

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 2. Углекислый газ

О.Ю. Антохина¹, П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹,
G. Ancellet², Б.Д. Белан^{✉1}, С.Б. Белан¹, Е.В. Гурулева¹, Д.К. Давыдов¹,
Г.А. Ивлев¹, А.В. Козлов¹, К. Law², P. Nédélec³, Т.М. Рассказчикова¹,
J.-D. Paris⁴, Д.Е. Савкин¹, Д.В. Симоненков¹, Т.К. Скляднева¹,
Г.Н. Толмачев¹, А.В. Фофонов^{1*}

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

²Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales
LATMOS, UMR 8190, Paris, France

³Laboratoire d'Aérodynamique CNRS-UPS

31400, 14 Avenue E. Belin, Toulouse, France

⁴Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, LSCE/IPSL, CNRS-CEA-UVSQ,
Orme des Merisiers, CEA Saclay, Gif-sur-Yvette, France

Поступила в редакцию 4.10.2022 г.;

после доработки 6.12.2022 г.;

принята к печати 17.02.2023 г.

Анализируется пространственное распределение углекислого газа над морями Российского сектора Арктики по результатам комплексного эксперимента, проведенного в сентябре 2020 г. Оказалось, что в период эксперимента приводная концентрация CO₂ увеличивалась с запада на восток: наименьшая (396 млн⁻¹) была над Баренцевым морем, наибольшая – над Чукотским (410 млн⁻¹). Перепад концентраций между уровнем 200 м и свободной тропосферой достиг –15 млн⁻¹ над Баренцевым морем и уменьшился до –5 млн⁻¹ над морем Лаптевых. Над восточными морями перепад вообще стал положительным, что было связано с переносом воздуха из Аляски. Над акваториями большинства морей фиксируется горизонтальная неоднородность в распределении углекислого газа, отражающая региональные особенности ассимиляции его океаном и переноса с территории континента.

Ключевые слова: Арктика, атмосфера, воздух, вертикальное распределение, углекислый газ, парниковые газы, перенос, примеси, состав; Arctic, atmosphere, air, vertical distribution, carbon dioxide, greenhouse gases, transport, impurities, composition.

Введение

Продолжающееся изменение глобального климата, которое по заключению Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC) обусловлено ростом концентрации парниковых газов в атмосфере, приводит к необходимости пристального контроля их содержания по всему

земному шару [1], особенно в регионах, где потепление происходит быстрее. Например, в Арктике, где темпы роста температуры воздуха в 2–3 раза выше, чем в других регионах [2, 3]. Среди парниковых газов наибольший вклад в дополнительный нагрев воздуха, после водяного пара, вносит углекислый газ, точнее, его антропогенная добавка [1].

* Ольга Юрьевна Антохина (antokhina@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (arn@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Gerard Ancellet (gerard.ancellet@latmos.ipsl.fr); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан (bsb@iao.ru); Екатерина Валерьевна Гурулева (katassha@yandex.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев

(ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Katharine Law (kathy.law@latmos.ipsl.fr); Philippe Nédélec (nedp@aero.obs-mip.fr); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Jean-Daniel Paris (nedp@aero.obs-mip.fr); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Скляднева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

На возможную роль CO_2 в глобальном потеплении еще в 1960 г. обратил внимание Ч.Д. Килинг, которым были начаты систематические измерения концентрации углекислого газа в обсерватории Мауна-Лоа (США) и в Антарктиде. В его работе [4] показано, что скорость роста концентрации CO_2 на Южном полюсе соответствует количеству ископаемого топлива, сжигаемого во всем мире за год. Признание к автору пришло гораздо позже (в начале 1970-х гг.), после чего график многолетней изменчивости концентрации CO_2 стал носить его имя (Keeling curve). С этого времени начались интенсивные исследования содержания углекислого газа в атмосфере и его обмена с биосферой и подстилающей поверхностью.

Несмотря на проведенные исследования, обобщение которых имеется в [5, 6], эта проблема все еще далека от решения. На поверхности суши основным поглотителем CO_2 является растительность, которая, по оценкам [7, 8], компенсирует примерно треть часть его антропогенных выбросов. При этом оценки стоков CO_2 могут сильно отличаться [9]. Непонятно также, как долго биосфера суши сможет справляться с возрастающим избытком CO_2 [10].

Значительную часть избыточного углекислого газа в атмосфере поглощает океан [11, 12]. Но пока остается неясным взаимодействие суши и океана в стоковых механизмах, в частности, сколько CO_2 поступает в океан — хранилище углерода — с суши с притоком речных вод [13, 14]. Заметно различаются и оценки величины стока CO_2 в океан разными авторами [15–17], например, в два раза [18].

Рассматривая Арктический регион, следует упомянуть и об обмене CO_2 между атмосферой и поверхностью множества образовавшихся термокарстовых озер. Сам факт этого обмена установлен [19, 20], но надежных оценок мощности потоков пока нет.

Исследования углекислого газа в Арктике чаще всего ведутся в приземном слое воздуха вдоль побережья Северного Ледовитого океана [21–25] или в приводном слое на кораблях [26, 27]. Полученные в таких работах данные о динамике CO_2 на прибрежных территориях позволяют оценить мощности источников и стоков контролируемых примесей. В Российском секторе Арктики исследования выполнялись в приземном слое воздуха [28–30], в приводном слое на дрейфующих станциях [31] и с борта научно-исследовательских судов [32, 33].

Для исследования вертикального распределения CO_2 за рубежом широко используются самолеты-лаборатории [34–37]. В России же этот вид зондирования существенно сократился в последние десятилетия. Авторами настоящей работы были проведены лишь две небольшие летные кампании в Арктическом секторе России в рамках международных проектов [38, 39]. Для восполнения пробела в данных о вертикальном распределении газового и аэрозольного состава воздуха в сентябре 2020 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» был проведен эксперимент по зондированию атмосферы и водной

поверхности над акваториями всех морей Северного Ледовитого океана. В [40] приведено описание эксперимента, характеристик использованного оборудования и проанализированы средние концентрации примесей над всеми морями. Данная работа продолжает цикл статей с подробным анализом особенностей распределения состава воздуха над каждым из них.

Поскольку в работе [40] дана полная характеристика проведенного эксперимента, включающая описание использованного оборудования, схем зондирования, синоптической обстановки и средних концентраций газов и аэрозоля, то в данной статье их повторять не будем. Укажем только, что концентрации CH_4 измерялись газоанализатором G2301-*m* (Picarro Inc., США), работающим на основе метода спектроскопии внутривибриционного затухания сигнала во времени (Cavity Ring-Down Spectroscopy — CRDS). Этот прибор создан специально для измерений с борта самолета и позволяет регистрировать концентрацию CO_2 в диапазоне $0 \dots 1000 \text{ млн}^{-1}$ с погрешностью $< \pm 0,2 \text{ млн}^{-1}$ и частотой 1 Гц. Газоанализатор G2301-*m* калибровался перед началом самолетной кампании с использованием поверочных газовых смесей CO_2 и CH_4 (ПГС), изготовленных компанией DEUSTE Steininger GmbH (ФРГ), точные концентрации которых были определены в Лаборатории наук о климате и окружающей среде (LSCE UMR 8212, Франция), используя первичные стандарты по шкале WMO- CO_2 -X2007 и WMO- CH_4 -X2004A. После проведения кампании газоанализатор G2301-*m* был повторно проверен по вышеупомянутым ПГС на предмет дрейфа характеристик за этот период; дрейф не был выявлен. Профили углекислого газа восстанавливались по данным ежесекундных измерений путем скользящего среднего по 15 точкам и последующей интерполяции с шагом 10 м по высоте.

Также в [40] было показано, что выше 5000 м различия в концентрации CO_2 над разными морями были небольшими, поэтому в настоящей работе при анализе профилей будем рассматривать диапазон ниже этой высоты.

