

УДК 543.37

ДИНАМИКА РАСТВОРЁННОГО НЕОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА И ПОТОКОВ CO₂ МЕЖДУ ВОДОЙ И АТМОСФЕРОЙ В ГЛАВНОМ РУСЛЕ РЕКИ ОБЬ

И. И. Пипко^{1,*}, С. П. Пугач¹, О. Г. Савичев², И. А. Репина³, Н. Е. Шахова²,
Ю. А. Моисеева², К. В. Барсков³, академик РАН В. И. Сергиенко⁴,
член-корреспондент РАН И. П. Семилетов^{1,2}

Поступило 27.07.2018 г.

Анализируются результаты исследований динамики параметров карбонатной системы, выполненных в среднем и нижнем течении реки Обь в июле 2016 г. В распределении карбонатных характеристик речных вод обнаружен устойчивый широтный тренд, определяемый ландшафтно-геохимическими условиями дренажного бассейна и распространением многолетнемерзлых пород. Представлены первые натурные данные, характеризующие величину и направление потоков CO₂ в системе речная вода—атмосфера в этой зоне. Показано, что воды среднего и нижнего течений реки многократно пересыщены CO₂ относительно его содержания в атмосфере, среднесуточные величины эвазии достигают 625,9 ммоль · м⁻² · сут⁻¹ при среднем значении 102,1 ммоль · м⁻² · сут⁻¹. Установлено, что воды реки Обь на исследуемом участке являются значимым источником CO₂ в атмосферу; согласно консервативным оценкам, в июле суммарный поток составил 2 · 10¹¹ г углерода в форме CO₂.

Ключевые слова: арктические реки, карбонатная система, парниковые газы, потоки CO₂, мерзлота, климат.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524846691-697>

Крупные реки интегрируют биогеохимический сигнал с обширного водосбора, часто охватывающего несколько климатических зон, и являются связующим звеном между наземными и морскими экосистемами, а также атмосферой. Реки, как и все внутренние водоёмы, получают большое количество наземного углерода; в результате их воды характеризуются в целом гетеротрофным метаболизмом и пересыщены углекислым газом CO₂ относительно его содержания в атмосфере. Но из-за сравнительно небольшой площади, занимаемой реками на поверхности Земли, они редко рассматриваются в качестве потенциально важного количественного компонента углеродного цикла в глобальной или региональной шкале. Однако последние исследования показали, что эмиссия углекислого газа из наземных водных экосистем играет важную роль в углеродном цикле [1], а геохимический сигнал крупнейших си-

бирских рек прослеживается на шельфе/склоне Северного Ледовитого океана [2–4].

Существующие связи в цикле углерода в системе суша—вода—атмосфера контролируются биогеохимическими факторами, которые определяют химический состав вод, а также интенсивность потока CO₂ в атмосферу. Сибирские арктические реки представляют особый интерес, так как они дренируют территории, где находятся огромные запасы древнего и современного лабильного органического вещества (ОВ). Быстрые изменения климата и гидрологического режима в арктическом регионе могут привести к вовлечению гигантского пула углерода, ранее законсервированного в мерзлоте, в современный биогеохимический цикл и поступлению его в органической и неорганической формах в водную среду/атмосферу. Основная часть гидрохимических исследований в водах сибирских арктических рек связана с изучением пространственной динамики и латерального транспорта органического и неорганического углерода [2, 5–8], и лишь в одной работе оцениваются процессы обмена CO₂ в системе речная вода—атмосфера (река Колыма, [9]).

Объектом наших исследований является река Обь — 3-я среди крупнейших арктических рек и 13-я в мире по объёму годового стока (427 км³) с водосбором общей площадью 2,99 млн км². Обь также

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет

³ Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской Академии наук, Москва

⁴ Президиум Дальневосточного отделения Российской Академии наук, Владивосток

*E-mail: irina@poi.dvo.ru

играет важную роль и в социально-экономическом аспекте — плотность населения в её бассейне значительно превосходит этот показатель для любой другой арктической реки (<https://arcticgreatrivers.org/givers/>). Среди территорий, характеризующихся наличием многолетнемерзлых пород (ММП), водосбор реки Обь наиболее подвержен влиянию климатических изменений благодаря ряду факторов: преобладанию в бассейне реки прерывистой, массивно-островной и островной вечной мерзлоты (в отличие от сибирских рек, расположенных восточнее, где доминирует сплошная мерзлота), равнинному рельефу, развитию термокарста и наличию больших запасов древнего и современного органического углерода в виде частично замороженных торфяных отложений [7].

