерода почв (торфа) в углекислоту наиболее эффективно происходит в водной среде. В этой связи основными факторами выделения CO₂ в атмосферу выступают так называемые термокарстовые озера, формирующиеся в ходе природных процессов таяния мерзлых болот. Учитывая высокое покрытие площади субарктической зоны Западной Сибири термокарстовыми озерами (до 80%), поток CO₂ в атмосферу с поверхности этих озер почти на порядок превышает общий транспорт растворенного органического углерода всеми Сибирскими реками в Северный Ледовитый океан. Неожиданным результатом явилось установление доминирующей роли в выделении CO₂ и метана в атмосферу очень малых озер и термокарстовых просянок площадью менее 100 м² (< 0,01 га). Эти объекты, практически не идентифицируемые из космоса и незадокументированные на картах, вносят огромный вклад в общее покрытие территории водой и общую эвaziю парниковых газов с поверхности суши.

Ключевые слова: термокарстовые озера; биогеохимический цикл углерода; таяние вечной мерзлоты; эмиссия; микробиологическая деструкция органического вещества.

Введение

Известно, что экосистемы Арктики, являясь наиболее подверженными влиянию глобальных (потепление климата) и локальных (загрязнение) факторов окружающей среды, в свою очередь, во многом определяют климат всей планеты, прежде всего через их воздействие на биогеохимический цикл углерода и, соответственно, уровень концентрации углекислоты – мощнейшего парникового газа – в атмосфере. Повышение температуры многолетней

мерзлоты, сопровождаемое размораживанием и высвобождением захороненного органического углерода, является одним из важнейших элементов сценария глобального изменения климата [1]. Хотя самые холодные зоны распространения мерзлоты нагреваются быстрее всего, основные изменения будут происходить, скорее всего, в области прерывистой и островной мерзлоты, где средние годовые температуры выше -2°C [2]. По сравнению со значительными усилиями исследований, посвященных характеристике биогеохимии континентальных водных систем в зоне сплошной мерзлоты [3–5], детальные исследования в области прерывистой и островной мерзлоты, особенно в России, практически отсутствуют.

Этот недостаток информации не позволяет предсказывать потоки обмена углекислоты между сушей и атмосферой, а также моделировать эволюцию химического состава поверхностных вод и потоков углерода и сопряженных элементов в сценарии изменения климата. В этой связи Западная Сибирь представляет особый интерес, так как данный регион содержит зоны распространения как сплошной, так и прерывистой мерзлоты, развитой на достаточно гомогенном литологическом субстрате, перекрытом массивными залежами торфа и расположенной в относительно незатронутой хозяйственной деятельностью человека и доступной территории.

Многочисленные наблюдения за таянием мерзлоты в субарктической Аляске [6], Канаде [7–8] и Швеции [9] подтверждают общий тренд увлажнения экосистем по мере исчезновения мерзлоты. Аналогично происходящие процессы таяния мерзлоты в Западной Сибири, скорее всего, приводят к увеличению поверхности открытой воды так называемых термокарстовых озер. Это, в свою очередь, способствует мобилизации органического углерода (ОУ) из почв в реки и далее в океан, изменяя потоки метана и углекислоты в атмосферу [10–12]. Годовые потоки эмиссии CO_2 с термокарстовых озер Западной Сибири (45 ± 27 моль $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [13]; $8,9 \pm 4,5$ моль $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [14]) близки к таковым в термокарстовых озерах и реках северо-востока Европейской России ($5\text{--}9$ моль $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [15]), обладая такими же порядками величин, как аэробное дыхание в водной толще арктических и умеренных озер ($0,6\text{--}10$ моль $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [16]), озер Аляски (12 моль $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [17]) и термокарстовых болот (16 моль $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [18]). В то же время эти величины существенно выше, чем потоки эмиссии CO_2 в атмосферу из канадских торфяников ($0,73$ моль $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [8]; $0,4\text{--}1,4$ моль $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [19]) и малых бореальных немерзлотных озер ($3,5$ моль $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [20]). Особое значение термокарстовых озер в балансе углерода в высоких широтах состоит в том, что типичная эмиссия CO_2 с поверхности озера в атмосферу (110 ± 50 г $\text{C}/\text{m}^2/\text{год}$ [14; 21–23]) сравнима с типичными величинами поглощения углерода в торфяниках (например, $106\text{--}110$ г $\text{C}/\text{m}^2/\text{у}$ [15]). Близость величин потерь углерода с эмиссией с поверхности термокарстовых озер Западной Сибири в атмосферу ($24\text{--}66$ г C/m^2) в течение бесснежного периода (~ 120 дней) и чистого захвата углерода в торфяниках Сибири ($43\text{--}64$ г C/m^2 [24–25]) уже была

отмечена [13]. Тем не менее годовая эмиссия CO_2 с поверхности озер должна неизбежно перевешивать захват углекислоты почвой и растительностью, учитывая: а) высокие эпизодические эмиссии в течение весеннего снеготаяния [26–27]; б) продолжающееся гетеротрофное потребление органического вещества в озерах подо льдом, когда вся почва находится в замерзшем состоянии. Принимая во внимание высокую долю недавно образованных озер в Западной Сибири (до 48% от площади поверхности водосборов [3, 28–29] и до 60–80% в бассейнах рек Пур, Таз и Надым [30]), не остается сомнений, что термокарстовые озера Западной Сибири, скорее всего, действуют как очень важный и достаточно слабооцененный на сегодняшний день источник углекислоты в атмосфере.

В зоне сплошной мерзлоты таяние мерзлоты способствует мобилизации органического углерода почв в водные резервуары, где биодegradация органического вещества образует постоянный поток углекислоты в атмосферу. В то же время биогеохимическая эволюция водных экосистем, находящихся в зоне прерывистой и островной мерзлоты, все еще остается плохо изученной. Центральная часть Западной Сибири дает уникальную возможность исследования этой переходной зоны благодаря достаточно гомогенным физико-географическим и ландшафтным условиям (торфяная почва, осадочные подстилающие породы, типичная растительность тундры и тайги). Другой важный фактор, делающий эту область крайне привлекательной для комплексных биогеохимических натуральных наблюдений, – это наличие, благодаря развитой инфраструктуре дорожной сети, относительно легкого наземного доступа к озерам, расположенным на водоразделах рек. Такая возможность отсутствует в других районах вечной мерзлоты Сибири и Аляски, где работы проводятся либо по долинам рек, либо в их устьевой дельтовой части (р. Лена, Колыма и Макензи).

По сравнению с большим количеством работ, посвященных биогеохимии CO_2 и CH_4 в почвах и водах мерзлотной зоны, относительно мало данных о микроэлементах, где представлены немногочисленные измерения макрокомпонентов и некоторых металлов (Fe, Al, Mn) в озерах северо-западных территорий Канады [31–35], Канадского арктического архипелага [36–39], Арктической Аляски [40]; Центральной Якутии [41–42] и Северной Евразии [43–44].