1. Вертикальное распределение

1.1. Баренцево море и прибрежные территории

Зондирование атмосферы над Баренцевым морем проводилось с 12:58 по 15:38 (здесь и далее время приведено по Гринвичу) 4.09.2020 г. Это связано с тем, что весь эксперимент осуществлялся в девяти часовых поясах в нескольких крупных административных округах, в которых местное и астрономическое время не совпадают.

Результаты измерений концентрации CO_2 над Баренцевым морем приведены на рис. 1 (цв. вкладка). Для сопоставления здесь же показан вертикальный профиль углекислого газа, измеренный над прибрежной территорией при вылете из аэропорта Архангельска.

Видно, что концентрация диоксида углерода, в отличие от метана [41], значительно возрастает от приводного слоя до верхней границы пограничного слоя атмосферы ($H_{\text{ПСА}}$). Значение $H_{\text{ПСА}}$ в [41] уже приводилось и составило в этот день $1,9 \pm 0,5$ км. В зависимости от района акватории Баренцева моря перепад концентраций (ΔCO_2) может составлять от -10 до -16 млн⁻¹. Выше пограничного слоя содержание углекислого газа либо медленно возрастало, либо изменялось незначительно. На уровне 3,5–3,8 км концентрации CO_2 практически совпадали над всеми районами Баренцева моря. Выше этого уровня профили снова расходятся. По-видимому, на этой высоте происходит смена механизмов формирования распределения углекислого газа по вертикали. В нижней тропосфере, включая пограничный слой, основными механизмами являются поглощение его океаном и перенос с сопредельных территорий. Выше 4 км главную роль играет общая циркуляция атмосферы. Очевидно, что полученное вертикальное распределение CO_2 отражает его поглощение как океаном, так и наземными экосистемами (профиль в районе Архангельска).

В первой части работы [41] анализ переноса метана на акваторию Баренцева моря выявил, что в период измерений воздух поступал с юго-западного направления, т.е. с материка на море. Причем концентрация метана над сушей была выше, чем в приводном слое воздуха [40, 41]. Из сопоставления концентрации CO_2 над сушей и морем видно (рис. 1), что для углекислого газа такого превышения нет, поскольку сентябрь 2020 г. выдался аномально теплым для этого района и фотосинтез оставался все еще эффективным. Рис. 1 показывает, что концентрации CO_2 примерно равны на всех рассматриваемых высотах.

1.2. Карское море и прибрежные территории

Зондирование атмосферы над акваторией Карского моря было выполнено 6.09.2020 г. Все параметры этой части эксперимента ранее приводились в [40] (то же самое касается и других морей). На рис. 2 (цв. вкладка) показаны профили CO_2 над морем и прибрежной территорией – Нарьян-Маром.

Видно, что три из четырех профилей отражают ту же тенденцию, что и над Баренцевым морем: значительный отрицательный перепад концентраций в пограничном слое и медленный рост выше $H_{\text{ПСА}}$ до уровня 3 км; ΔCO_2 на Карским морем изменялась от -6 до -11 млн⁻¹. Четвертый профиль (12:41) в пограничном слое имеет ход, близкий к нейтральному. Возможно, это отражение переноса дополнительного количества CO_2 с материка. В пользу этого предположения говорит и профиль концентрации углекислого газа, измеренный над прибрежной территорией. Из сопоставления видно, что в пограничном слое концентрации над сушей были выше, чем над морем, на 18 млн⁻¹.

Для анализа возможного переноса в пограничном слое атмосферы обратимся к обратным траекториям, построенным для Нарьян-Мара и самой дальней точки полета, которые представлены на рис. 3 (цв. вкладка).

На акваторию Карского моря воздух поступал из района Нарьян-Мара, куда он, в свою очередь, пришел из западной части европейской территории России, где много промышленных объектов – потенциальных источников CO_2 . Таким образом, повышение концентрации углекислого газа над акваторией Карского моря в пограничном слое, вероятно, связано с антропогенным фактором или с уменьшением его поглощения растительностью на суше из-за снижения вегетационной активности в период эксперимента.

Важно остановиться еще на одном аспекте. В первой части работы мы выяснили, что при наблюдавшемся в период измерений юго-западном переносе и высоком содержании метана над побережьем Карское море было дополнительным источником метана [41]. Однако концентрация CO_2 над акваторией океана значительно меньше, чем над сушей. Это свидетельствует о том, что океан поглотил существенную часть поступившего сюда CO_2 .

1.3. Море Лаптевых и прибрежные территории

Состав воздуха над морем Лаптевых измерялся 9.09.2020 г. Результаты самолетного зондирования приведены на рис. 4 (цв. вкладка).

Видно, что перепад концентраций между пограничным слоем и свободной тропосферой уменьшается с запада на восток. Над морем Лаптевых ΔCO_2 в зависимости от района зондирования изменялся от -3 до -6 млн⁻¹. Следовательно, или акватория этого моря меньше поглощала углекислый газ, или сюда поступал обогащенный углекислым газом воздух. В пользу второго варианта свидетельствуют данные о концентрации, полученные над прибрежным районом – аэропортом Тикси.

Для проверки этого вывода обратимся к рис. 5 (цв. вкладка), на котором приведены обратные траектории для п. Тикси и акватории моря Лаптевых.

В разные районы моря Лаптевых и в п. Тикси воздух поступал по разным траекториям. В Тикси и на юг моря Лаптевых воздух переносился с континента, в северную часть моря – с акватории Северного Ледовитого океана. Уменьшение же концентрации над акваторией по сравнению с сушей говорит о поглощении части CO_2 океаном.

1.4. Восточно-Сибирское море

В [40, 41] уже указывалось, что зондирование акваторий Восточно-Сибирского и Чукотского морей осуществлялось из аэропорта Анадырь, который расположен достаточно далеко от Северного Ледовитого океана. Поэтому сопоставление данных над акваториями морей с прибрежной территорией представляется не совсем корректным. С учетом 12-часовой

поясной разницы со временем по Гринвичу исследование проводилось 15, 16.09.2020 г. Данные измерений представлены на рис. 6 (цв. вкладка). Они показывают, что над этим морем характер распределения диоксида углерода кардинально отличался от всех рассмотренных выше морей. Минимальная концентрация CO_2 наблюдалась вблизи верхней границы пограничного слоя, высота которого составляла $1,8 \pm 0,5$ км [41]. Разница концентраций между приводным слоем и свободной тропосферой над Восточно-Сибирским морем была положительной и изменялась от +2 до +3,5 млн⁻¹. При этом нельзя сказать, что океан не поглощает CO_2 . Если рассмотреть нижнюю часть профилей, то видно, что концентрация уменьшается с высотой; ΔCO_2 в нижней части становится отрицательной и колеблется по акватории от -0,5 до 2,5 млн⁻¹.

Построенные обратные траектории показывают, что на нижний уровень, где концентрации CO_2 пониженные, воздух поступал с акватории западного сектора Северного Ледовитого океана (рис. 7, цв. вкладка). В пограничном слое атмосферы с высоким содержанием CO_2 перенос осуществлялся с территории Аляски. Отсюда CO_2 попадал и на более высокий уровень 2200 м – высоту, на которой фиксировались минимальные концентрации CO_2 . Наблюдавшееся различие в концентрациях, возможно, было связано с разницей в мощности источников в разных районах Аляски, откуда происходил перенос.

1.5. Чукотское море

Из-за сложных синоптических условий над Восточно-Сибирским морем самолетное зондирование состава воздуха 14 и 15.09.2020 г. проводилось над Чукотским морем. Данные измерений концентрации CO_2 приведены на рис. 8 (цв. вкладка). Видно, что характер вертикального распределения CO_2 над Чукотским морем подобен тому, который наблюдался над Восточно-Сибирским. Тем не менее можно отметить два различия.