Реку Обь можно отнести к одной из наиболее исследованных в геохимическом аспекте сибирских арктических рек [5, 7, 8], однако динамика карбонатных параметров изучалась лишь на ограниченных участках главного русла, а оценки потоков CO_2 между речными водами и атмосферой ранее не выполнялись.

Цель настоящей работы — исследовать пространственную изменчивость содержания неорганических форм углерода в среднем и нижнем течениях реки Обь, а также выполнить первую количественную оценку потоков CO_2 между речными водами и атмосферой.

Работы выполнялись в июле 2016 г. вдоль 2671-километрового широтного разреза в главном русле реки Обь по маршруту Салехард—Томск на борту теплохода “ОМ-341” (рис. 1). На 45 комплексных станциях проводилось вертикальное зондирование с помощью профилографа Seabird 19plus, оснащённого датчиками температуры T , электропроводности, растворённого кислорода, флуоресценции, а также мутности. С поверхностного и придонного горизонтов были отобраны пробы речной воды для определения гидрохимических параметров — общей щёлочности TA , рН, растворённого кислорода, окрашенной фракции растворённого органического вещества и хлорофилла “а”. Эти характеристики измерялись в судовой лаборатории, и методы их определения приведены в [2–4, 6]. Концентрации форм растворённого неорганического углерода (CO_2 , HCO_3^- и CO_3^{2-}) и величины $p\text{CO}_2$ парциального давления CO_2 были рассчитаны из измеренных значений рН и TA с использованием алгоритма расчёта параметров карбонатной системы пресных вод [10]. Предварительно был оценён вклад органической щёлочности OA в величину TA согласно методу, пред-

ложенному в [11]. OA в речных водах составляла в среднем 6% от TA , а вклад силикатной щёлочности был незначительным (ниже ошибки определения TA). Скорость и направление ветра регистрировали на судне при помощи метеостанции AIRMAR; концентрация CO_2 в воздухе измерялась газовым анализатором открытого типа LICOR7500. Величины потока CO_2 между водой и атмосферой (F_{CO_2}) были рассчитаны с использованием параметризации Ваннинкова [12]; ранее было показано, что полученные для морских вод уравнения, связывающие скорость ветра и скорость газопереноса k , позволяют оценить k в реках высокого порядка с большой точностью [13]. Отметим, что идентичность методов, используемых в исследованиях речных и шельфовых вод, позволяет проводить общий анализ закономерностей трансформации углерода в арктической системе суша—шельф.

В распределении форм неорганического углерода в поверхностных водах главного русла реки Обь были обнаружены тенденции уменьшения концентраций растворённого CO_2 (а также $p\text{CO}_2$) и увеличения содержания карбонат- и бикарбонат-ионов с севера на юг исследуемого региона. Величины рН также характеризовались значительной пространственной изменчивостью (рис. 2).

В предшествующих исследованиях было показано, что в ряду факторов, обуславливающих динамику гидрохимических элементов в водах рек Западно-Сибирской низменности (площадь водосбора—сезонность—широта), именно широта является определяющим [5, 7, 8]. Одной из важнейших причин существования устойчивой связи гидрохимических параметров рек разного порядка с широтным положением является наличие или отсутствие ММП в дренажном бассейне [5, 7]. Известно, что многолетняя мерзлота, существующая в бассейне западно-сибирских рек, является главным образом прерывистой или островной; при этом южная часть бассейна “безмерзлотная”, а сплошная мерзлота существует только на крайнем севере вблизи морского побережья (рис. 1). Такой характер распространения ММП (сокращение площади с севера на юг до полного исчезновения) определяет в первую очередь изменение режима питания на протяжении реки Обь: увеличение в южном направлении вклада грунтового питания и соответственно притока подземных вод с повышенной минерализацией. Важное значение для формирования гидрохимического режима Оби имеет существующая в дренажном бассейне реки крупнейшая в мире система торфяных болот, с водами которых в речную сеть поступает