Недавно нами была описана эволюция концентрации и форм нахождения коллоидных микроэлементов в водной толще и осадках сукцессии термокарстовых озер северной части Западной Сибири в зоне сплошного распространения мерзлоты (район Нового Уренгоя) [45–46]. Основные изменения в биогеохимии микроэлементов были связаны с гетеротрофным дыханием бактериопланктона, который использовал аллохтонное (почвенное), растворенное и коллоидное ОВ. Тем не менее для того, чтобы экстраполировать полученные результаты в области других бореальных зон, менее подверженных мерзлотным процессам, и в различных типах ландшафтов – лес, болото

и тундра, – необходимы дальнейшие исследования, проводимые в рамках настоящих проектов.

В Западной Сибири, так же как и в других регионах, подверженных действию многолетней мерзлоты, наблюдается систематическая эволюция деградации плоско-бугристых болот (пальзы) начиная с малых депрессий и просадок, которые трансформируются в небольшие озера и, в итоге, в хасыреи, после чего начинается новый цикл [47–49]. В ходе этой эволюции ландшафта наибольшие изменения в химическом и микробиологическом составе воды происходят на первых, начальных этапах протаивания, в малых термокарстовых озерах площадью 0,01–0,1 га [45], которые не учитываются в глобальной базе данных озер (свыше 0,1 га) [46]. Необходимо учесть, что эти малые водные тела вносят огромный вклад в общий гидрологический баланс пресной воды [53], а также в запасы и резервуары РОУ и металлов, равно как и в потоки углекислоты и метана в атмосферу с водной поверхности.

Ожидается, что, учитывая гораздо более высокие концентрации РОУ в начале таяния мерзлоты, по сравнению со зрелыми экосистемами [14, 45], концентрации и потоки CO_2 в этих малых водных телах также будут аномально высокими, исходя из: 1) хорошо установленной пропорциональной зависимости между РОУ и pCO_2 в бореальных озерах [51–52] и 2) установленного возрастания концентрации CO_2 и CH_4 с уменьшением площади поверхности озера в немерзлотных обстановках [20]. Таким образом, оценка эволюции концентраций растворенных CO_2 , CH_4 , РОУ и связанных с ним металлов в зависимости от площади водных объектов составляет вторую задачу настоящей работы.

Наконец, коллоидный статус большинства растворенных микроэлементов является давно известной характеристикой бореальных рек и озер [53–56]. До настоящего времени подавляющее большинство этих исследований в озерах проводилось в немерзлотной умеренной зоне [57–58] или же в реках, дренирующих зоны сплошной мерзлоты [59].

Неизвестно, до какой степени коллоидный статус МЭ сохраняется в термокарстовых озерах и каким образом относительная доля коллоидных комплексов металлов зависит от площади озера, концентрации РОУ и физико-географического контекста (лесные, тундровые или болотные озера). Это является третьей задачей настоящего проекта. В целом, можно ожидать, что получение количественных биогеохимических характеристик ОБ и микроэлементов в различных типах термокарстовых озер представительной территории Западной Сибири в сочетании со спутниковыми наблюдениями позволит перейти к количественному крупномасштабному моделированию резервуаров и потоков химических элементов всей зоны распространения многолетней мерзлоты.

Цель исследований заключалась в установлении и изучении основных микробиологических факторов, контролирующих цикл углерода в термокарстовых озерах Западной Сибири.

Материалы и методики исследования

Исследуемые водные объекты располагаются в центральной и северной части Западной Сибири (62,5–66°N), районе Нового Уренгоя и Ноябрьска в лесных, лесотундровых и тундровых ландшафтах, развитых на сплошной, прерывистой и островной зонах мерзлоты. Подстилающими породами являются неогеновые пески и глинистые отложения, перекрытые 0,5–2,0 м торфа. Основная часть исследованных просадок и термокарстовых озер имеет мерзлотное происхождение, образуется при таянии мерзлоты и представляет собой различные стадии эволюции плоскобугристых болот (пальзы) от малых термокарстовых просадок и депрессий до зрелых озер и остатков хасыреев [14, 47–49]. Детальное описание отбора проб, фильтрации, диализа и химических анализов приведено в предыдущих работах [45, 60–61]. Ультратонкие методы пробоотбора были использованы в настоящей работе [14]. Образцы воды были отобраны в июле – августе 2008 и 2010 гг. с берегов маленьких просадок и понижений либо с надувной лодки ПВХ и немедленно отфильтрованы через стерильный одноразовый фильтр Minisart® (Sartorius, ацетат целлюлозы) с размером пор 0,45 мкм. Растворенный кислород, pH и Eh измерялись на месте с погрешностью 5%, 0,02 единицы и 2 мВ соответственно с помощью оксиметра с полярографическим зондом (WTW, Германия) и портативного pH-метра с комбинированными pH и Eh электродами (HANNA, Германия). Концентрации растворенного органического углерода (POУ), Cl⁻, SO₄²⁻, щелочности, катионов и микроэлементов измерялись стандартными методами, используемыми в лаборатории г. Тулузы [45, 60–61]. Во всех фильтрованных пробах после фиксации бидистиллированной азотной кислотой марки «осч.» (катионы, микроэлементы) или без фиксации (анионы, щелочность, растворенный органический углерод (POУ)) проводились измерения концентраций ионов основного солевого состава, DOC и около 40 микроэлементов методами жидкостной хроматографии HPLC Dionex (Agilent, Германия), атомной абсорбции AAS Perkin Elemer 5000 (Perkin Elemer, Германия), каталитического сжигания POУ на платиновом катализаторе при 900°C с инфракрасным детектором CO₂ Shimadzu TOC 6000 (Shimadzu, Япония) и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой ICP-MS Agilent 8000 (Agilent, Германия) соответственно. Пределы обнаружения для большинства микроэлементов составляли 0,01–0,001 мкг/л, погрешность анализа – от 5 до 10%. Правильность анализов проверяли по международному стандарту SLRS-4, представляющему собой сертифицированную озерную воду (SLRS-4, Канада). Расхождение между измеренными и сертифицированными концентрациями 40 макро-и микрокомпонентов не превышало 20%.

Пробы воды для микробиологических анализов отбирали в стерильные флаконы объемом 250 мл с соблюдением всех асептических правил отбора. Время хранения проб не превышало 2 ч в переносном холодильнике. В по-

севах, инкубируемых при температуре 20°C, проводился учет эвтрофных (ЭБ) и олиготрофных (ОБ) бактерий. Для определения численности бактерий использовали прямой посев на твердые питательные среды глубинным способом. Для определения эвтрофных бактерий использовали мясопептонный питательный агар (Nutrient agar (Fluka-70148)), для олиготрофных бактерий – голодный агар Дифко (Difco Vacto Agar). Озерную воду засеивали на чашки Петри от 0,1 до 1 мл в трех повторностях.

Для измерения концентрации CO_2 и CH_4 отбиралось 60 мл воды без пузырьков в пенициллиновые стеклянные флаконы с добавлением 0,2 мл насыщенного раствора HgCl_2 . Метан и углекислота анализировались в 0,5 мл в 2–3 повторностях с использованием газового хроматографа Agilent. Международные сертифицированные образцы систематически измерялись каждые 5–10 проб; погрешность анализов 5%.