Первое заключается в том, что минимальные концентрации опустились на уровень 0,8–1,2 км. Это не удивительно, так как, согласно [41], $H_{\text{ПСА}}$ была здесь самой низкой: $1,3 \pm 0,3$ км. Такая перестройка стратификации атмосферы привела к тому, что ΔCO_2 между пограничным слоем и свободной тропосферой несколько увеличился и изменялся от +4 до +6 млн⁻¹. Также увеличилась отрицательная разница CO_2 в нижнем слое, до -5,1 млн⁻¹.

Второе различие заключается в более высоких концентрациях CO_2 в ПСА.

Рис. 9 (цв. вкладка) показывает, что как на Восточно-Сибирское, так и на Чукотское море воздух поступал из южных районов Аляски.

Такое аномальное распределение метана, описанное в [41], и углекислого газа привело к необходимости проведения дополнительного зондирования состава воздуха над акваторией Берингова моря, которое в первоначальных планах эксперимента не значилось.

1.6. Берингово море и прибрежные территории

Зондирование атмосферы над акваторией Берингова моря выполнялось 16.09.2020 г., сразу после полета над Восточно-Сибирским. Целью этой дополнительной части эксперимента был анализ особенностей распределения углекислого газа и метана, обнаруженных над Чукотским и Восточно-Сибирским морями.

Данные измерений приведены на рис. 10 (цв. вкладка). Видно, что вертикальное распределение CO_2 над Беринговым морем в общем повторяет профили над Восточно-Сибирским и Чукотским морями. По цифровым показателям оно занимает промежуточное положение. Так, ΔCO_2 между пограничным слоем и свободной тропосферой находился в пределах от +1 до +4 млн⁻¹, а в нижней, приводной части ПСА – от -0,5 до -2,8 млн⁻¹. Высота ПСА, согласно [41], составляла $1,7 \pm 0,2$ км. Это также промежуточное значение.

Как формировалось вертикальное распределение CO_2 , можно увидеть из рис. 11 (цв. вкладка): воздух в районы зондирования переносился с территории Аляски или вдоль ее побережья.

Таким образом, выявленные над восточным сектором Российской Арктики особенности вертикального распределения углекислого газа имеют региональный характер и обусловлены переносом воздуха с Аляски. Это же подтверждает и вертикальный профиль CO_2 , полученный над прибрежным районом (Анадырь). Видно, что концентрация углекислого газа над Российским сектором Арктики была значительно ниже, чем над американской.

2. Горизонтальные неоднородности в распределении углекислого газа

Анализ горизонтальных неоднородностей в распределении CO_2 над акваториями арктических морей был выполнен на основе данных полетов, выполнявшихся на высоте 200 м над разными их участками. Напомним, что в ходе таких полетов регистрировались концентрации малых газовых составляющих с частотой 1 Гц. Участки, на которых были проведены измерения, представлены на рис. 15 в [41]. Мы полагали, что на этой высоте должны найти отражение неоднородности поглощения CO_2 поверхностью океана. Результаты измерений для сопоставления изменений концентрации над разными морями приведены на рис. 12 (цв. вкладка).

Видно, что над Беринговым и Восточно-Сибирским морями распределение концентрации углекислого газа было довольно однородным. Над Карским, морем Лаптевых и Чукотским оно скачкообразно изменялось при переходе из одного района акватории в другой. Для Баренцева моря характерен градиент концентрации с одним всплеском длиной 14 км. Наиболее вероятно, что это шлейф от какого-то мощного источника, расположенного на континенте.

Саму изменчивость можно оценить по данным табл. 1.

Таблица 1

Диапазон изменения концентрации углекислого газа на высоте 200 м на горизонтальных участках

Море	ΔCO_2 , млн ⁻¹
Баренцево	6
Карское	9
Лаптевых	11
Восточно-Сибирское	3
Чукотское	6
Берингово	2

Из данных табл. 1 следует, что диапазоны ΔCO_2 сильно разнятся над разными морями. Очевидно, что это связано с неоднородностью стока CO_2 в океан и его поступления с континентальной части суши.

3. Обсуждение результатов

В ходе самолетного зондирования были получены два вида профилей вертикального распределения углекислого газа: типичный для морских регионов, когда в ПСА концентрация CO_2 падала с высотой из-за поглощения его океаном [42–44], и нетипичный, когда его содержание в ПСА было выше, чем в приводном слое и свободной тропосфере. Нетипичный профиль может быть связан как с сезонным соотношением мощности источников и стоков [45, 46], так и с региональными особенностями.

Как было показано выше при анализе обратных траекторий, нетипичные профили наблюдались над морями, которые были подвержены переносу воздуха со стороны Аляски. Следовательно, этот регион может быть источником повышенных концентраций углекислого газа. Подтверждением этому являются результаты исследований [47–49]. Так, в [47] показано, что в Западном полушарии поглощение CO_2 прибрежными частями океана заметно ниже, чем в соседнем Чукотском море. Исследования внутренних территорий Аляски, на которых были пожары [48], выявило, что эти территории дают треть всех выбросов углекислого газа этого региона. В [49] уже в 2017 г. благодаря самолет-

ными измерениями фиксировались концентрации CO_2 до 425 млн⁻¹. Учитывая многолетнюю глобальную тенденцию роста концентрации CO_2 около 2,4 млн⁻¹/год [50], можно полагать, что в период нашего эксперимента в 2020 г. она могла быть выше 430 млн⁻¹, что даже при разбавлении за время переноса привело к таким высоким значениям над Восточно-Сибирским, Чукотским и Беринговым морями.

Сравним концентрации углекислого газа над изучаемыми морями (табл. 2).

Из данных табл. 2 следует, что 4–17.09.2020 г. прослеживалась устойчивая тенденция увеличения средней концентрации CO_2 с запада на восток. Если над Баренцевым морем она была 396,9 млн⁻¹, то над Беринговым она стала уже 411,5 млн⁻¹. Таким образом, рост составляет почти 15 млн⁻¹. Такое изменение содержания углекислого газа в атмосфере Арктики прямо противоположно тому, которое получено в нашем же эксперименте для метана [41]. Более того, оно не соответствует размещению антропогенных источников CO_2 , находящихся в основном в Европе, и стоков в виде бореальных лесов на Азиатской части России.

Наблюдалась также и тенденция уменьшения мощности стока CO_2 из атмосферы в океан с запада на восток. Так, $\Delta\text{CO}_2 = 13,5$ млн⁻¹ над Баренцевым морем, 9,3 млн⁻¹ над Карским и 4,8 млн⁻¹ над морем Лаптевых. Восточнее он вообще стал положительным за счет переноса воздуха в наш регион с Аляски, хотя и в этом случае океан продолжал поглощать углекислый газ, о чем свидетельствует перепад концентраций между максимумом в ПСА и приводным слоем. Он составил –1,1; –1,9 и –1,4 млн⁻¹ для Восточно-Сибирского, Чукотского и Берингова морей соответственно.

Остановимся еще на одном аспекте. Если океан ассимилирует углекислый газ путем растворения, то, с одной стороны, должна существовать отрицательная зависимость его поглощения от температуры воды [51]. С другой стороны, планктон, находящийся в верхнем слое океана, питается CO_2 . Скорость метаболизма для многих его видов положительно и нелинейно зависит от температуры воды [52]. Возникает закономерный вопрос: какой из этих механизмов проявляется сильнее? Из табл. 2 видно, что чем выше температура воды, тем ниже

Таблица 2

Средние характеристики распределения углекислого газа и его изменчивости

Параметр	Море					
	Баренцево	Карское	Лаптевых	Восточно-Сибирское	Чукотское	Берингово
Концентрация CO_2 на высоте 200 м, млн ⁻¹	396,9 ± 1,2	406,4 ± 1,9	408,4 ± 1,6	409,4 ± 0,5	410,4 ± 1,9	411,5 ± 0,2
ΔCO_2 между 200 м и свободной тропосферой, млн ⁻¹	–13,5 ± 2,6	–9,3 ± 2,4	–4,8 ± 1,3	+3,1 ± 0,9	+5,3 ± 1,0	+3,2 ± 1,5
ΔCO_2 между максимумом в ПСА и приводным слоем, млн ⁻¹	–	–	–	–1,1 ± 1,0	–1,9 ± 2,1	–1,4 ± 1,3
Температура воздуха на высоте 200 м, °С	14,7 ± 1,9	12,1 ± 0,6	7,2 ± 1,7	3,6 ± 0,4	5,0 ± 0,4	6,9 ± 0,3
Температура моря (прибрежные станции), °С	11	8	7	5	4	8

концентрация CO_2 в воздухе, следовательно, тем больше CO_2 поглотил океан. Таким образом, для морей Российского сектора Арктики преобладающим процессом является ассимиляция углекислого газа микроорганизмами, находящимися в верхнем слое океана.