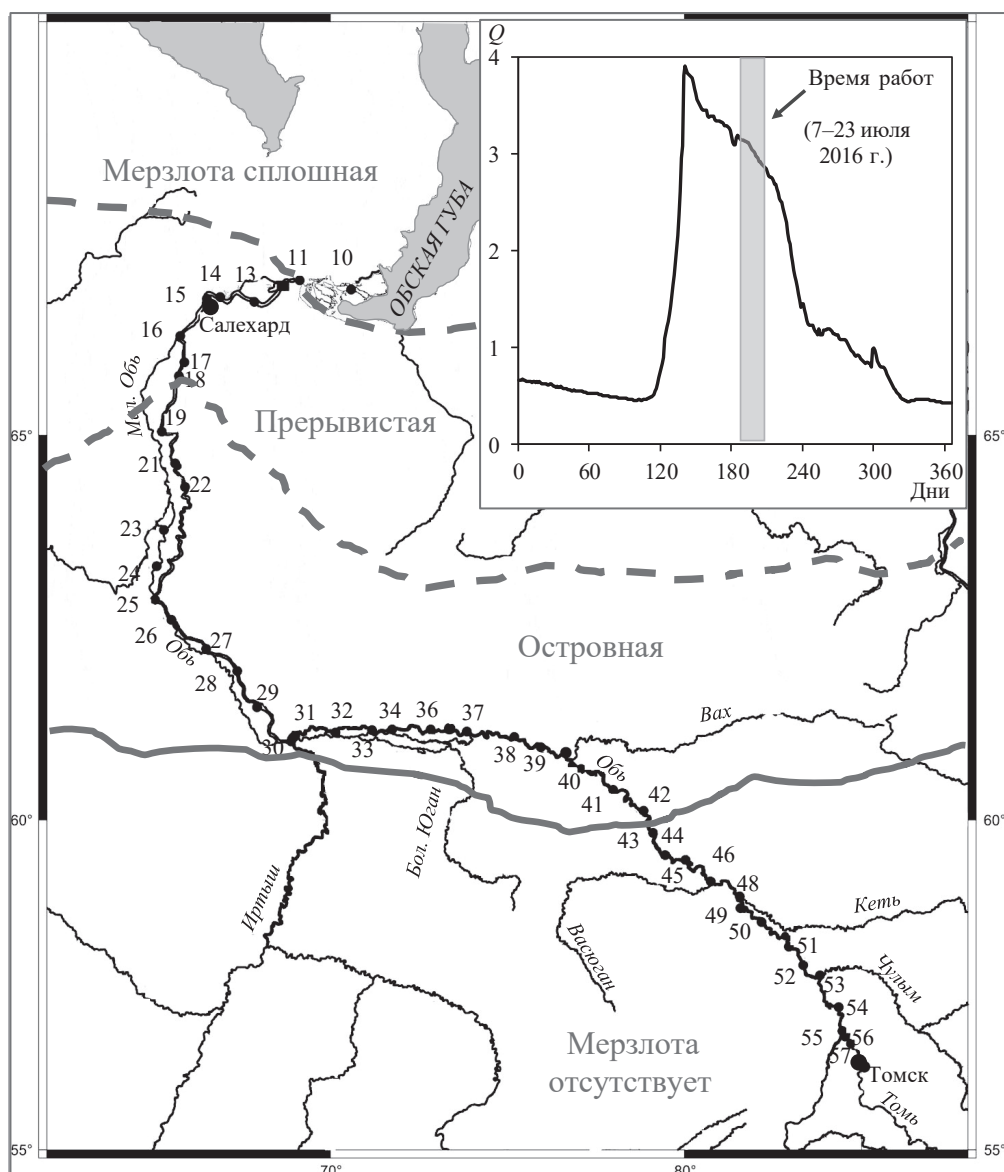


Рис. 1. Район работ, положение комплексных станций, границы распространения многолетнемерзлых пород и гидрограф реки Обь (Q – расход воды, $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1} \cdot 10^4$).

