

УДК 551.324

РОССИЙСКИЕ ГОРНЫЕ ЛЕДНИКИ В “ТАЮЩЕМ” МИРЕ: ПЕРВЫЕ ОЦЕНКИ БАЛАНСА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НА КАВКАЗЕ И АЛТАЕ

© 2022 г. Д. В. Карелин^{1,*}, С. С. Кутузов¹, С. В. Горячкин¹,
Э. П. Зазовская¹, академик РАН В. М. Котляков¹

Поступило 31.12.2021 г.
После доработки 19.01.2022 г.
Принято к публикации 21.01.2022 г.

В современном понимании ледники представляют собой крупный наземный биом, уникальный тем, что он объединяет автотрофно-гетеротрофные экосистемы с наиболее существенным вкладом абиотических процессов, и служит важным донором биогенных элементов и климатически активных веществ, накопленных за ледниковые эпохи. Круговорот биогенных парниковых газов (ПГ) — одна из важнейших биосферных функций любой крупной экосистемы. В условиях продолжающегося потепления процессы абляции, особенно заметные на горных ледниках, могут оказывать на него существенное влияние. Исследования, проведенные на двух горно-долинных ледниках, расположенных в европейской (Северный Кавказ, 2020) и азиатской (Алтай, 2021) частях России, ставили целью определить современные величины потоков ПГ в зоне влияния ледников, теряющих массу в условиях потепления. За счет накопления на поверхности льда криоконитов (мелкозем, преимущественно эолового генезиса) области абляции ледников, в среднем, служат слабыми источниками CO_2 для атмосферы ($15.3 \text{ мг } \text{CO}_2 \text{ м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$), тогда как области аккумуляции ледников являются его слабыми стоками (-21.5). Более существенными дополнительными источниками CO_2 (от 45.2 до 446.3) и метана являются образовавшиеся за последние 20 лет молодые конечные морены. Пространственные вариации потоков метана очень велики, при этом его радиационный вклад (от -0.4 до $+225.6 \text{ мг } \text{CO}_2\text{-экв. м}^{-2} \text{ сут}^{-1}$) может быть сопоставим с CO_2 . По сравнению с этими ПГ, неттопотоки закиси азота в исследованных гляциальных экосистемах пренебрежимо малы. Учет вклада почвоподобных тел молодых морен существенно увеличивает средневзвешенную оценку эмиссии CO_2 на ледниках с 2 до $1015 \text{ кг } \text{C } \text{км}^{-2} \text{ год}^{-1}$. Полученные результаты подчеркивают роль ледников как консервирующих биосферных агентов обмена ПГ в атмосфере.

Ключевые слова: супра- и перигляциальные отложения, криокониты, почвоподобные тела, современное потепление климата, нетто-баланс, диоксид углерода, метан, закись азота

DOI: 10.31857/S2686739722050073

В 2000-х годах произошел концептуальный сдвиг в понимании ледников, как особого наземного биома, и от изучения структуры и физико-химических взаимодействий к оценке биосферных функций гляциальной биоты [3]. Важным аргументом в этом случае является огромная площадь, занимаемая ледниками ($15.5 \text{ млн } \text{км}^2$), что ставит их в ряд с крупнейшими биомами Земли. Круговорот биогенных парниковых газов (ПГ), к которым относятся диоксид углерода (CO_2), метан (CH_4) и закись азота (N_2O), — одна из важнейших биосферных функций любой крупной экосистемы. Ледники в современном “тающем” ми-

ре уникальны тем, что являются автотрофно-гетеротрофными экосистемами с преобладанием абиотического обмена ПГ [4], а также донором биогенных элементов и климатически активных веществ, накопленных за ледниковые эпохи, для многих водных и наземных экосистем [9]. Масштабы дополнительных выбросов ПГ в атмосферу при отступании многолетних льдов могут быть значительны, при этом, как биогенная, так и абиогенная составляющие углеродного цикла существенно ускоряются современным потеплением [2, 9, 12]. Потери массы в результате потепления особенно заметны на горных ледниках, составляя 332 Гт в год [11], что позволяет рассматривать их не только как индикатор климатических изменений, но и модель того, что может произойти с балансом ПГ при потере мощных покровных ледников. Кроме того, на терри-

¹Институт географии Российской академии наук, Москва, Россия

*E-mail: dkarelin7@gmail.com

тории России детальные исследования ПГ на ледниках ранее не проводились.