В нескольких типичных озерах, представляющих различные стадии развития термокарста, производились измерения первичной продукции и минерализации органического вещества кислородным методом Винклера с измерением кислорода полярографическим зондом (оксиметр WTW) с погрешностью 10% и пределом обнаружения 0,03 мг С/л/сут.

Результаты исследования

Растворенная двуокись углерода и метан. Все изученные водные объекты, от малых термокарстовых просянок до больших термокарстовых озер, находятся в равновесии с атмосферным кислородом (насыщение $100 \pm 10\%$). Графики зависимости концентрации CO_2 и метана как функция площади исследованных водных объектов представлены на рис. 1 и 2 соответственно. Концентрации CO_2 остаются относительно постоянными в озерах (30–70 mol/L), но увеличиваются почти на порядок в малых понижениях и просянках мерзлоты, на самой начальной стадии образования озер. Все изученные водные объекты являются пересыщенными по отношению к атмосферной CO_2 , характеризуясь концентрациями РОУ выше 5–6 мг/л, эмпирический порог, выше которого озеро является пересыщенным по углекислоте по сравнению с атмосферой [62]. Для зрелых озер с площадью более 100–1000 м² не обнаруживается зависимости между CO_2 и площадью поверхности, в то время как для малых озер и просянок концентрация CO_2 сильно увеличивается с уменьшением размера водного объекта (рис. 1).

Похожий тренд увеличения концентрации с уменьшением площади озер и просянок наблюдается и для метана (рис. 2), с наиболее высокими концентрациями (0,5–5 $\mu\text{mol/L}$), отмеченными в свежих просянках и депрессиях, и гораздо меньшими величинами (от 0,05 до 1 $\mu\text{mol/L}$), отмеченными в средних и больших термокарстовых озерах, все же перемещенных по метану по отношению к атмосфере.

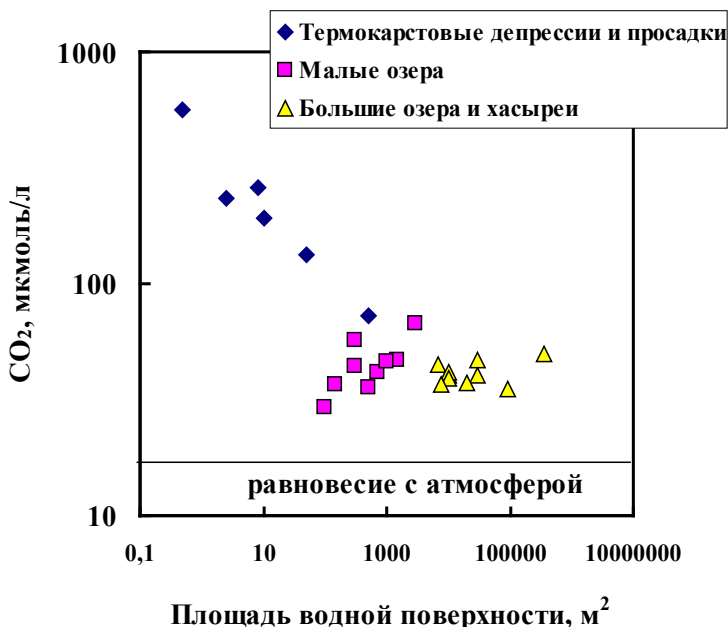


Рис. 1. Корреляционные связи между площадью водной поверхности и концентрациями углекислого газа в водных объектах Западной Сибири

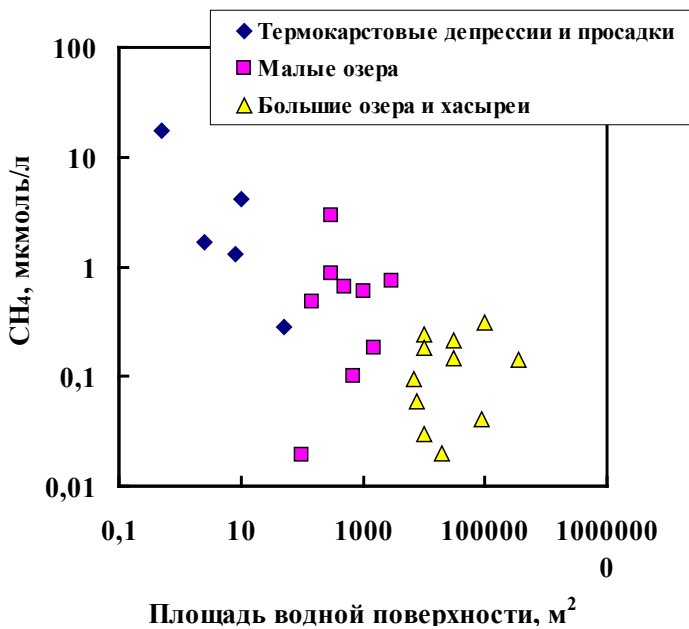


Рис. 2. Зависимость между площадью водной поверхности и концентрациями метана в водных объектах зон сплошной и островной мерзлоты Западной Сибири

го бактериопланктона в термокарстовых озерах варьировали в пределах 2–6900 КОЕ/мл для эвтрофного и 45–11200 КОЕ/мл – для олиготрофного бактериопланктона. Медианные значения содержания эвтрофного бактериопланктона составили 344 и 765 КОЕ/мл для олиготрофного бактериопланктона соответственно. Необходимо также отметить, что в озерах с глубиной более пяти метров отмечено уменьшение содержания гетеротрофного бактериопланктона с глубиной, с превалированием эвтрофной составляющей. Это, вероятно, обусловлено присутствием и активностью фитопланктонного сообщества, являющегося источником легкоусвояемого органического вещества в растворенной и взвешенной формах, служащего субстратом для гетеротрофных бактерий.

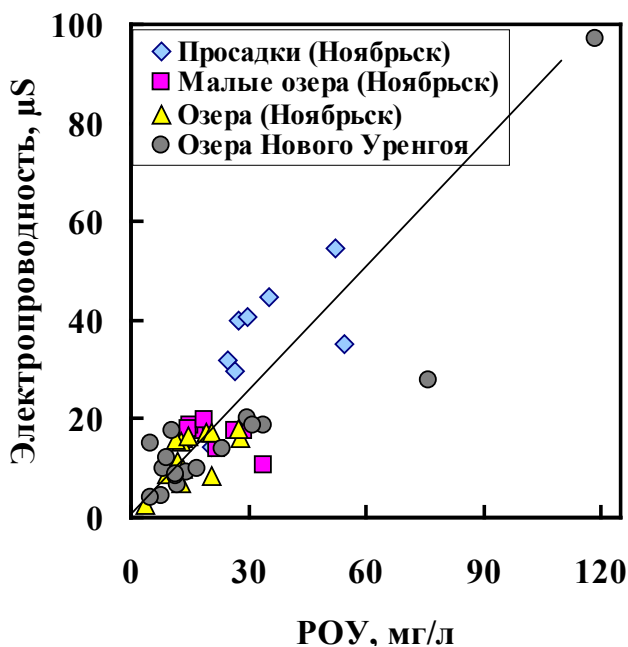


Рис. 4. Зависимость между электропроводностью растворов (общей солевой нагрузки) и концентрацией растворенного органического углерода в термокарстовых депрессиях, малых и больших озерах зон сплошной и островной мерзлоты Западной Сибири

Построена корреляционная зависимость между концентрациями эвтрофного бактериопланктона и растворенным органическим углеродом в различных водных экосистемах Западной Сибири: депрессиях, малых озерах, сформированных озерах, реках района г. Новосибирска; озерах района города Нового Уренгоя (рис. 5).