большое количество органических веществ и продуктов их трансформации.

Значения концентраций изучаемых карбонатных параметров вод в зоне распространения многолетней мерзлоты и безмерзлотной зоне статистически значимо различались (табл. 1). Наиболее минерализованные воды с концентрацией TA , достигающей $2458 \text{ мкмоль} \cdot \text{кг}^{-1}$, были обнаружены на юге района исследований, минимальные — в северной части (рис. 2). Динамика распределения OA демонстрировала противоположную тенденцию (рис. 2): её значения снижались на юг с минимальными концентрациями в реке Томь — крупном притоке Оби, основная часть стока которого формируется в горных районах Кузнецкого Алатау и Горной Шории.

Важно также отметить, что экспедиционные работы были проведены в промежуток времени, соответствующий в нижнем течении реки Обь половодью, а на юге региона — летней межени, что также отразилось на формировании гидрохимического режима вод на разных участках реки.

Воды среднего и нижнего течений реки Обь, дренирующие огромные заболоченные площади, были в значительной степени пересыщены CO_2 относительно атмосферы (рис. 2, 3) в результате интенсивного поступления в русло реки кислых почвенных вод, обогащённых CO_2 и OH^- . Обнаруженное распределение величин $p\text{CO}_2$ указывало на преимущественно гетеротрофный метаболизм изучаемой водной экосистемы (рис. 3). Исключением были авто-

Таблица 1. Средние величины карбонатных характеристик поверхностных вод главного русла реки Обь в зонах распространения и отсутствия многолетней мерзлоты в дренажном бассейне

Зона	TA	pH	DIC	CO ₂	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	pCO ₂
Мерзлотная	1166,0 ± 196,7	7,57 ± 0,17	1165,4 ± 215,2	84,0 ± 30,1	1079,8 ± 210,1	1,7 ± 0,8	2324,2 ± 814,4
Безмерзлотная	1765,7 ± 207,0	8,17 ± 0,40	1765,7 ± 209,4	37,7 ± 24,5	1707,7 ± 209,4	20,3 ± 28,1	1054,9 ± 691,4

Примечание. Все концентрации приведены в мкмоль · кг⁻¹, величины pH — в единицах pH в шкале NSB, pCO₂ — в мкатм.