Рассматривая изменение концентрации метана вдоль российского арктического побережья в [41], мы сделали оценку возможного влияния выбросов CH_4 на побережье при их переносе на акватории. Следуя этому подходу, мы составили табл. 3 для углекислого газа. Здесь важно учесть, что помимо антропогенных выбросов определенное количество CO_2 добавляет растительность суши, которая в ночное время переходит в режим дыхания [53].

Таблица 3
Максимальные и минимальные концентрации углекислого газа над морями и прибрежными районами Арктики

Море	CO_2 , млн^{-1}		Берег	CO_2 , млн^{-1}	
	max	min		max	min
Баренцево	401	395	Архангельск	420	394
Карское	412	403	Нарьян-Мар	420	401
Лаптевых	414	403	Тикси	414	405
Чукотское	413	407	Анадырь	415	404
Берингово	412	409			
Восточно-Сибирское	411	408			

Данные табл. 3 показывают, что разброс концентраций CO_2 на побережье выше, чем над акваториями. Следовательно, при переносе с суши на море возможно как увеличение, так и уменьшение содержания углекислого газа над морем. Сопоставление минимальных значений на побережье и над морями позволяет сделать вывод, что растительность суши может поглощать больше, чем океан.

Заключение

Результаты проведенного за достаточно короткое время самолетного эксперимента позволили сопоставить концентрации углекислого газа над всеми морями Российского сектора Арктики. Оказалось, что в сентябре 2020 г. содержание CO_2 возрастало с запада на восток. Наименьшим оно было над Баренцевым морем, а наибольшим — над Чукотским и Беринговым морями. Последний вылет был контрольным для восточного региона.

Вместе с ростом концентрации с запада на восток уменьшался и ее перепад между приводным слоем и свободной тропосферой, что отражало степень поглощения углекислого газа океаном. Над Восточно-Сибирским, Чукотским и Беринговым морями эта разница вообще стала положительной, что было вызвано переносом воздуха с территории Аляски или с акватории примыкающих к ней морей.

Над акваториями большинства морей распределение CO_2 по площади было неоднородным, что, скорее всего, отражает различия в поглощении его океаном и особенности переноса с континента.

Величина поглощения CO_2 океаном в период эксперимента зависела от температуры воды. Эта связь была положительной, что означает преобладание процессов ассимиляции CO_2 планктоном, а не его растворения в воде.

Поскольку такого рода эксперимент является первым в российской истории исследования состава воздуха в Арктике, то естественно, что полученные результаты следует рассматривать как предварительные. Необходимо проведение подобного зондирования и в другие сезоны года, когда часть источников и стоков может быть «отключена», например в зимнее время при замерзшем океане и отсутствии вегетационной активности.

Финансирование. Зондирование атмосферы выполнено на УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»», созданной в рамках государственного задания ИОА СО РАН. Обработка данных и анализ результатов проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ по проекту «Исследование антропогенных и естественных факторов изменений состава воздуха и объектов окружающей среды в Сибири и Российском секторе Арктики в условиях быстрых изменений климата с использованием УНУ «Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик»» (соглашение № 075-15-2021-934).

Список литературы

1. IPCC, 2021: Summary for Policymakers // Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
2. Shepherd T.G. Effects of a warming Arctic // Science. 2016. V. 353, N 6303. P. 989–990.
3. Najafi M.R., Zwiers F.W., Gillett N.P. Attribution of Arctic temperature change to greenhouse-gas and aerosol influences // Nat. Clim. Change. 2015. N 2. 4 p.
4. Keeling C.D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere // Tellus. 1960. V. 12, N 2. P. 200–203.
5. Le Quéré C, Andrew R.M., Friedlingstein P., Sitch S., Hauck J., Pongratz J., Pickers P.A., Korsbakken J.I., Peters G.P., Canadell J.G., Arneeth A., Arora V.K., Barbero L., Bastos A., Bopp L., Chevallier F., Chini L.P., Ciias P., Doney S.C., Gkritzalis T., Goll D.S., Harris I., Haverd V., Hoffman F.M., Hoppema M., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Johannesen T., Jones C.D., Kato E., Keeling R.F., Goldewijk K.K., Landschützer P., Lefèvre N., Lienert S., Liu Z., Lombardozzi D., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S., Neill C., Olsen A., Ono T., Patra P., Pregon A., Peters W., Peylin P., Pfeil B., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rocher M., Rödenbeck C., Schuster U., Schwinger J., Séférian R., Skjelvan I., Steinhoff T., Sutton A., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Laan-Luijckx I.T., van der Werf G.R., Viovy N., Walker A.P., Wiltshire A.J., Wright R., Zaehe S., Zheng B. Global carbon budget 2018 // Earth Syst. Sci. Data. 2018. V. 10, N 4. P. 2141–2194.
6. Friedlingstein P., Jones M.W., O'Sullivan M., Andrew R.M., Hauck J., Peters G.P., Peters W., Pongratz J.,