Слабая корреляционная связь указывает на то, что растворенный углерод находится в трудноусвояемой форме в «молодых» термокарстовых озерах,

поступающий в водную толщу в основном из донного торфа и при береговой абразии мерзлых торфяников. Однако в целом наблюдается тенденция увеличения концентрации гетеротрофного бактериопланктона с увеличением содержания растворенного органического углерода.

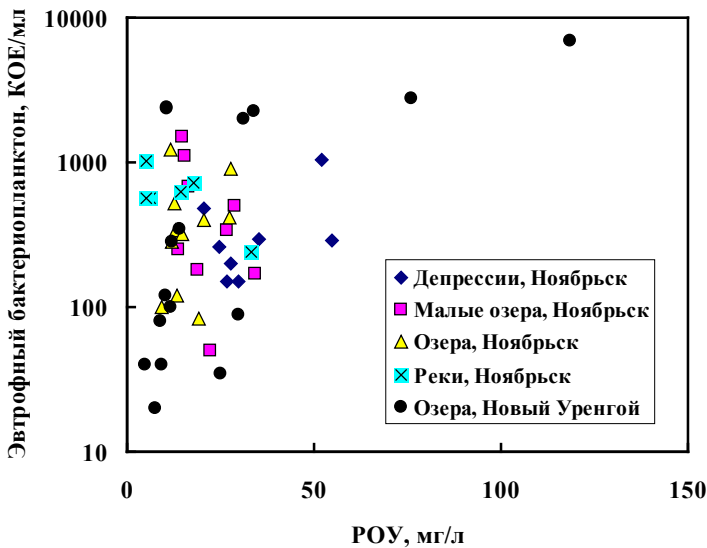


Рис. 5. Зависимость между концентрациями растворенного органического углерода и эвтрофным бактериопланктоном в водных объектах зоны сплошной и островной мерзлоты Западной Сибири

Процессы минерализации органического вещества. Интегральные величины аэробной деструкции органического вещества и дыхания бактериопланктоном в районах Нового Уренгоя и Ноябрьска приведены в таблице. Аэробная минерализация ОВ бактериопланктоном варьирует в пределах от 75 до 92% общего потребления кислорода. В зоне прерывистой и островной мерзлоты (район г. Ноябрьска) средняя интенсивность аэробной деструкции ОВ изменяется в пределах от 0,30 до 0,36 мг С м⁻³ × сут⁻¹. Самая высокая скорость минерализации наблюдалась в малом недавно образованном озере, очень богатом РОУ. На рис. 6 представлена зависимость между аэробной деструкцией ОВ и содержанием РОУ в воде озер из двух исследованных районов. Так, отмечается возрастание интенсивности аэробной деструкции ОВ с увеличением концентрации РОУ, хотя коэффициент корреляции ($r^2 = 0,44$) не высок. Скорость деструкции ОВ в термокарстовых озерах значительно ниже таковой в бореальных озерах ледникового происхождения Архангельской области [63].

Важно отметить, что в исследованных водных объектах превалировала деструкция органического вещества, образование первичной продукции не было зафиксировано в пределах обнаружения метода (0,03 мг С м⁻³ сут⁻¹).

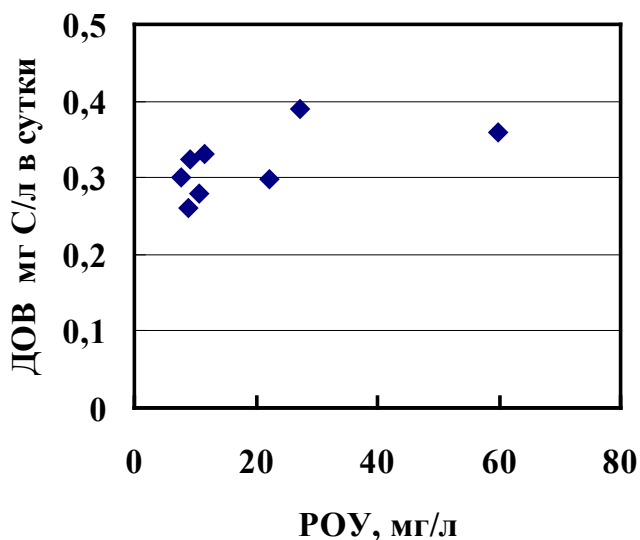


Рис. 6. Зависимость между растворенным органическим углеродом и интенсивностью деструкционных процессов в водных объектах зон сплошной и островной мерзлоты Западной Сибири

Показатели интенсивности деструкции органического вещества в озерах Западной Сибири

| Озеро | Деструкция органического вещества, мг С л ⁻¹ × сут ⁻¹ | Дыхание бактериопланктона, мг С л ⁻¹ × сут ⁻¹ | Отношение дыхания бактериопланктона к деструкции ОВ, % | Время удвоения бактериопланктона, ч |
|---|---|---|--|-------------------------------------|
| Район г. Новый Уренгой | | | | |
| Озеро Широкое | 0,28 | Не определялось | Не определялось | 36 |
| Ямсовой-2 (U-12) | 0,33 | 0,29 | 86,4 | 42 |
| Озеро в центре спущенного хасырея (U-13) 0,5 м | 0,3 | 0,29 | 95 | 64 |
| Озеро в центре спущенного хасырея (U-13) 1,25 м | 0,26 | 0,26 | 100 | 56 |
| Район г. Ноябрьска | | | | |
| Озеро Тяту-Мамонтогай | 0,30 | 0,22 | 75 | Не определялось |
| Озеро Чайчье | 0,32 | 0,30 | 92 | Не определялось |
| Озеро Ветряное | 0,39 | 0,33 | 85 | Не определялось |
| Озеро Черное | 0,36 | 0,33 | 91 | Не определялось |

Возможной причиной этого является то, что объектами изучения были в основном несформировавшиеся озерные экосистемы, где фитопланктонные сообщества отсутствовали в силу достаточно низких показателей рН среды, которые варьировали в пределах 3–5. В то же время исследования Н.В. Савченко [64] показали, что современные термокарстовые озера территории тундры и лесотундры имеют неустойчивую экосистему, что сказывается на видовом разнообразии планктонных и бентосных сообществ. Он значительно ниже, чем в глубоководных озерах ледниково-тектонического происхождения и в сравнительно крупных пойменных водоемах. В термокарстовых озерах, как правило, величины первичной продукции значительно превышают скорость деструкции ОВ. В.Г. Драбковой [65] установлено, что для озер характерно уменьшение роли бактерий в процессах деструкции органического вещества при увеличении их биопродуктивности. Однако исследованные нами озера Западной Сибири находятся в стадии развития, формирования сообществ, следовательно, бактериопланктон играет ведущую роль в деструкционных процессах.