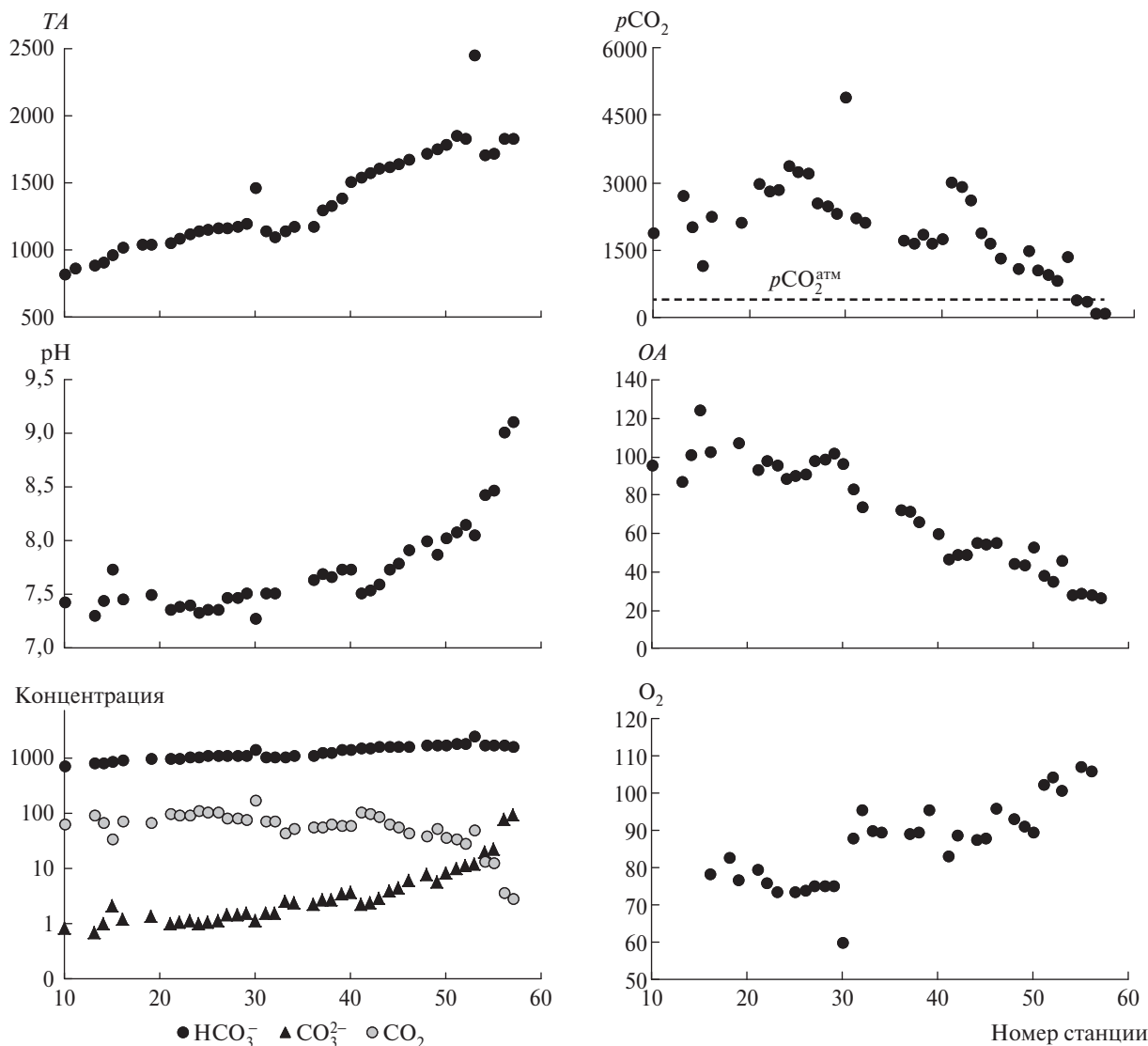


Рис. 2. Пространственное распределение величин общей щёлочности TA, мкмоль · кг⁻¹, pH, концентраций карбонат CO₃²⁻- и бикарбонат HCO₃⁻-ионов, растворённого CO₂, мкмоль · кг⁻¹, парциального давления CO₂, pCO₂, мкатм, величин органической щёлочности OA, мкмоль · кг⁻¹, и степени насыщения кислородом O₂, %, в поверхностных водах реки Обь и нижнего течения реки Томь.

трофные воды реки Томь, где величины pCO₂ были в несколько раз ниже атмосферных значений (рис. 2, 3). Об интенсивно протекающих в этих водах процессах фотосинтеза свидетельствовало и значительное пересыщение кислородом (рис. 2), а также двукратное увеличение концентраций хлорофилла “а” относительно нижнего и среднего течений реки Обь. Термический фактор не играл определя-

ющей роли в пространственном распределении величин pCO₂ в отличие от большой амплитуды вариаций pCO₂ (рис. 2), температура поверхностных вод изменялась в узком диапазоне (20,9–24,4 °C), и корреляционная связь pCO₂–T была малозначимой (r = –0,28). При общей тенденции снижения pCO₂ с севера на юг отклонения его величин, как и других гидрохимических параметров, от обнаруженного