- Sitch S., Le Quéré C., Bakker D.C.E., Canadell J.G., Ciais P., Jackson R.B., Anthoni P., Barbero L., Bastos A., Bastrikov V., Becker M., Bopp L., Buitenhuis E., Chandra N., Chevallier F., Chini L.P., Currie K.I., Feely R.A., Gehlen M., Gilfillan D., Gkritzalis T., Goll D.S., Gruber N., Gutekunst S., Harris J., Havard V., Houghton R.A., Hurtt G., Ilyina T., Jain A.K., Joetzer E., Kaplan J.O., Kato E., Goldewijk K.K., Korsbakken J.I., Landschützer P., Lauvset S.K., Lefèvre N., Lenton A., Lienert S., Lombardozzi D., Marland G., McGuire P.C., Melton J.R., Metzl N., Munro D.R., Nabel J.E.M.S., Nakaoka S.-I., Neill C., Omar A.M., Ono T., Pregon A., Pierrot D., Poulter B., Rehder G., Resplandy L., Robertson E., Rödenbeck C., Séférian R., Schwinger J., Smith N., Tans P.P., Tian H., Tilbrook B., Tubiello F.N., van der Werf G.R., Wiltshire A.J., Zaehle S. Global carbon budget 2019 // *Earth Syst. Sci. Data*. 2019. V. 11, N 4. P. 1783–1838.
7. Huntingford C., Oliver R.J. Constraints on the CO₂ fertilization effect emerge // *Nature*. 2021. V. 600, N 7888. P. 224–225.
 8. Keenan T.F., Luo X., De Kauwe M.G., Medlyn B.E., Prentice I.C., Stocker B.D., Smith N.G., Terrer C., Wang H., Zhang Y., Zhou S. A constraint on historic growth in global photosynthesis due to increasing CO₂ // *Nature*. 2021. V. 600, N 7888. P. 253–257.
 9. Zhang Y., Ye A. Would the obtainable gross primary productivity (GPP) products stand up? A critical assessment of 45 global GPP products // *Sci. Total Environ.* 2021. V. 783. P. 146965.
 10. Trisos C.H., Merow C., Pigot A.L. The projected timing of abrupt ecological disruption from climate change // *Nature*. 2020. V. 580, N 7804. P. 496–501.
 11. Thomasy H. The Arctic Ocean may not be a reliable carbon sink // *EOS*. 2020. N 101. DOI: 10.1029/2020EO142366.
 12. van Marle M.J.E., van Wees D., Houghton R.A., Field R.D., Verbesselt J., van der Werf G.R. New land-use-change emissions indicate a declining CO₂ airborne fraction // *Nature*. 2022. V. 603, N 7901. P. 450–454.
 13. Regnier P., Resplandy L., Najjar R.G., Ciais P. The land-to-ocean loops of the global carbon cycle // *Nature*. 2022. V. 603, N 7901. P. 401–410.
 14. Crisp D., Dolman H., Tanhua T., McKinley G.A., Hauck J., Bastos A., Sitch S., Eggleston S., Aich V. How well do we understand the land–ocean–atmosphere carbon cycle? // *Rev. Geophys.* 2022. V. 60, N 2. P. e2021RG000736.
 15. Averett N. The ocean is still sucking up carbon—maybe more than we think // *EOS*. 2022. N 103. DOI: 10.1029/2022EO220220.
 16. Zhang M., Cheng Y., Bao Y., Zhao C., Wang G., Zhang Y., Song Z., Wu Z., Qiao F. Seasonal to decadal spatiotemporal variations of the global ocean carbon sink // *Glob. Change Biol.* 2022. V. 28, N 5. P. 1786–1797.
 17. Isson T.T., Planavsky N.J., Coogan L.A., Stewart E.M., Ague J.J., Bolton E.W., Zhang S., McKenzie N.R., Kump L.R. Evolution of the global carbon cycle and climate regulation on earth // *Global. Biogeochem. Cycles*. 2020. V. 34, N 2. P. e2018GB006061.
 18. Watson A.J., Schuster U., Shutler J.D., Holding T., Ashton I.G.C., Landschützer P., Woolf D.K., Goddijn-Murphy L. Revised estimates of ocean–atmosphere CO₂ flux are consistent with ocean carbon inventory // *Nat. Commun.* 2020. V. 11. P. 4422.
 19. Brothers S., Bowes D., Pearse W.D., Tank S., Vanengen R., Sibley P. Declining summertime pCO₂ in tundra lakes in a granitic landscape // *Global. Biogeochem. Cycles*. 2021. V. 35, N 2. P. e2020GB006850.
 20. Rööma E.-I., Lauringson V., Laasa A., Kangro K., Viika M., Meinson P., Cremona F., Nöges P., Nöges T. Summer greenhouse gas fluxes in different types of hemiboreal lakes // *Sci. Total Environ.* 2022. V. 843. P. 156732.
 21. Cassidy A.E., Christen A., Henry Y.R. The effect of a permafrost disturbance on growing-season carbon-dioxide fluxes in high Arctic tundra ecosystem // *Biogeosci.* 2016. V. 13, N 8. P. 2291–2303.
 22. Yasunaka S., Murata A., Watanabe E., Chierici M., Fransson A., van Heuven S., Hoppema M., Ishii M., Johannessen T., Kosugi N., Lauvset S.K., Mathis J.T., Nishino S., Omar A.M., Olsen A., Sasano D., Takahashi T., Wanninkhof R. Mapping of the air–sea CO₂ flux in the Arctic Ocean and its adjacent seas: Basin-wide distribution and seasonal to interannual variability // *Polar Sci.* 2016. N 3. P. 323–334.
 23. Bowen J.C., Ward C.P., Kling G.W., Cory R.M. Arctic amplification of global warming strengthened by sunlight oxidation of permafrost carbon to CO₂ // *Geophys. Res. Lett.* 2020. V. 47, N 12. P. e2020GL087085.
 24. Jentzsch K., Schulz A., Pirk N., Foken T., Crewell S., Boike J. High levels of CO₂ exchange during synoptic-scale events introduce large uncertainty into the Arctic carbon budget // *Geophys. Res. Lett.* 2021. V. 48, N 9. P. e2020GL092256.
 25. Pedron S.A., Welker J.M., Euskirchen E.S., Klein E.S., Walker J.C., Xu X., Czimczik C.I. Closing the winter gap – year-round measurements of soil CO₂ emission sources in Arctic tundra // *Geophys. Res. Lett.* 2022. V. 49, N 6. P. e2021GL097347.
 26. Prytherch J., Yelland M.J. Wind, convection and fetch dependence of gas transfer velocity in an Arctic sea-ice lead determined from eddy covariance CO₂ flux measurements // *Global Biogeochem. Cycles*. 2021. V. 35, N 2. P. e2020GB006633.
 27. Massicotte P., Amon R.M.W., Antoine D., Archambault P., Balzano S., Bélanger S., Benner R., Boeuf D., Bricaud A., Bruyant F., Chaillou G., Chami M., Charrrière B., Chen J., Claustre H., Coupel P., Delsaut N., Doxaran D., Ehn J., Fichot C., Forget M.-H., Fu P., Gagnon J., Garcia N., Gasser B., Ghiglione J.-F., Gorsky G., Gosselin M., Gourvil P., Gratton Y., Guillot P., Heipieper H.J., Heussner S., Hooker S.B., Huot Y., Jeanthon C., Jeffrey W., Joux F., Kawamura K., Lansard B., Leymarie E., Link H., Lovejoy C., Marec C., Marie D., Martin J., Massé G., Matsuoka A., McKague V., Mignot A., Miller W.L., Miquel J.-C., Mucci A., Ono K., Ortega-Retuerta E., Panagiotopoulos C., Papakyriakou T., Picheral M., Prieur L., Raimbault P., Ras J., Reynolds R.A., Rochon A., Rontani J.-F., Schmechtig C., Schmidt S., Sempéré R., Shen Y., Song G., Stramski D., Tachibana E., Thirouard A., Tolosa I., Tremblay J.E., Vaïtilingom M., Vault D., Vaultier F., Volkman J.K., Xie H., Zheng G., Babin M. The MALINA oceanographic expedition: How do changes in ice cover, permafrost and UV radiation impact biodiversity and biogeochemical fluxes in the Arctic Ocean? // *Earth Syst. Sci. Data*. 2021. V. 13, N 4. P. 1561–1592.
 28. Tei S., Morozumi T., Kotani A., Takano S., Sugimoto A., Miyazaki S., Shingubara R., Fan R., Petrov R., Starostin E., Shakhmatov R., Nogovitsyn A., Maximov T. Seasonal variations in carbon dioxide exchange fluxes at a taiga–tundra boundary ecosystem in North-eastern Siberia // *Polar Sci.* 2021. V. 28. P. 100644.
 29. Juutinen S., Aurela M., Tuovinen J.-P., Ivakhov V., Linkosalmi M., Räsänen A., Virtanen T., Mikola J.,