Обсуждение результатов исследования

Концентрации CO_2 в исследованных озерах района г. Ноябрьска Западной Сибири (30–100 мкмоль/л) сравнимы с величинами, полученными в районах Ханты-Мансийска и Нового Уренгоя (от 22 до 160 мкмоль/л) [13] и многочисленными литературными данными по другим бореальным озерам (25–200 мкмоль/л) [51], включая последние данные по Канадским малым озерам (20–105 мкмоль/л) [66] и Финским торфяным озерам (~160 мкмоль/л, или 810 мкратм) [67]. Соответственно, концентрации метана в исследованных озерах (0,03–1 мкмоль/л) близки к результатам многочисленных измерений метана в таящих озерах Восточной Сибири [68], озер арктической Аляски [69], Финляндии (0,2–1,8 мкмоль/л) [20] и Швеции (0,1–1,9 мкмоль/л) [70]. Таким образом, практически все исследованные водные объекты существенно пересыщены по отношению к углекислоте атмосферы.

Так, нами отмечено систематическое снижение общей растворенной концентрации углерода ($<0,45 \mu\text{m}$) в ряду: просадки мерзлых бугров – малые депрессии > малые озера > большие и зрелые термокарстовые озера > реки. Такая тенденция находится в согласии с другими данными, полученными в областях прерывистой мерзлоты на Аляске, где термокарстовые депрессии, сформированные в результате таяния мерзлоты, содержали до 37,5 мг/л РОУ, что значительно выше по сравнению с реками, дренирующими мерзлотные зоны (2–6 мг/л) [71]. В северной части Западной Сибири депрессии, просадки и растущие малые озера с площадью поверхности менее 1000 м² характеризуются концентрациями CH_4 и CO_2 в 3–10 раз выше и концентрациями РОУ в 2–3 раза выше таковых в больших «обычных» термокарстовых озерах (см. рис. 1). Эти малые водные объекты площадью от 10 до 1000 м²,

не учтенные в настоящее время в имеющихся базах данных по мировым озерам [47], могут оказаться важнейшими источниками парниковых газов в атмосферу, а также весьма существенными резервуарами высококомбинированного, растворенного органического углерода. Более того, самое сильное увеличение концентраций CO_2 , CH_4 и РОУ с уменьшением площади поверхности наблюдалось для площадей $<1000 \text{ м}^2$, будучи максимальной в малых депрессиях и просадках мерзлоты – площадью от 1 до 100 м^2 . Данные и достаточно распространенные малые водные объекты являются практически «невидимыми» спутниковыми методами наблюдений и отсутствуют на имеющихся топографических картах. Они могут оказаться крайне важными «фабриками» трансформации ископаемого плейстоценового углерода торфа в растворенный органический углерод. Образующийся РОУ перерабатывается гетеротрофным аэробным бактериопланктоном в углекислоту, выделяющуюся в атмосферу. Важно отметить, что существующие крупномасштабные карты распространения озер [72] не включают озера площадью менее $0,1 \text{ км}^2$, и, таким образом, очень сильно недооцениваются количество и площадь покрытия малых термокарстовых озер, чья роль в производстве метана хорошо известна [73].

Все изученные малые и большие термокарстовые озера характеризуются нетто гетеротрофным статусом, обеспечивая существенный поток углекислоты в атмосферу с поверхности озера вследствие минерализации РОУ бактериопланктоном. Величины гетеротрофного дыхания ($0,32 \pm 0,04 \text{ г/С/м}^3 \text{ сут}^{-1}$ до $5 \pm 2,5 \text{ мол/С/м}^2 \text{ год}^{-1}$), измеренные в термокарстовых озерах глубиной $0,25\text{--}0,75 \text{ м}$, расположенных в зоне прерывистой и островной мерзлоты, сравнимы с показателями в других бореальных и мерзлотных озерах ($5\text{--}9 \text{ моль С/м}^2 \text{ год}^{-1}$) [15], включая озера области сплошной мерзлоты ($8,9 \pm 4,5 \text{ моль С/м}^2 \text{ год}^{-1}$ в больших озерах $0,5\text{--}1,5 \text{ м}$ глубины) [14].

Поскольку все имеющиеся измерения газообмена с атмосферой проводились на больших водных объектах либо почвенных пробных площадях, малые термокарстовые депрессии не принимались во внимание. В настоящее время наблюдается увеличение доли малых озер и просадок мерзлоты за счет спуска (дренирования) больших озер в речную сеть. В свою очередь, это приведет к усилению микробиологической деструкции ископаемого торфа в термокарстовых просадках и малых озерах и увеличению выделения углекислоты и метана в атмосферу в 5–10 раз выше, чем в настоящее время. Имеется два очень опасных последствия существования этих озер. Во-первых, концентрации CO_2 и CH_4 в них в 5–10 раз выше, чем в обычных зрелых экосистемах, изучаемых до настоящего времени. Во-вторых, по мере продолжающегося таяния мерзлоты будет происходить увеличение доли малых озер и просадок мерзлоты за счет спуска (дренирования) больших озер в речную сеть. В результате имеющиеся оценки выноса парниковых газов в атмосферу природными процессами могут быть существенно занижены.

Заключение

Исследования термокарстовых просадок, малых и больших озер и хасыреев, проведенные в зоне островной и прерывистой мерзлоты, выявили систематическое увеличение концентраций растворенных CO_2 , CH_4 , РОУ, макрокомпонентов и тяжелых металлов с уменьшением размера водных объектов. Наибольшее пересыщение по отношению к атмосферной углекислоте наблюдалось в малых просадках и озерах площадью 1–100 м². Основным механизмом, ответственным за формирование состава воды озер, от начала таяния мерзлоты в пальзе до больших термокарстовых озер, является прогрессивная минерализация растворенного органического вещества торфа азробными гетеротрофными бактериями, вероятно, сопровождаемая фоторазложением. Это предполагает, что в начале процессов таяния мерзлых бугров пальзы концентрация РОУ и парниковых газов в водных объектах будет увеличиваться. Более того, усиливающееся таяние мерзлоты в Западной Сибири может привести к замещению больших (зрелых) термокарстовых озер, которые дренируются в речную сеть гораздо меньшими по площади, но очень многочисленными просадками и озерами. Эти малые водные объекты площадью 1–100 м², невидимые на топографических картах и при спутниковой съемке и отсутствующие в существующих базах данных по озерам, могут оказаться крайне важными и пока не учитываемыми источниками эмиссии парниковых газов в атмосферу и потока РОУ и растворенных металлов в реки и Северный Ледовитый океан. По сравнению с настоящим состоянием озер, это увеличение может достигать 3–10 раз и будет гораздо сильнее проявлено в зоне островной/прерывистой мерзлоты по сравнению с зоной сплошной мерзлоты на севере Западной Сибири.