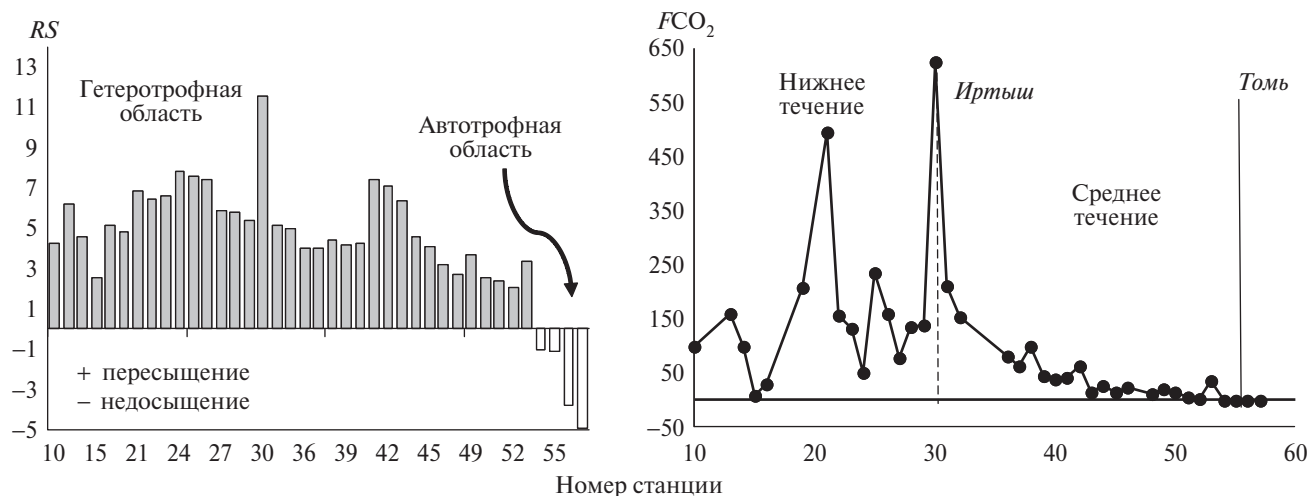


Рис. 3. Распределение величин относительного насыщения поверхностных вод углекислым газом RS и потоков CO_2 между водой и атмосферой F_{CO_2} , ммоль · м⁻² · сут⁻¹. $RS = pCO_2^B/pCO_2^{ATM}$ в гетеротрофной зоне и $RS = -pCO_2^B/pCO_2^{ATM}$ в автотрофной, где pCO_2^B и pCO_2^{ATM} — парциальное давление CO_2 в поверхностной воде и атмосфере соответственно.

тренда наблюдались в местах впадения в реку крупных притоков (рис. 1, 2). Наибольшие флуктуации были отмечены в месте слияния рек Обь и Иртыш (ст. 30, рис. 2). Воды реки Иртыш, находящиеся под значительным антропогенным влиянием, характеризовались повышенным содержанием растворённого ОВ, взвешенных веществ, растворённого CO_2 и низким насыщением кислородом; фронтальную зону между водами этих рек можно было наблюдать визуально.

Потоки CO_2 в системе вода—атмосфера рассчитывали с использованием квадратичной параметризации, связывающей среднечасовую скорость ветра и скорость газопереноса [12]. Наибольшие потоки были обнаружены в нижнем течении реки, что определялось как максимальным для района исследова-

Таблица 2. Распределение средних величин потоков CO_2 в системе вода—атмосфера F_{CO_2} , разницы парциального давления pCO_2 между водой и атмосферой ΔpCO_2 , среднечасовой скорости ветра U и скорости газопереноса k в главном русле реки Обь и нижнем течении реки Томь

Район	F_{CO_2} , ммоль · м ⁻² · сут ⁻¹	ΔpCO_2 , мкратм	U , м · с ⁻¹	k , см · ч ⁻¹
Нижнее течение $n = 16$	$176,3 \pm 164,0$ 9,0–625,9	$2068,8 \pm 793,7$ 610,2–4222,4	$4,9 \pm 1,7$ 2,3–8,6	$8,9 \pm 6,0$ 1,8–24,7
Среднее течение $n = 21$	$45,6 \pm 53,9$ 0–212,2	$1165,1 \pm 686,4$ –26,8–2544,5	$3,0 \pm 1,6$ 0,6–6,7	$3,9 \pm 3,8$ 0,1–14,7
Река Томь $n = 2$	–0,1 –0,2–0,0	–295,9 от –307,9 до –283,8	0,3 0,2–0,4	0,04 0,02–0,06

Примечание. Отрицательные величины соответствуют потоку CO_2 в воду.