- Nyman J., Vähä E., Loskutova M., Makshtas A., Laurila T.* Variation in CO₂ and CH₄ fluxes among land cover types in heterogeneous Arctic tundra in north-eastern Siberia // *Biogeosci.* 2022. V. 19, N 13. P. 3151–3167.
30. *Ивахов В.М., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Зинченко А.В., Лоскутова М.А., Макитас А.П., Кустов В.А., Лаурилла Т., Аурела М., Асми Э.* Атмосферная концентрация диоксида углерода на станциях Тикси и Мыс Баранова в 2010–2017 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2019. Т. 4. С. 110–121.
31. *Нагурный А.П.* Анализ данных измерений концентрации диоксида углерода в приледном слое атмосферы на ледовой дрейфующей станции «Северный Полюс-35» (2007–2008 гг.) // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 9. С. 55–61.
32. *Пинко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П.* Динамика CO₂ на шельфе Восточно-Сибирского моря // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 9. С. 62–73.
33. *Semiletov I.P., Shakhova N.E., Pipko I.I., Pugach S.P., Charkin A.N., Dudarev O.V., Kosmach D.A., Nishino S.* Space-time dynamics of carbon and environmental parameters related to carbon dioxide emissions in the Buor-Khaya Bay and adjacent part of Laptev Sea // *Biogeosci.* 2013. V. 10, N 9. P. 5977–5996.
34. *France J.L., Cain M., Fisher R.E., Lowry D., Allen G., Shea S.J.O., Illingworth S., Pyle J., Warwick N., Jones B.T., Gallagher M.W., Bower K., Breton M.L., Percival C., Muller J., Wellpott A., Bauquitte S., George C., Hayman G.D., Manning A.J., Myhre C.L., Lanoiselle M., Nisbet E.G.* Measurements of δ¹³C in CH₄ and using particle dispersion modeling to characterize sources of Arctic methane within an air mass // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121, N 23. P. 14257–14270.
35. *Quennehen B., Schwarzenboeck A., Schmale J., Schneider J., Sodemann H., Stohl A., Ancellet G., Crumeyrolle S., Law K.S.* Physical properties of pollution aerosol particles transported from North America to Greenland as measured during the POLARCAT summer campaign // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11, N 21. P. 10947–10963.
36. *Leitch W.R., Korolev A., Aliabadi A.A., Burkart J., Willis M.D., Abbatt J.P.D., Bozem H., Hoer P., Kollner F., Schneider J., Herber A., Konrad C., Brauner R.* Effects of 20–100 nm particles on liquid clouds in the clean summertime Arctic // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 17. P. 11107–11124.
37. *Airborne Measurements for Environmental Research / M. Wendisch, J.-L. Brenguier (eds.).* Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. 655 p.
38. *Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Нэдэлек Ф., Париж Ж.-Д., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В.* Крупномасштабные исследования газового и аэрозольного состава воздуха над Сибирским регионом // *Оптика атмосфер. и океана.* 2014. Т. 27, № 3. С. 232–239.
39. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Nedelec Ph., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над Российским сектором Арктики // *Оптика атмосфер. и океана.* 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Nedelec Ph., Paris J.-D., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* The vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
40. *Belan B.D., Ancellet G., Andreeva I.S., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Y., Balin Y.S., Barsuk V.E., Belan S.B., Chernov D.G., Davydov D.K., Fofonov A.V., Ivlev G.A., Kotel'nikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhal'chishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopko-va O.V., Ol'kin S.E., Panchenko M.V., Paris J.-D., Penner I.E., Ptashnik I.V., Rasskazchikova T.M., Reznikova I.K., Romanovskii O.A., Safatov A.S., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Yakovlev S.V., Zenkova P.N.* Integrated airborne investigation of the air composition over the Russian sector of the Arctic // *Atmos. Meas. Tech.* 2022. V. 15, N 13. P. 3941–3967.
41. *Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Гурулева Е.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Law K., Рассказчикова Т.М., Paris J.-D., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 1. Метан // *Оптика атмосфер. и океана.* 2023. Т. 36, № 2. С. 100–110.
42. *O'Shea S.J., Allen G., Gallagher M.W., Bower K., Illingworth S.M., Muller J.B.A., Jones, Percival C.J., Bauquitte S.J.-B., Cain M., Warwick N., Quiguet A., Skuba U., Drewer J., Dinsmore K., Nisbet E.G., Lowry D., Fisher R.E., France J.L., Aurela M., Lohila A., Hayman G., George C., Clark D.B., Manning A.J., Friend A.D., Pyle J.* Methane and carbon dioxide fluxes and their regional scalability for the European Arctic wetlands during the MAMM // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 23. P. 13159–13174.
43. *Pagonis D., Campuzano-Jost P., Guo H., Day D.A., Schueneman M.K., Brown W.L., Nault B.A., Stark H., Siemens K., Laskin A., Piel F., Tomsche L., Wisthaler A., Coggon M.M., Gkatzelis G.I., Halliday H.S., Krechmer J.E., Moore R.H., Thomson D.S., Warneke C., Wiggins E.B., Jimenez J.L.* Airborne extractive electrospray mass spectrometry measurements of the chemical composition of organic aerosol // *Atmos. Meas. Tech.* 2021. V. 14, N 2. P. 1525–1544.
44. *Gaudet B.J., Davis K.J., Pal S., Jacobson A.R., Schuh A., Lauvaux T., Feng S., Browell E.V.* Regional-scale, sectorspecific evaluation of global CO₂ inversion models using aircraft data from the ACT-America project // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126, N 4. P. e2020JD033623.
45. *DiGangi J.P., Choi Y., Nowak J.B., Halliday H.S., Diskin G.S., Feng S., Barkley Z.R., Lauvaux T., Pal S., Davis K.J., Baier B.C., Sweeney C.* Seasonal variability in local carbon dioxide biomass burning sources over central and eastern US using airborne in situ enhancement ratios // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126, N 24. P. e2020JD034525.
46. *Bisht J.S.H., Machida T., Chandra N., Tsuboi K., Patra P.K., Umezawa T., Niwa Y., Sawa Y., Morimoto S., Nakazawa T., Saitoh N., Takigawa M.* Seasonal variations of SF₆, CO₂, CH₄, and N₂O in the UT/LS region due to emissions, transport, and chemistry // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2021. V. 126, N 4. P. e2020JD033541.

47. Ouyang Z., Li Y., Qi D., Zhong W., Murata A., Nishino S., Wu Y., Jin M., Kirchman D., Chen L., Cai W.-J. The changing CO₂ sink in the western Arctic Ocean from 1994 to 2019 // *Global. Biogeochem. Cycles*. 2022. V. 36, N 1. P. e2021GB007032.
48. Ueyama M., Iwata H., Nagano H., Tahara N., Iwama C., Harazono Y. Carbon dioxide balance in early-successional forests after forest fires in interior Alaska // *Agric. Forest Meteorol.* 2019. V. 275. P. 196–207.
49. Sweeney C., Chatterjee A., Wolter S., McKain K., Bogue R., Conley S., Newberger T., Hu L., Ott L., Poulter B., Schiferl L., Weir B., Zhang Z., Miller C.E. Using atmospheric trace gas vertical profiles to evaluate model fluxes: A case study of Arctic-CAP observations and GEOS simulations for the ABoVE domain // *Atmos. Chem. Phys.* 2022. V. 22, N 9. P. 6347–6364.
50. *Greenhouse Gas Bulletin – The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2020*. WMO, 2021. N 17. 7 p.
51. Глинка Н.Л. *Общая химия*. Л.: Химия, 1985. 702 с.
52. Boscolo-Galazzo F., Crichton K.A., Barker S., Pearson P.N. Temperature dependency of metabolic rates in the upper ocean: A positive feedback to global climate change? // *Glob. Planet. Change*. 2018. V. 170, N 11. P. 201–212.
53. Trumbore S. Carbon respired by terrestrial ecosystems – recent progress and challenges // *Global Change Biol.* 2006. V. 12, N 2. P. 141–153.

O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, G. Ancellet, B.D. Belan, S.B. Belan, E.V. Guruleva, D.K. Davydov, G.A. Ilev, A.V. Kozlov, K. Law, P. Nédélec, T.M. Rasskazchikova, J.-D. Paris, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Air composition over the Russian sector of the Arctic in September 2020. 2. Carbon dioxide.**

The work analyzes the spatial distribution of carbon dioxide over the seas of the Russian sector of the Arctic based on the results of the comprehensive experiment conducted in September 2020. It turned out that during the experiment, the concentration of CO₂ increased from west to east. The minimum 396 ppm was over the Barents Sea, and the maximum, over the Chukchi Sea – 4106 ppm. The difference in concentrations between a level of 200 m and the free troposphere reached –156 ppm over the Barents Sea and decreased to –56 ppm over the Laptev Sea. Over the eastern seas, the difference generally became positive, which was associated with the air transfer from Alaska. Above the waters of most seas, horizontal heterogeneity in the distribution of carbon dioxide was observed, reflecting the regional features of its assimilation by the ocean and transfer from the continent.