Наблюдения потоков ПГ проходили на двух горно-долинных ледниках с отрицательным балансом массы: Гарабаши (43°18' с.ш., 42°28' в.д., Северный Кавказ, 6–15 августа 2020 г.; общая площадь ледника 3.8 км²; измерения проходили в диапазоне 2383–3831 м н.у.м) и Левый Актру (50°5' с.ш., 87°45' в.д., Республика Алтай, 15–27 июля 2021 г.; 5.4 км²; 2075–2918 м н.у.м). Масса льда на леднике Гарабаши за 1997–2020 гг. уменьшилась на 16 м водного эквивалента, общий объем сократился на 27% [7, 10]. Аналогичные по направлению и скорости процессы, несмотря на ослабляющее влияние континентальности, происходят на горном Алтае [8], что в обоих случаях объясняется повышением температуры воздуха. Потери массы льда сопровождаются существенным увеличением площадей моренных отложений.

Полевые измерения проводили в закрытых камерах с помощью мобильных высокоточных газоанализаторов; для лабораторных оценок применялась газовая хроматография. Общее число измерений составило 264.

Среднее значение валовых потоков¹ CO₂ по всем исследованным экосистемам ледника Актру составило $+944.4 \pm 269.5$ мг CO₂ м⁻² сут⁻¹ (от -199.7 до $+8127.8$, $n = 86$)², что значительно не отличается от аналогичных данных, полученных на леднике Гарабаши ($+915.2 \pm 615$ мг CO₂ м⁻² сут⁻¹; от -7.9 до $+13200$, $n = 25$). Валовые потоки CO₂ в наиболее теплый период года широко варьировали в зоне влияния ледника, различаясь между экосистемами на 4–5 порядков (рис. 1). Валовый обмен на льду, в областях баланса и аккумуляции, в среднем, является слабым стоком из атмосферы (-21.5 мг CO₂ м⁻² сут⁻¹), что, вероятно всего, обязано растворению в талой воде.

Криоконитам (КК), как особым почвоподобным органо-минеральным формам, сейчас придается большое значение, что связано с их активным участием в обменных процессах на поверхности ледников [4]. Если в области абляции наблюдается состояние, близкое к С-балансу, то на участках с КК валовый обмен возрастает на порядок ($+15.3$ мг CO₂ м⁻² сут⁻¹), что отражает растущий вклад микробного дыхания. По сравнению с КК, боковые морены “дышат” ненамного активнее ($+45.2$), поскольку содержат крупные ва-

луны, галечный материал и песок на крутых склонах, откуда глинистые частицы быстро вымываются. По сравнению с боковыми участками, конечная морена демонстрирует на порядок более высокие уровни обмена ($+445.3$), что связано с выраженной аккумуляцией мелкозема в результате наноса водными потоками, и закреплением здесь растений. Но и в этом случае скорость валовых потоков на порядок уступает эмиссии из местных дерново-криометаморфических мерзлотных почв (Turbic Cryosols), образовавшихся около тысячи лет назад после сокращения ледника (см. рис. 1).

КК на поверхности ледника существенно снижают его альбедо. Сопоставление результатов по исследованным ледникам показывает, что наклоны зависимостей истинного альбедо от плотности КК для них не различаются (ANOVA, $p = 0.16$), демонстрируя высокую положительную линейную связь ($R^2 = 0.82$). Последнее важно, поскольку от присутствия КК зависит не только величина поглощения солнечной энергии и скорость таяния, но и валовые потоки CO₂. Наклоны зависимостей для двух ледников в этом случае также совпадают ($p = 0.11$), демонстрируя положительную линейную связь, что позволяет использовать единое уравнение для предсказания пространственного распределения и изменчивости валовых потоков CO₂ на поверхности льда (рис. 2).