ний (более чем на порядок) пересыщением речных вод CO_2 относительно его содержания в атмосфере, так и высокими скоростями ветра (рис. 3, табл. 2). Средняя величина потока CO_2 в атмосферу на этом участке реки достигала $176,3$ ммоль · м⁻² · сут⁻¹ (табл. 2). В среднем течении реки поток CO_2 также был направлен в атмосферу (рис. 3, табл. 2). Поглощение CO_2 речными водами наблюдалось лишь на юге района исследований (рис. 2, 3). Но несмотря на почти пятикратное недосыщение поверхностных вод CO_2 , поток из атмосферы здесь был незначительным, что определялось низкими скоростями ветра (табл. 2). В целом воды главного русла реки были значимым источником CO_2 в атмосферу: средний поток CO_2 из обских вод составил $102,1$ ммоль · м⁻² · сут⁻¹. Для сравнения: среднесуточный поток CO_2 из всех рек мира составляет около 359 ммоль · м⁻² · сут⁻¹, из крупнейших рек — около 245 [14], а из вод главного русла реки Колымы в период летней межени — $41,7$ ммоль · м⁻² · сут⁻¹ [9]. Было рассчитано суммарное поступление углерода в атмосферу из вод реки Обь в течение летнего месяца: по минимальным оценкам в июле 2016 г. из главного русла реки Обь в атмосферу поступило приблизительно $2 \cdot 10^{11}$ г углерода в форме CO_2 , что свидетельствует о значимом вкладе обских вод в величину годовой эвазии CO_2 из наземных пресноводных экосистем [1, 14]. Учитывая, что в пик половодья речные воды заливают пойму (шириной до 20–30 км), только за счёт увеличения площади водной поверхности величина среднемесячного потока может возрасти на порядок.

Значительная часть крупнейшего в мире заболоченного бассейна реки Обь дренируется большим

количеством ручьёв и рек разного порядка. Известно, что интенсивность газообмена в мелких реках значительно превосходит воды главного русла (например, только 14% общего потока углерода в атмосферу в бассейне реки Юкон поступает из главного русла реки) [14]. Кроме того, наиболее значимые биогеохимические последствия деградации ММП наблюдаются в зоне распространения прерывистой мерзлоты, а концентрации CO_2 в ручьях и других водоёмах в зонах её активного таяния в 3–10 раз выше, чем в зонах стабильных торфяников [15]. Поэтому следует ожидать, что удельный (как и суммарный) поток углерода в форме CO_2 в атмосферу из рек Обского бассейна будет значительно превышать полученные нами величины. Важнейшей задачей для достоверной оценки роли сибирских рек в балансе атмосферного CO_2 является продолжение детальных сезонных исследований газообмена в главном русле Оби в сравнении с реками Восточной Сибири, например рекой Лена [2, 6]. Не менее актуальным представляется и изучение рек более мелкого порядка, которые являются “горячими точками” в планетарном потоке CO_2 в атмосферу [1, 9, 14].

В результате выполненного исследования обнаружен широтный тренд в пространственном распределении карбонатных характеристик вод в главном русле реки Обь, определяемый ландшафтно-геохимическими условиями дренажного бассейна и степенью деградации ММП. Получены первые натурные данные, характеризующие величину и направление потоков CO_2 в системе вода—атмосфера в реке Обь. Показано, что гетеротрофные воды нижнего и среднего течений реки Обь многократно пересыщены CO_2 и являются значимым поставщиком углерода в атмосферу в региональном и глобальном масштабах. С точки зрения перспектив изменения климата, приводящих к значимым изменениям цикла углерода в бассейнах северных рек, наши результаты также устанавливают базовый уровень, достаточно полно характеризующий текущее состояние карбонатной системы вод реки Обь и позволяющий проводить сравнения с материалами дальнейших исследований.