Литература

1. Schuur E.A.G., Bockheim J., Canadel J.P. et al. Vulnerability of permafrost carbon to climate change: Implications for the global carbon cycle // *BioScience*. 2008. Vol. 58. P. 701–714.
2. Romanovsky V.E., Smith S.L., Christiansen H.H. Permafrost thermal state in the polar northern hemisphere during International Polar Year 2007–2009: synthesis // *Permafrost Periglacial Processes*. 2010. Vol. 21. P. 106–116.
3. Zimov S.A., Voropaev Y.V., Semiletov I.P. et al. North Siberian lakes: a methane source fueled by Pleistocene Carbon // *Science*. 1997. Vol. 277. P. 800–802.
4. Десяткин П.В. Почвообразование в термокарстовых котловинах – аласах криолитозоны. Новосибирск : Наука, 2008. 323 с.
5. Desyatkin A.R., Takakai F., Fedorov P. et al. CH_4 emission from different stages of thermokarst formation in Central Yakutia, East Siberia // *Soil Science and Plant Nutrition*. 2009. Vol. 55. P. 558–570. doi: 10.1111/j.1747-0765.2009.00389.
6. Jorgenson M.T., Racine C.H., Walters, J.C., Osterkamp T.E. Permafrost degradation and ecological changes associated with a warming in central Alaska // *Climate Change*. 2001. Vol. 48. P. 551–579.
7. Payette S., Delwaide A., Caccianiga M., Beauchemin M. Accelerated thawing of subarctic permafrost over the last 50 years. *Geophys // Geographical Research Letters*. 2004. Vol. 31. L18208. doi: 10.1029/2004GL020358.

8. *Turetsky M.R., Wieder R.K., Vitt D.H.* Boreal peatland C fluxes under varying permafrost regimes // *Soil Biology & Biochemistry*. 2002. Vol. 34. P. 907–912.
9. *Christensen T.R., Johansson T., Akerman H.J. et al.* Thawing sub-arctic permafrost: Effects on vegetation and methane emissions // *Geophysical Research Letters*. 2004. Vol. 31. L04501. doi: 10.1029/2003GL018680.
10. *Smith L.C., Sheng Y., McDonald G.M., Hinzman L.D.* Disappearing Arctic lakes // *Science*. 2005. Vol. 308. P. 1429.
11. *Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P., Verbyla D., Chapin III F.S.* Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming // *Nature*. 2006. Vol. 443. P. 71–75.
12. *Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S.* Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2007. Vol. 365. P. 1657–1676. doi:10.1098/rsta.2007.2036.
13. *Ripo M.E., Huttunen J.T., Naumov A.V. et al.* Release of CO₂ and CH₄ from small wetlands lakes in Western Siberia // *Tellus*. 2007. Vol. 59B. P. 788–796. doi: 10.1111/j.1600-0889.2007.00301.x
14. *Shirokova L.S., Pokrovsky O.S., Kirpotin S.N., Dupré B.* Heterotrophic bacterio-plankton in thawed lakes of northern part of Western Siberia controls the CO₂ flux to the atmosphere // *International Journal of Environmental Studies*, Special Issue “Western Siberia” 66. 2009. Vol. 4. P. 433–445. doi: 10.1080/00207230902758071.
15. *Heikkinen J.E.P., Virtanen T., Huttunen J.T. et al.* Carbon balance in east European tundra // *Global Biogeochem. Cycles*. 2004. Vol. 18. P. GB1023. doi: 10.1029/2003GB002054.
16. *Ramlal P.S., Hesslein R.H., Hecky R.E. et al.* The organic carbon budget of a shallow Arctic tundra lake on the Tuktoyaktuk Peninsula, N.W.T., Canada // *Biogeochemistry*. 1994. Vol. 24. P. 145–172.
17. *Kling G.W., Kipphut G.W., Miller M.C.* The flux of CO₂ and CH₄ from lakes and rivers in arctic Alaska // *Hydrobiologia*. 1992. Vol. 240. P. 23–36.
18. *Wickland K.P., Striegl R.G., Neff J.C., Sachs Th.* Effects of permafrost melting on CO₂ and CH₄ exchange of a poorly drained black spruce lowland // *J. Geophysical Research*. 2006. Vol. 111. P. G02011. doi: 10.1029/2005JG000099.
19. *Vitt D.H., Halsey L.A., Bauer I.E., Campbell C.* Spatial and temporal trends in carbon storage of peatlands of continental western Canada through the Holocene // *Canadian J. Earth Sciences*. 2000. Vol. 37(5). P. 683–693.
20. *Kortelainen P., Rantakari M., Huttunen J.T. et al.* Sediment respiration and lake trophic state are important predictors of large CO₂ evasion from small boreal lakes // *Global Change Biology*. 2006. Vol. 12. P. 1554–1567.
21. *Shirokova L.S., Pokrovsky O.S.* Biogeochemistry of thermokarst lakes in discontinuous and sporadic permafrost zone of Western Siberia // *Geophysical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2010. Vol. 13. P. EGU2011-3714. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2011/EGU2011-3714.pdf>
22. *Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N., Dupre B.* Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation // *Geophysical Research Abstracts*. EGU General Assembly 2010. Vol. 12. P. EGU2010-1694.
23. *Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N. et al.* Effect of permafrost thawing on the organic carbon and trace element colloidal speciation and microbial activity in thermokarst lakes of Western Siberia // *Biogeosciences Discuss*. 2010. Vol. 7. P. 8041–8086. doi:10.5194/bgd-7-8041-2010.
24. *Arneth A., Kurbatova J., Kolle O., Shibistova O.B., Lloyd J.* Comparative ecosystem-atmosphere exchange of energy and mass in a European Russian and central Siberian bog II. Interseasonal and interannual variability of CO₂ fluxes // *Tellus*. 2002. Vol. 548. P. 514–530.