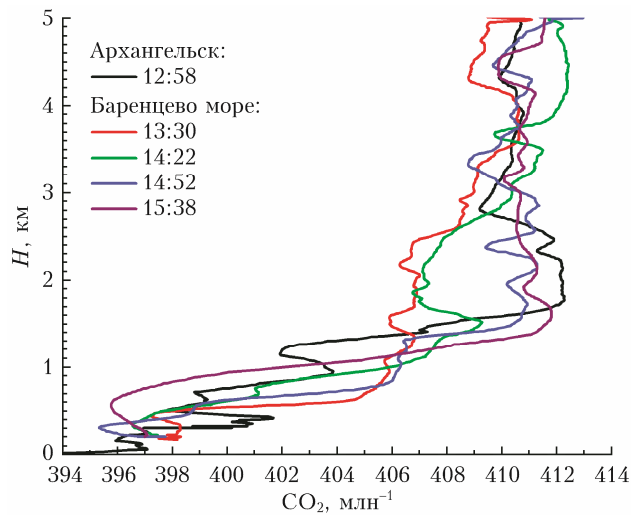


Рис. 1. Вертикальное распределение углекислого газа над Баренцевым морем 4.09.2020 г.

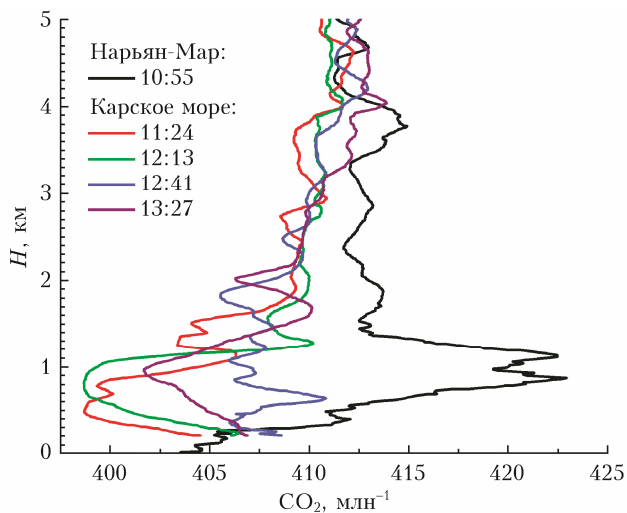


Рис. 2. Вертикальное распределение углекислого газа над Карским морем 6.09.2020 г.

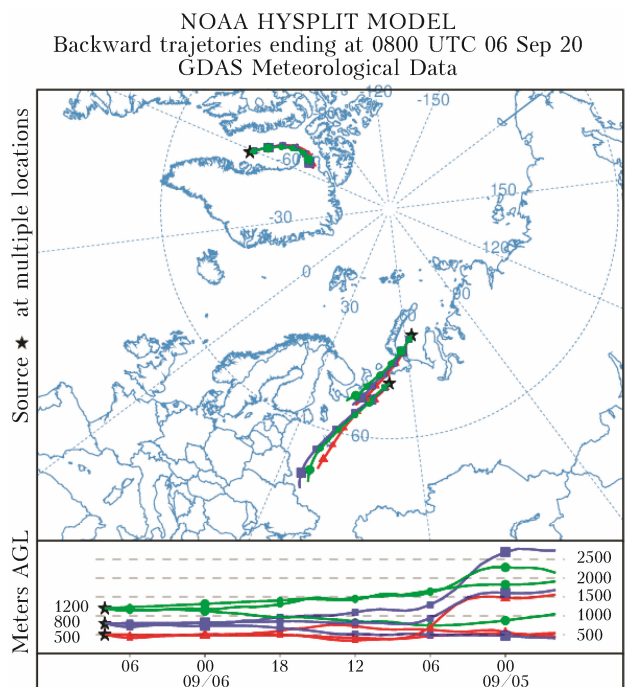


Рис. 3. Обратные траектории переноса воздуха в район Нарьян-Мара и на акваторию Карского моря 6.09.2020 г.

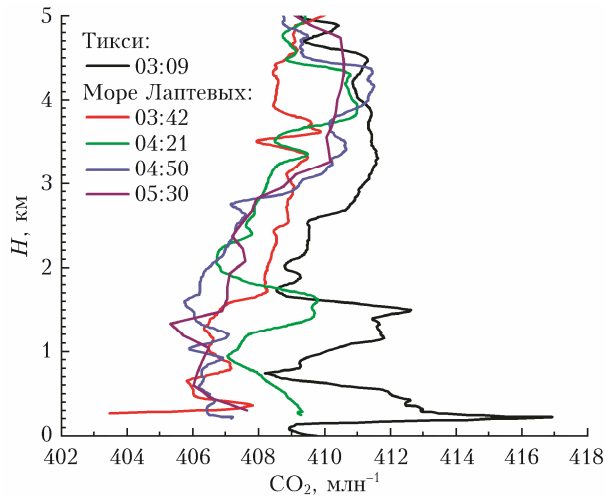


Рис. 4. Вертикальное распределение углекислого газа над морем Лаптевых 9.09.2020 г.

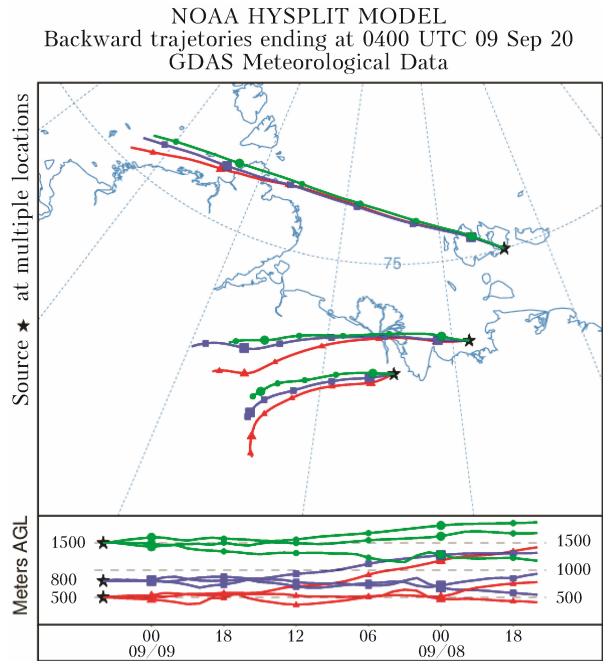


Рис. 5. Обратные траектории переноса воздуха в район Тикси и на акваторию моря Лаптевых 9.09.2020 г.

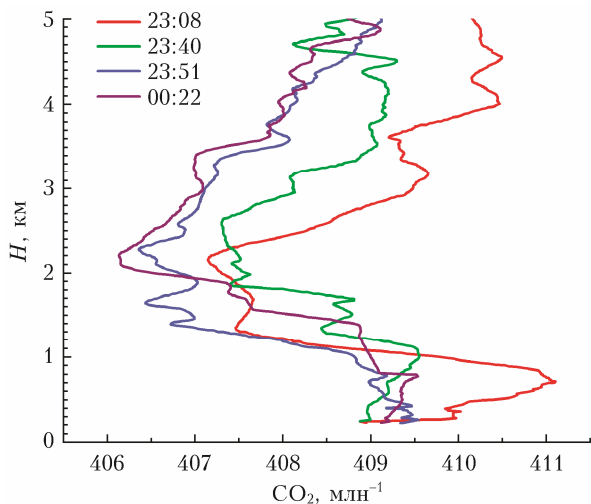


Рис. 6. Вертикальное распределение углекислого газа над Восточно-Сибирским морем 15 и 16.09.2020 г.