Общее для двух ледников заключается и в том, что скорость нетто-обмена метана на молодых моренах может на 1–2 порядка превосходить его потоки на льду с КК (рис. 3), хотя отдельные участки перигляциальных экосистем могут быть как стоком (в присутствии растительности), так и источником метана для атмосферы, демонстрируя высокую вариабельность от -44.9 до $+225.7$ мг CO₂-экв.³ м⁻² сут⁻¹. В последнем случае (морена возрастом >50 лет) эмиссия метана оказалась сопоставима по радиационному эффекту с максимальным потоком CO₂ на молодых моренах.

Чистый лед с альбедо >0.4 представляет собой очень слабый сток закиси азота из атмосферы: -0.67 ± 0.58 мг CO₂-экв м⁻² сут⁻¹ (физико-химический процесс поглощения), а конечная морена является ее слабым источником ($+1.12 \pm 0.80$). КК и мелкодисперсный материал занимают промежуточное положение малозначимых источников, а боковые морены не показали значимо отличных от нуля потоков N₂O. Значения нетто-обмена закиси азота, полученные в экосистеме горного ледника, не могут считаться сколько-нибудь существенными даже для местного бюджета ПГ. Если рассчитать удельные вклады трех ПГ в

¹ В отличие от обычно используемого термина “нетто-поток”, который подразумевает, в основном, газообмен биоты, принятый здесь термин “валовый поток” включает также абиотические процессы поглощения и выделения CO₂ на леднике.

² Положительные значения потоков обозначают нетто-источник газов для атмосферы, отрицательные – сток из атмосферы.

³ При пересчете в CO₂-эквивалент для метана принят коэффициент 25, для закиси азота 298 (IPCC, 2021).