25. *Friborg T., Soegaard H., Christensen T.R. et al.* Siberian wetlands: Where a sink is a source // *Geophysical Research Letters*. 2003. Vol. 30. P. 2129. doi: 10.1029/2003GL017797.
26. *Striegl R.G., Michmerhuizen C.M.* Hydrologic influence on methane and carbon dioxide dynamics at two north-central Minnesota lakes // *Limnology and Oceanography*. 1998. Vol. 43. P. 1519–1529.
27. *Michmerhuizen C.M., Striegl R.G., McDonald M.E.* Potential methane emission from north-temperate lakes following ice melt // *Limnology and Oceanography*. 1996. Vol. 41(5). P. 985–991.
28. *Hinkel K.M., Eisner W.R., Bockheim J.G. et al.* Spatial Extent, Age, and Carbon Stocks in Drained Thaw Lake Basins on the Barrow Peninsula, Alaska // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2003. Vol. 35. P. 291–300.
29. *Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D.* Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // *J. Geophysical Research*. 2006. Vol. 11. P. G04002. doi: 10.1029/2005JG000150.
30. *Zakharova E.A., Kouraev A.V., Kolmakova M.V. et al.* The modern hydrological regime of the northern part of Western Siberia from in situ and satellite observations // *International Journal of Environmental Studies*. 2009. Vol. 66. P. 447–463. doi: 10.1080/00207230902823578.
31. *Pienitz R., Smol J.P., Lean D.R.S.* Physical and chemical limnology of 24 lakes located between Yelloknife and Contwoyto Lake, Northwest Territories (Canada) // *Canadian J. Fisheries Aquatic Sciences*. 1997. Vol. 54. P. 347–358.
32. *Pienitz R., Smol J.P., Lean D.R.S.* Physical and chemical limnology of 59 lakes located between the southern Yukon and the Tuktoyaktuk Peninsula, Northwest Territories (Canada) // *Canadian J. Fisheries Aquatic Sciences*. 1997. Vol. 54. P. 330–346.
33. *Rühland K., Smol J.P.* Limnological characteristics of 70 lakes spanning Arctic treeline from Coronation Gulf to Great Slave lake in the Central Northwest territories, Canada // *International Review of Hydrobiology*. 1998. Vol. 83. P. 183–203.
34. *Lim D.S.S., Douglas M.S.V., Smol J.P.* Limnology of 46 lakes and ponds on Banks Island, N.W.T., Canadian Arctic Archipelago // *Hydrobiologia*. 2005. Vol. 545. P. 11–32.
35. *Coté G., Pienitz R., Velle G., Wang X.* Impact of geese on the limnology of lakes and ponds from Bylot Island (Nunavut, Canada) // *International Review of Hydrobiology*. 2010. Vol. 95. P. 105–129.
36. *Lim D.S.S., Douglas M.S.V., Smol J.P., Lean D.R.S.* Physical and chemical limnological characteristics of 38 lakes and ponds on Bathurst Island, Nunavut, Canadian High Arctic // *International Review of Hydrobiology*. 2001. Vol. 86. P. 1–22.
37. *Michelutti N., Douglas M.S.V., Lean D.R.S., Smol J.P.* Physical and chemical limnology of 34 ultra-oligotrophic lakes and ponds near Wanniat Bay, Victoria Island, Arctic Canada // *Hydrobiologia*. 2002. Vol. 482. P. 1–13.
38. *Michelutti N., Douglas M.S.V., Muir D.C.G. et al.* Limnological characteristics of 38 lakes and ponds on Axel Heiberg Island, High Arctic Canada // *International Review of Hydrobiology*. 2002. Vol. 87. P. 385–399.
39. *Antoniades D., Douglas M.S.V., Smol J.P.* The physical and chemical limnology of 24 ponds and one lake from Isachsen, Ellef Ringnes Island // *International Review of Hydrobiology*. 2003. Vol. 88. P. 519–538.
40. *Kling G.W., O'Brien W.J., Miller M.C., Hershey A.E.* The biogeochemistry and zoogeography of lakes and rivers in arctic Alaska // *Hydrobiologia*. 1992. Vol. 240. P. 1–14.
41. *Kumke T., Ksenofontova M., Pestryakova L. et al.* Limnological characteristics of lakes in the lowlands of Central Yakutia, Russia // *J. Limnology*. 2007. Vol. 66. P. 40–53.
42. *Wetterich S., Herzsuh U., Meyer H. et al.* Evaporation effects as reflected in freshwaters and ostracod calcite from modern environments in Central and Northeast Yakutia (East Siberia, Russia) // *Hydrobiologia*. 2008. Vol. 614. P. 171–195.

43. Duff K.E., Laing T.E., Smol J.P., Lean D.R.S. Limnological characteristics of lakes located across arctic treeline in northern Russia // *Hydrobiologia*. 1999. Vol. 391. P. 205–222.
44. Solovieva N., Jones V.J., Nazarova L. et al. Palaeolimnological evidence for recent climatic change in lakes from the northern Urals, arctic Russia // *J. Paleolimnology*. 2005. Vol. 33. P. 463–482.
45. Pokrovsky O.S., Shirokova L.S., Kirpotin S.N. et al. Effect of permafrost thawing on the organic carbon and metal speciation in thermokarst lakes of Western Siberia // *Biogeosciences*, Special issue Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere Interface. 2011. Vol. 8. P. 565–583. doi:10.5194/bg-8-565-2011.
46. Audry S., Pokrovsky O.S., Shirokova L.S. et al. Early diagenesis processes and their effect on organic matter mineralization and trace element post-depositional redistribution in Western Siberia thermokarst lakes // *Biogeosciences Discuss*. 2011. Vol. 8. P. 8845–8894. doi:10.5194/bgd-8-8845-2011.
47. Downing J.A., Prairie Y.T., Cole J.J. et al. The global abundance and size distribution of lakes, ponds, and impoundments // *Limnology and Oceanography*. 2006. Vol. 51(5). P. 2388–2397.
48. Курпотин С.Н., Полищук Ю.М., Брыксина Н.А. Динамика площадей термокарстовых озер в зонах сплошной и прерывистой криолитозон зоны Западной Сибири в условиях глобального потепления // *Вестник Томского государственного университета*. 2008. № 311. С. 185–189.
49. Kirpotin S., Polishchuk Yu., Zakharova E. et al. One of possible mechanisms of thermokarst lakes drainage in West-Siberian North // *International Journal of Environmental Studies*. 2008. Vol. 65. P. 631–635.
50. Kirpotin S.N., Berezin A., Bazanov V. et al. West Siberian wetlands as indicator and regulator of climate change on the global scale // *International Journal of Environmental Studies*, Special Issue “Western Siberia”. 2009. Vol. 66. P. 409–421. doi: 10.1080/00207230902753056.
51. Sobek S., Algesten G., Bergstrom A.-K. et al. The catchment and climate regulation of pCO₂ in boreal lakes // *Global Change Biology*. 2003. Vol. 9. P. 630–641.
52. Larsen S., Andersen T., Hessen D.O. The pCO₂ in boreal lakes: Organic carbon as a universal predictor? // *Global Biogeochem Cycles*. 2011. Vol. 25. P. GB2012. doi: 10.1029/2010GB003864.
53. Ingri J., Widerlund A., Land M. et al. Temporal variations in the fractionation of the rare earth elements in a boreal river; the role of colloidal particles // *Chemical Geology*. 2000. Vol. 166. P. 23–45.
54. Pokrovsky O., Schott J. Iron colloids/organic matter associated transport of major and trace elements in small boreal rivers and their estuaries (NW Russia) // *Chemical Geology*. 2002. Vol. 190. P. 141–179.
55. Andersson K., Dahlgvist R., Turner D. et al. Colloidal rare earth elements in a boreal river: Changing sources and distributions during the spring flood // *Geochimica et. Cosmochimica Acta*. 2006. Vol. 70. P. 3261–3274.
56. Stolpe B., Hassellöv M. Nanofibrils and other colloidal biopolymers binding trace elements in coastal seawater: Significance for variations in element size distributions // *Limnology and Oceanography*. 2010. Vol. 55(1). P. 187–202.
57. Hamilton-Taylor J., Smith E.J., Davison W., Sugiyama M. Resolving and modeling the effects of Fe and Mn redox cycling on trace metal behavior in a seasonally anoxic lake // *Geochimica et. Cosmochimica Acta*. 2005. Vol. 69. P. 1947–1960.
58. Achterberg E.P., Van den Berg C.M.G., Boussemart M., Davison W. Speciation and cycling of trace metals in Esthwaite Water: A productive English lake with seasonal deep-water anoxia // *Geochim Geochimica et. Cosmochimica Acta*. 1997. Vol. 61. P. 5233–5253.
59. Pokrovsky O.S., Schott J., Dupré B. Trace element fractionation and transport in boreal rivers and soil porewaters of permafrost-dominated basic terrain in Central Siberia // *Geochimica et. Cosmochimica Acta*. 2006. Vol. 70. P. 3239–3260.