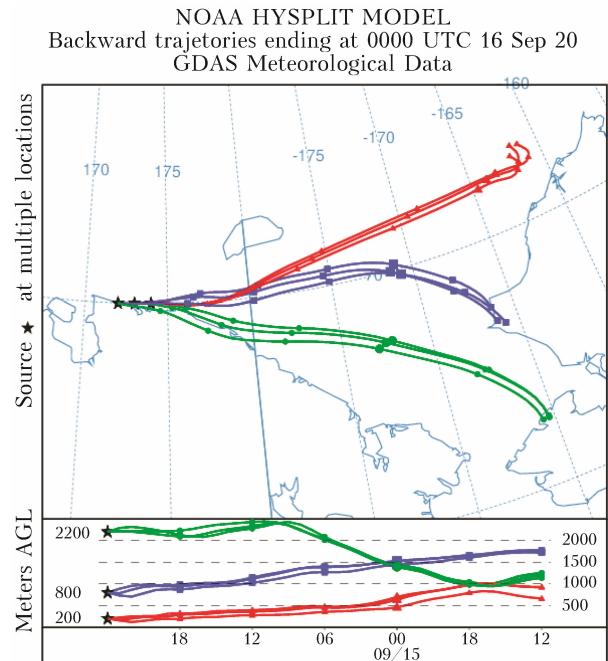


Рис. 7. Обратные траектории переноса воздуха на акваторию Восточно-Сибирского моря 15 и 16.09.2020 г.

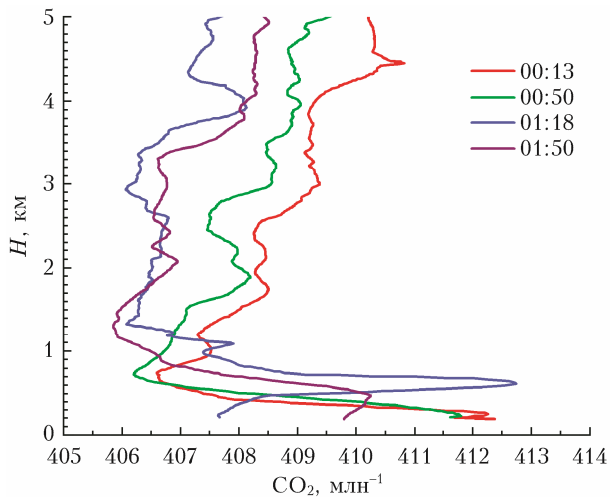


Рис. 8. Вертикальное распределение углекислого газа над Чукотским морем 15.09.2020 г.

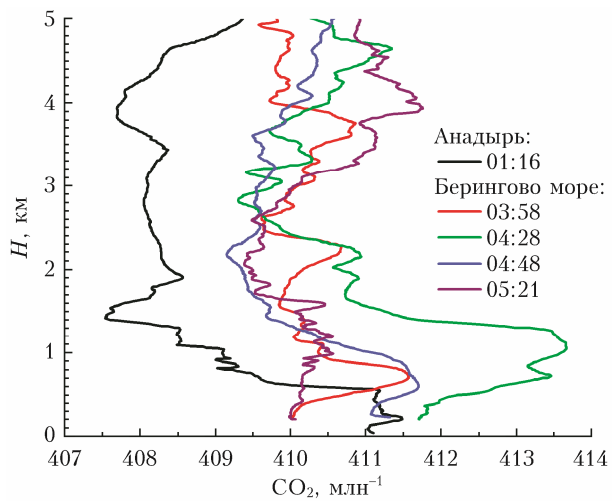


Рис. 10. Вертикальное распределение углекислого газа над Беринговым морем 16.09.2020 г.

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0200 UTC 15 Sep 20
GDAS Meteorological Data

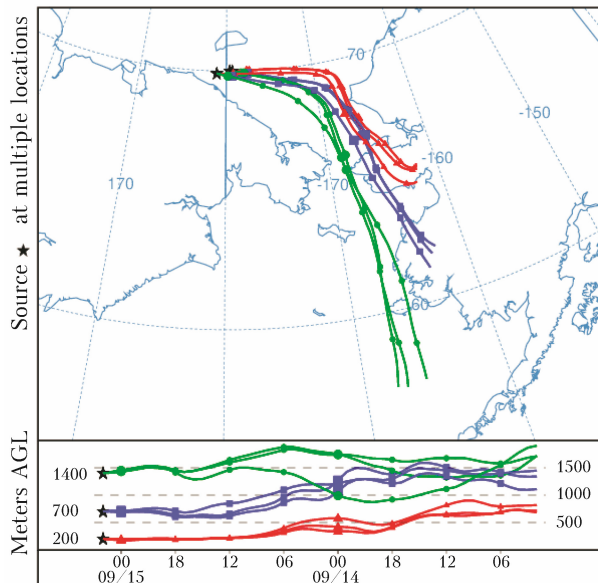


Рис. 9. Обратные траектории переноса воздуха на акваторию Чукотского моря 14 и 15.09.2020 г.

NOAA HYSPLIT MODEL
Backward trajectories ending at 0400 UTC 16 Sep 20
GDAS Meteorological Data

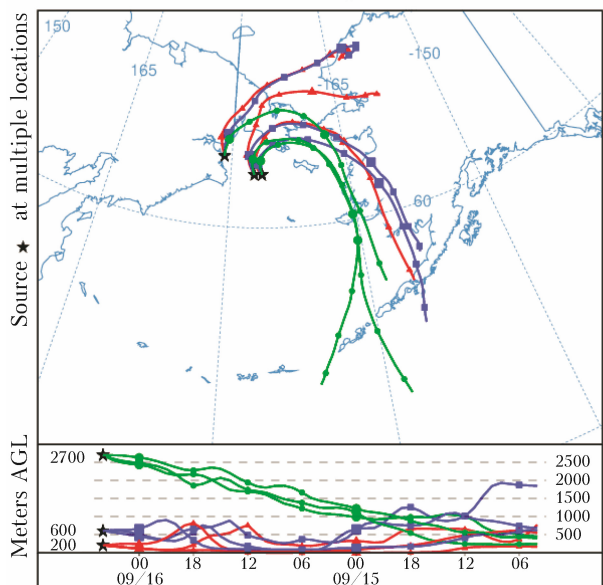


Рис. 11. Обратные траектории переноса воздуха на акваторию Берингова моря 16.09.2020 г.

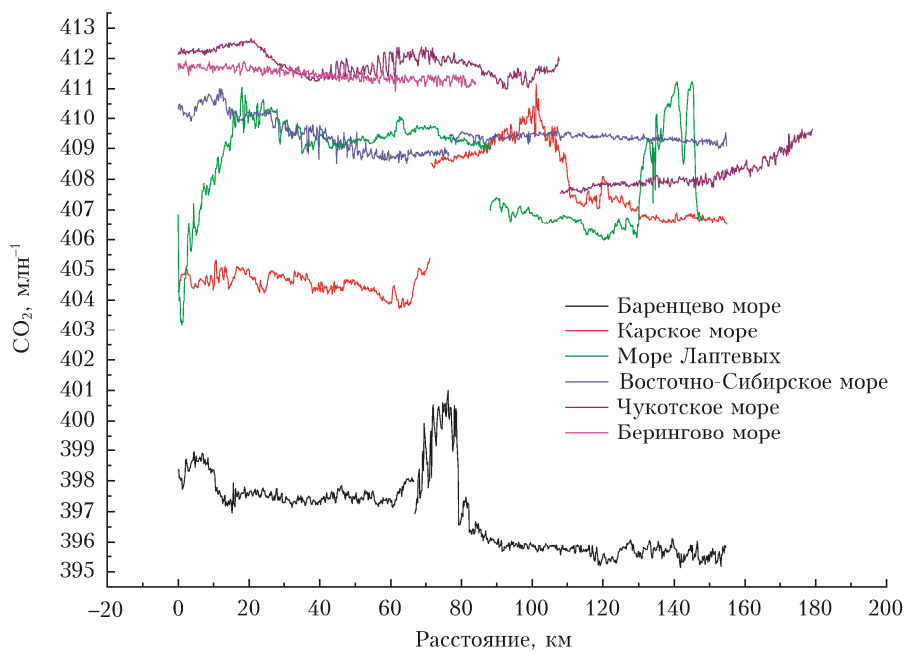


Рис. 12. Концентрация углекислого газа на высоте 200 м над морями Российского сектора Арктики и Тихого океана