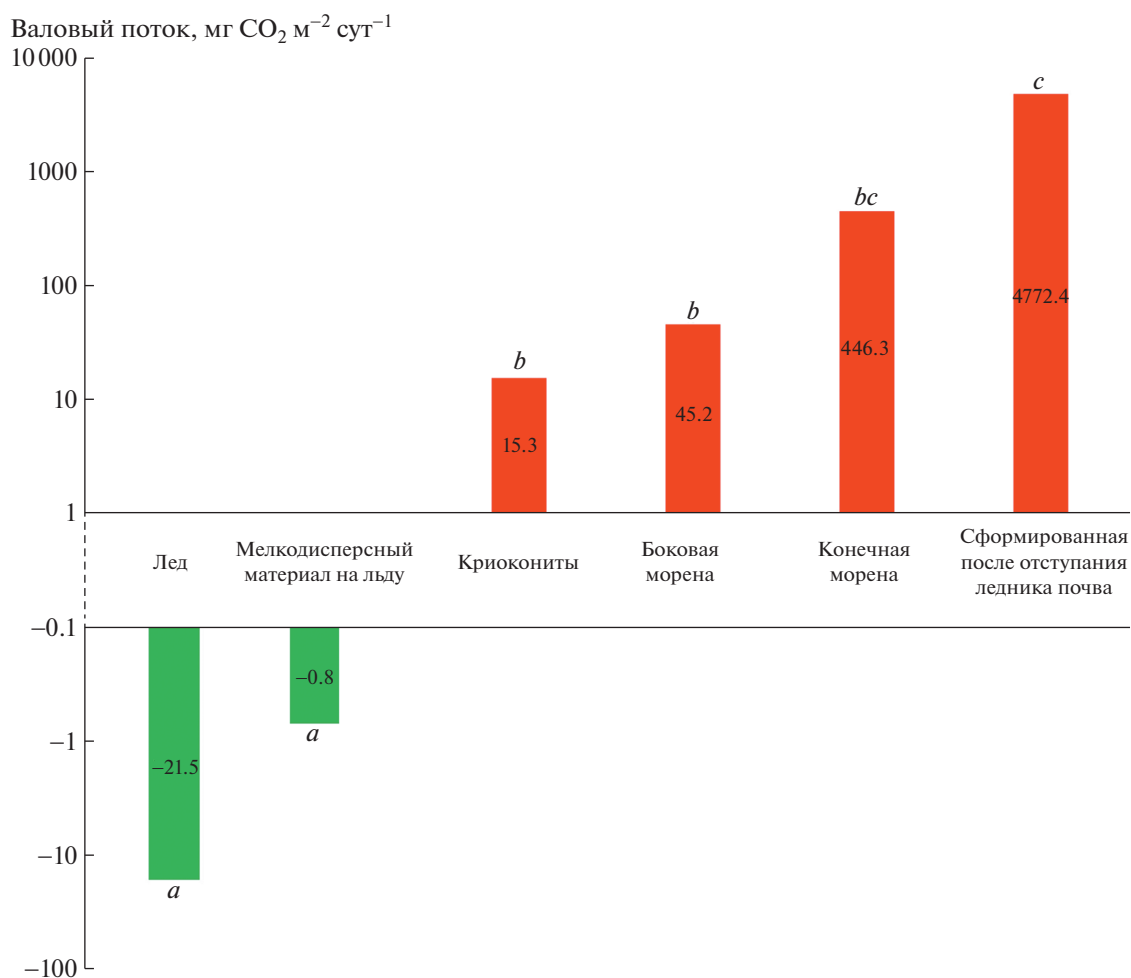


Рис. 1. Валовые потоки CO₂ в экосистемах горного ледника, ранжированные по возрастианию (Алтай, Левый Актру, 2021). Положительные значения обозначают источник CO₂ для атмосферы (красный цвет), отрицательные – сток из атмосферы (зеленый). Положительные значения отложены по логарифмической шкале, отрицательные – по шкале $-\lg(\text{abs}(y))$. Разные латинские буквы соответствуют значимым различиям средних (Манна–Уитни, $p < 0.05$), одинаковые говорят об отсутствии попарных различий.

CO₂-эквиваленте, то оказывается, что более 99% общего эффекта обеспечивается диоксидом углерода.

На поверхности льда несомненна лидирующая роль вещества КК в общем обмене ПГ. Если для современной поверхности ледника средневзвешенный по площади валовый поток всех ПГ составляет около -1.8 мг CO₂-экв. м⁻² сут⁻¹, что соответствует 6% площадному присутствию КК, то при постепенном увеличении их проективного покрытия в процессе таяния поток может возрасти до 16 мг CO₂-экв м⁻² сут⁻¹. Поскольку масса КК на леднике в ходе абляции активно увеличивается, что особенно заметно в нижней зоне ледника, это подчеркивает их потенциальный вклад в обменные процессы в ходе потепления.

Для валовых потоков CO₂ наиболее значимые корреляции отмечаются с абсолютной высотой

($r = -0.83$, $p < 0.01$), площадным присутствием КК ($r = +0.55$, $p < 0.01$) и уклоном ($r = -0.48$, $p < 0.01$). Отрицательная связь с уклоном объясняется смывом мелкозема и органического вещества на более выраженных склонах. Нетто-поток метана наилучшим образом связан с теми же переменными. По закиси азота данных получено пока недостаточно; значимая корреляция для ее потоков установлена только с абсолютной высотой. Кроме того, отмечаются средние или высокие корреляции потоков трех ПГ между собой. Это показывает, что их обмен в значительной мере подчиняется общим факторам. Множественный линейный пошаговый регрессионный анализ для трех ПГ в зоне влияния ледника на основе того же набора количественных переменных показал, что для валовых потоков диоксида углерода наиболее значима модель, построенная по абсолютной высоте и величине уклона ($R^2 = 0.30$). Аналогичная модель, по-