60. *Vasyukova E.V., Pokrovsky O.S., Viers J. et al.* Trace elements in organic- and iron-rich surficial fluids of the Boreal zone: Assessing colloidal forms via dialysis and ultrafiltration // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2010. Vol. 74. P. 449–468.
61. *Pokrovsky O.S., Viers J., Shirokova L.S. et al.* Dissolved, suspended, and colloidal fluxes of organic carbon, major and trace elements in Severnaya Dvina River and its tributary // *Chemical Geology*. 2010. Vol. 273. P. 136–149.
62. *Prairie Y.T.* Carbocentric limnology: looking back, looking forward // *Canadian J. Fisheries Aquatic Sciences*. 2008. Vol. 65. P. 543–548.
63. *Широкова Л.С., Воробьева Т.Я., Забелина С.А. и др.* Характеристика продукционно-деструкционных процессов малых озер Архангельской области // *Современные проблемы науки и образования*. 2008. № 5. С. 17–24.
64. *Савченко Н.В.* Гидробиологический мониторинг озер Западной Сибири и особенности их экологической устойчивости // *Биоразнообразие, проблемы экологии Горного Алтая и сопредельных регионов: настоящее, прошлое, будущее : материалы II Международной конференции. 20–24 сентября 2010 г. Горно-Алтайск : РИО ГАГУ, 2009. С. 242–247.*
65. *Драбкова В.Г.* Зональное изменение интенсивности микробиологических процессов в озерах. Л. : Наука, 1981. 212 с.
66. *Laurion I., Vincent W.F., MacIntyre S. et al.* Variability in greenhouse gas emissions from permafrost thaw ponds // *Limnology and Oceanography*. 2010. Vol. 55. P. 115–133.
67. *Rantakari M., Kortelainen P.* Controls of organic and inorganic carbon in randomly selected Boreal lakes in varied catchments // *Biogeochemistry*. 2008. Vol. 91. P. 151–162. doi: 10.1007/s10533-008-9266-8.
68. *Semiletov I.P., Pipko I.I., Pivovarov N.Ya. et al.* Atmospheric carbon emission from North Asian Lakes: a factor of global significance // *Atmospheric Environment*. 1996. Vol. 30. P. 1657–1671.
69. *Kling G.W., Kipphut G.W., Miller M.C.* The flux of CO₂ and CH₄ from lakes and rivers in arctic Alaska // *Hydrobiologia*. 1992. Vol. 240. P. 23–36.
70. *Bastviken D., Cole J., Pace M., Tranvik L.* Methane emissions from lakes: Dependence on lake characteristics, two regional assessments, and a global estimate // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. P. GB4009. doi:10.1029/2004GB002238.
71. *Balcarczyk K.L., Jones Jr. J.B., Jaffé R., Maie N.* Stream dissolved organic matter bioavailability and composition in watersheds underlain with discontinuous permafrost // *Biogeochemistry*. 2009. Vol. 94. P. 255–270. doi: 10.1007/s10533-009-9324-x.
72. *Lehner B., Doll P.* Development and validation of a global database of lakes, reservoirs and wetlands // *J. Hydrology*. 2004. Vol. 296. P. 1–22.
73. *Walter K.M., Smith L.C., Chapin F.S.* Methane bubbling from northern lakes: present and future contributions to the global methane budget // *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 2007. Vol. 365. P. 1657–1676. doi:10.1098/rsta.2007.2036.

Поступила в редакцию 1.06.012 г.

Oleg S. Pokrovsky^{1,2}, Liudmila S. Shirokova¹, Sergey N. Kirpotin³

¹ Géoscience Environnement Toulouse, Université de Toulouse,
CNRS-IRD-OMP, Toulouse, France

² Institute of Ecological Problems of the North, Russian Academy
of Science, Arkhangelsk, Russia

³ Biology Institute of Tomsk State University, Tomsk, Russia

MICROBIOLOGICAL FACTORS CONTROLLING CARBON CYCLE IN THERMOKARST WATER BODIES OF WESTERN SIBERIA

Results of French-Russian collaborative research that have been conducted since 2008 in different regions of Western Siberia are presented. We have identified new features of biogeochemical cycle of carbon transformation in the system of tundra lakes and bogs which allow better prediction of the development of the Arctic region. It has been established that the transformation of organic carbon of soil (peat) into carbon dioxide is most efficient in aqueous solution. In this regard, the main factors of CO₂ evasion to the atmosphere in Western Siberia will be so-called thermokarst lakes that are formed during natural processes of frozen bogs thawing. Given very high coverage of the subarctic zone of Western Siberia by thermokarst lakes (up to 80%), the flux of CO₂ to the atmosphere from the surface of these lakes is almost an order of magnitude higher than the total transport of dissolved organic carbon by all Siberian rivers to the Arctic ocean. There is a significant increase in dissolved CO₂ and methane (CH₄) concentration with decreasing water body surface area, with the largest supersaturation with respect to atmospheric CO₂ and CH₄ in small (< 100 m²) permafrost depressions filled with thaw water. Dissolved organic carbon (DOC), conductivity, and metal concentrations also progressively increase from large lakes to thaw ponds and depressions. As such, small water bodies with surface areas of 1–100 m² that are not accounted for in the existing lake and pond databases may significantly contribute to CO₂ and CH₄ fluxes to the atmosphere, as well as to the stocks of dissolved metals and organic carbon. An unexpected result is the establishment of dominant role in CO₂ and CH₄ emission to the atmosphere of very small lakes and permafrost depressions less than 100 m² surface area (< 0.01 ha). These water bodies, almost non-identified from the space and non-documented on topographic maps, contribute significantly to the total area coverage by water and in total evasion of greenhouse gases from the land surface to the atmosphere. As a consequence, upon future permafrost thaw, the increase in the number of small water bodies, accompanied by the drainage of large thermokarst lakes to the hydrological network, will likely favor i) the increase of DOC and colloidal metal stocks in surface aquatic systems, and ii) the enhancement of CO₂ and CH₄ fluxes from the water surface to the atmosphere. According to a conservative estimation that considers that the total area occupied by water bodies in Western Siberia will not change, this increase in stocks and fluxes could be as high as a factor of ten.

Key words: thermokarst lakes; biogeochemistry; permafrost; CO₂; heterotrophic bacterioplankton.

Received June 1, 2012