Источник финансирования. Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства РФ (грант № 14.Z50.31.0012), экспедиционные исследования проводили при поддержке РНФ (грант № 15–17–20032), аналитические исследования выполняли на средства гранта РФФИ (грант № 18–05–00559).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Raymond P.A., Hartmann J., Lauerwald R., Sobek S., McDonald C., Hoover M., Butman D., Striegl R., Mayorga E., Humborg C., Kortelainen P., Dürr H., Meyerbeck M., Ciais P., Guth P. // *Nature*. 2013. V. 503. № 7476. P. 355–359. DOI: 10.1038/nature12760.
2. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Dudarev O.V., Pugach S.P., Charkin A.N., McRoy C.P., Kosmach D., Gustafsson O. // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. P. 2407–2426. DOI: 10.5194/bg-8-2407-2011.
3. Pipko I.I., Pugach S.P., Semiletov I.P., et al. // *Ocean Sci.* 2017. V. 13. P. 997–1016.
4. Pugach S.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., Shirshin E.A., Perminova I.V., Gustafsson Ö., Bondur V.G., Ruban A.S., Semiletov I.P. // *Ocean Sci.* 2018. V. 14. P. 87–103.
5. Frey K.E., Siegel D.I., Smith L.C. // *Water Resources*. 2007. V. 43. W03406. DOI: 10.1029/2006WR004902.
6. Пунко И.И., Пугач С.П., Дударев О.В., Семилетов И.П., Чаркин А.Н. // *Геохимия*. 2010. Т. 48. № 11. С. 1206–1213.
7. Pokrovsky O.S., Manasypov R.M., Loiko S., Shirokova L.S., Krickov I.A., Pokrovsky B.G., Kolesnichenko L.G., Kopysov S.G., Zemtsov V.A., Kulizhsky S.P., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N. // *Biogeosciences*. 2015. V. 12. P. 6301–6320.
8. Савичев О.Г., Мазуров А.К., Пунко И.И., Сергуенко В.И., Семилетов И.П. // *ДАН*. 2016. Т. 466. № 2. С. 202–206.
9. Denfeld B.A., Frey K.E., Sobczak W.V., Mann P.J., Holmes R.M. // *Polar Res*. 2013. V. 32. 19704.
10. Lewis E., Wallace D.W.R. Program Developed for CO_2 System Calculations. ORNL/CDIAC-105. Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge (Tennessee). Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy. 1998.
11. Тищенко П.Я., Михайлик Т.А., Павлова Г.Ю., Тищенко П.П., Колтунов А.М., Zhang Jing // *Геохимия*. 2017. № 3. С. 236–248.
12. Wanninkhof R. // *J. Geophys. Res.* 1992. V. 97. P. 7373–7382.
13. Ho D.T., Schlosser P., Ortonet P.M. // *Estuaries and Coasts*. 2011. V. 34. P. 1103–1116. DOI: 10.1007/s12237-011-9396-4.
14. Lauerwald R., Laruelle G.G., Hartmann J., Ciais P., Regnier P.A.G. // *Global Biogeochem. Cycles*. 2015. V. 29. P. 534–554. DOI: 10.1002/2014GB004941.
15. Loiko S.V., Pokrovskij O.S., Raudina T.V., Lim A.G., Kolesnichenko L.G., Shirokova L.S., Vorob'ev S.N. // *Chem. Geol.* 2017. V. 471. P. 153–165.

DYNAMICS OF DISSOLVED INORGANIC CARBON AND CO₂ FLUXES BETWEEN WATER AND ATMOSPHERE IN THE MAIN CHANNEL OF THE OB RIVER

**I. I. Pipko, S. P. Pugach, O. G. Savichev, I. A. Repina, N. E. Shakhova,
Y. A. Moiseeva, K. V. Barskov, Academician of the RAS V. I. Sergienko,
Corresponding Member of the RAS I. P. Semiletov**

Received July 27, 2018

The results of investigation of the carbonate system parameters dynamics in the middle and lower reaches of the Ob River in July 2016 were analyzed. The distributions of the carbonate characteristics of the river waters were found to follow a steady latitudinal trend determined by the landscape-geochemical conditions of the drainage basin and by the permafrost distribution. The first field data on the magnitude and direction of the CO₂ fluxes in the river water–atmosphere system in this region were presented. It was shown that the waters in the middle and lower reaches of the river are multiply supersaturated with CO₂ with respect to its atmospheric content, and the daily average evasion reaches 625,9 mmol m⁻² day⁻¹ at an average value of 102,1 mmol m⁻² day⁻¹. It was determined that the waters of the Ob River in the studied reaches are a significant CO₂ source to the atmosphere; according to conservative estimates, the total flux in July was $2 \cdot 10^{11}$ g of carbon in the form of CO₂.

Keywords: Arctic rivers, carbonate system, greenhouse gases, CO₂ fluxes, permafrost, climate.