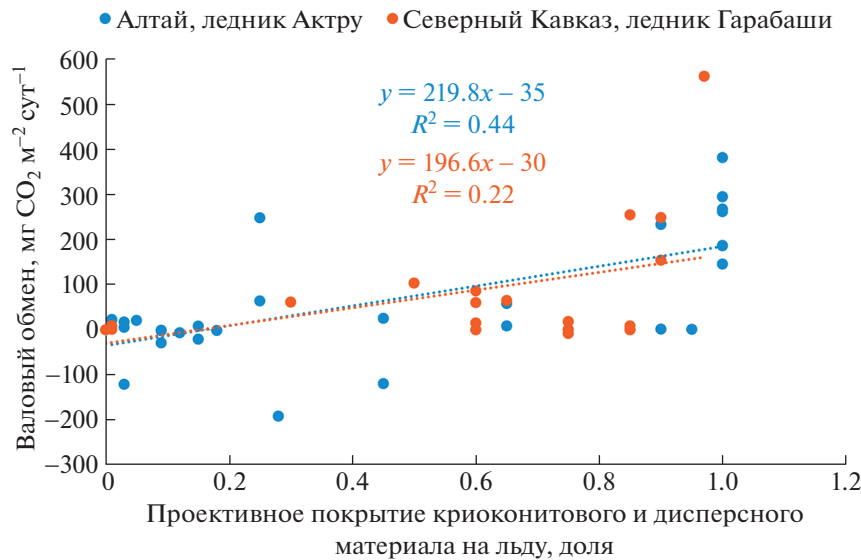


Рис. 2. Зависимость валовых потоков CO_2 от проективного покрытия криоконитового и дисперсного материала на поверхности исследованных ледников. Приведены линейные регрессии и их коэффициенты детерминации.

лученная для нетто-потоков CH_4 , имеет большую объясняющую способность ($R^2 = 0.54$). В этом случае значимы абсолютная высота и проективное покрытие растений. Для N_2O значимой модели построить не удалось, что связано, главным образом, с недостатком полевых данных. Для оценки совместного влияния количественных и

качественных переменных был проведен анализ с использованием методов DistLM и PERMANOVA [1]. Из всего набора переменных для CO_2 наиболее важен тип экосистемы, который объясняет 73–76% дисперсии, а для метана – абсолютная высота местности (37–43%). Для закиси азота важнее всего гранулометрический состав поверхности (32.9%).

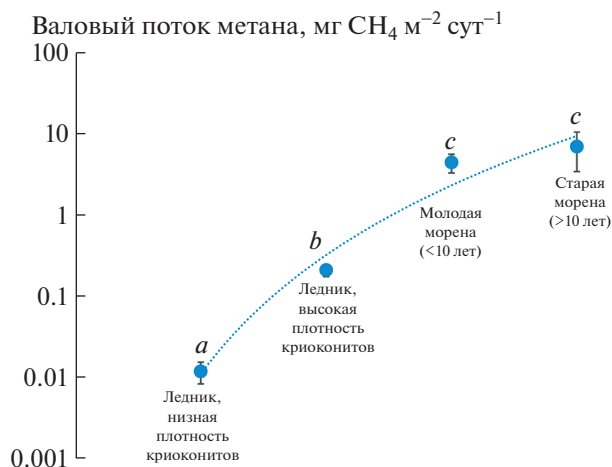


Рис. 3. Валовые потоки метана в экосистемах зоны влияния ледника Гарабаши (Северный Кавказ, 2020). “Низкая плотность криоконитов” на рисунке объединяет участки с долевым проективным покрытием криоконитового и дисперсного материала от 0 до 0.2; “высокая плотность” – от 0.5 до 1. Приведены средние и их стандартные ошибки по логарифмической шкале. Разные латинские буквы соответствуют значимым различиям средних (Манна–Уитни, $p < 0.05$), одинаковые говорят об отсутствии попарных различий.

Несмотря на оптимальную температуру растворения ($+1^\circ\text{C}$), содержание CO_2 в воде, стекающей по поверхности льда, составляет лишь 2.27–3.00 г CO_2 m^{-3} . Расчет для водного $\text{pH} = 7$ при той же температуре, актуальном атмосферном давлении и наблюдаемой концентрации газа в приземном слое дает 5.07 г CO_2 m^{-3} . Таким образом, свежая талая вода вдвое беднее диоксидом углерода по сравнению с водой, находящейся в фазовом равновесии при данных условиях, что может объясняться его пониженным содержанием в тающем льду. Сейчас в процесс абляции включаются слои льда, образовавшиеся в период, когда концентрация CO_2 в атмосфере была существенно ниже. В частности, анализ данных по леднику Гарабаши показывает, что в период наблюдений абляции подвергались слои льда, которые образовались 70–100 л.н., когда атмосферная концентрация диоксида углерода находилась в пределах 303–311 ppm, по сравнению с современной 415 ppm [13]. Поэтому, вероятно всего, нельзя ожидать увеличения концентрации диоксида углерода над ледником за счет его прямого высвобождения из тающего льда. Это подтверждают и прямые измерения газообмена на участках, где мы визуально отмечали пузырьковый выход воз-

духа в ходе таяния, но при этом не было зафиксировано увеличения содержания CO_2 . Содержание метана во всех водных пробах было равно или ниже его расчетной концентрации в воде при межфазовом равновесии при данных условиях, т.е. каких-либо дополнительных источников метана в водных пробах не было зафиксировано.

По расчетам общего баланса, проведенным на основе полевых измерений, спутниковых и аэрофотоснимков высокого разрешения, выяснено, что ледник Актру, в среднем, выделяет со своей поверхности лишь $2 \text{ кг С (CO}_2\text{) км}^{-2} \text{ год}^{-1}$, что можно рассматривать как околонулевой баланс. Для сравнения, по данным [5], годовой баланс мировых ледников находится в пределах $12\text{--}14 \text{ С км}^{-2}$. Тем не менее пространственный диапазон валового обмена CO_2 на исследованных ледниках меняется в очень широких пределах: от крайне варибельного стока из атмосферы в области аккумуляции (от -17 до $-556 \text{ кг С км}^{-2} \text{ год}^{-1}$) до заметного источника на нижнем окончании области абляции (от 200 до $334 \text{ кг С км}^{-2} \text{ год}^{-1}$). При добавлении к средневзвешенной по площади величине годового валового потока с поверхности ледника вклада примыкающих к нему почвоподобных участков молодых морен полученная величина существенно возрастает ($1015 \text{ кг С км}^{-2} \text{ год}^{-1}$).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные результаты характеризуют роль ледников, прежде всего, как консервирующих агентов баланса ПГ в современной биосфере. Сама по себе толща льда в ходе таяния не представляет собой сколько-нибудь заметного источника или стока ПГ, но в результате прогрессирующего отступания ледников из подледных резервуаров формируются все более существенные дополнительные источники биосферно-активных веществ, влияющие на скорость и структуру локального и общего биогеохимического круговорота, и обмена энергии. Масштабы таких изменений требуют дальнейших оценок.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны сотрудникам ИГ РАН В.А. Шишкову, М.А. Бронниковой, А.В. Долгих, Н.С. Мергелову и А.С. Добрянскому за участие в полевых работах.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Полевые исследования выполнены за счет гранта РНФ № 20-17-00212, хроматографический анализ и статистическая обработка проведены по госзаданию ИГ РАН № АААА-А19-119022190169-5 (FMGE-2019-0006) и Мегагранта (соглашение № 075-15-2021-599 от 08.06.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Anderson M.J., Gorley R.N., Clarke K.R.* PERMANOVA+ for PRIMER: Guide to Software and Statistical Methods. Plymouth: PRIMER-E Ltd, 2008. 214 p.
2. *Andrew L.C.* Greenland's Subglacial Methane Released // *Nature*. 2019. V. 565. P. 31–32.
3. *Anesio A.M. and Laybourn-Parry J.* Glaciers and Ice Sheets as a Biome // *TREE*. 2012. 27. 219–225.
4. *Cook J., Edwards A., Takeuchi N., Irvine-Fynn T.* Cryoconite: The Dark Biological Secret of the Cryosphere // *Progress in Physical Geography*. 2016. 40(1). P. 66–111.
5. *Hodson A.J., Anesio A.M., Ng F., et al.* A Glacier Respires: Quantifying the Distribution and Respiration CO_2 Flux of Cryoconite across Arctic Supraglacial Ecosystem // *J Geoph Res*. 2007. 112(G4): G04S36.
6. IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)). Cambridge University Press. In Press.
7. *Kutuzov S., Lavrentiev I., Smirnov A., Nosenko G., and Petrakov D.* Volume Changes of Elbrus Glaciers from 1997 to 2017 // *Front. Earth Sci*. 2019. 7:153.
8. *Toropov P.A., Aleshina M.A., Nosenko G.A., and Khromova T.E.* Modern Deglaciation of the Altai Mountains: Effects and Possible Causes // *Russ. Meteorol. Hydrol*. 2020. 45. P. 368–376.
9. *Wadham J.L., Hawkings J.R., Tarasov L., et al.* Ice Sheets Matter for the Global Carbon Cycle // *Nat Commun*. 2019. 10. 3567.
10. WGMS (2020, updated, and earlier reports). Global Glacier Change Bulletin No. 3 (2016–2017). Zemp M., Gärtner-Roer I., Nussbaumer S.U., Bannwart J., Rastner P., Paul F., and Hoelzle M. (eds.), ISC(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 274 pp., publication based on database version: <https://doi.org/10.5904/wgms-fog-2019-12>
11. *Zemp M., Huss M., Thibert E., et al.* Global Glacier Mass Changes and their Contributions to Sea-level Rise from 1961 to 2016 // *Nature*. 2019. V. 568. P. 382–386.
12. *Zhang Y., Shichang Kang, Da Wei, Xi Luo, Zhuang-zhuang Wang, Tanguang Gao.* Sink or Source? Methane and Carbon Dioxide Emissions from Cryoconite Holes, Subglacial Sediments, and Proglacial River Runoff during Intensive Glacier Melting on the Tibetan Plateau // *Fund Res*. 2021. 1. P. 232–239.
13. <https://www.co2.earth/co2-ice-core-data>

**RUSSIAN MOUNTAIN GLACIERS IN A “THAWING” WORLD:
FIRST ESTIMATES OF GREENHOUSE GASES EXCHANGE****D. V. Karelin^{a,#}, S. S. Kutuzov^a, S. V. Goryachkin^a,
E. P. Zazovskaya^a, and Academician of the RAS V. M. Kotlyakov^a**^a *Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*[#] *E-mail: dkarelin7@gmail.com*

In today's understanding, glaciers represent a large terrestrial biome unique in that it combines autotrophic-heterotrophic ecosystems with the most significant contribution of abiotic processes, and serves as an important supplier of biogenic elements and climatically active substances accumulated over glacial epochs. Biogenic greenhouse gases (GHG) cycling is one of the most important biospheric functions of any large ecosystem. With ongoing warming, ablation processes, especially prominent on mountain glaciers, can have a significant impact on it. Studies conducted on two mountain glaciers located in the European (North Caucasus, 2020) and Asian (Altai, 2021) parts of Russia attempted to estimate the current values of GHG fluxes in the zone of influence of glaciers losing mass under warming. Due to the accumulation of cryoconites on the ice surface, the ablation zones, on average, serve as weak sources of CO₂ for the atmosphere (15.3 mg CO₂ m⁻² d⁻¹), whereas the accumulation zones of glaciers are its weak sinks (−21.5). More significant additional sources of CO₂ (45.2 to 446.3) and methane are the young terminal moraines formed over the last 20 years. Spatial variations in methane fluxes are highly substantial, and its radiative forcing contribution (−0.4 to +225.6 mg CO₂-eq. m⁻² d⁻¹) may be comparable to that of CO₂. Compared to these GHGs, the net fluxes of nitrous oxide in the studied glacial ecosystems are negligible. Taking into account the contribution of young moraines significantly increases the spatial estimate of CO₂ emission on glaciers from 2 to 1015 kg C km⁻² yr⁻¹. It highlights the role of glaciers as preserving biosphere agents of GHG exchange in the atmosphere. In-situ observations of GHG fluxes on Russian glaciers have not been carried out before.

Keywords: supra- and periglacial deposits, cryoconites, soil-like bodies, climate warming, net balance, carbon dioxide, methane, nitrous oxide