

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 3. Малые газовые составляющие атмосферы

О.Ю. Антохина¹, П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹,
G. Ancellet², Б.Д. Белан¹, С.Б. Белан¹, 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. Складнева¹,
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'Aerologie
CNRS-UPS, 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 21.07.2023 г.;
после доработки 5.09.2023 г.;
принята к печати 22.10.2023 г.

Настоящая статья продолжает цикл исследований состава воздуха над морями Российского сектора Арктики в сентябре 2020 г. Анализируется пространственное распределение следующих малых газовых составляющих: оксида углерода (CO), озона (O₃), оксида и диоксида азота (NO, NO₂) и диоксида серы (SO₂). Показано, что концентрация O₃ изменялась в приводном слое (высота 200 м) в диапазоне 18–36 млрд⁻¹, CO – 60–130 млрд⁻¹, NO – 0,005–0,12 млрд⁻¹, NO₂ – 0,10–1,00 млрд⁻¹ и SO₂ – 0,06–0,80 млрд⁻¹. Над акваториями большинства морей распределение газов по площади было неоднородным, что, скорее всего, обусловливается различиями в поглощении их океаном и особенностями переноса с континента.

Ключевые слова: Арктика, атмосфера, воздух, вертикальное распределение, диоксид азота, диоксид серы, озон, оксид азота, оксид углерода, перенос, примеси, состав; Arctic, atmosphere, air, vertical distribution, nitrogen dioxide, sulfur dioxide, ozone, nitrogen oxide, carbon monoxide, transport, impurities, composition.

Введение

По заключению Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, IPCC), глобальное потепление по-прежнему продолжается, что обусловлено изменением состава воздуха вследствие роста антропогенных выбросов газов и аэрозоля [1]. Это вызывает необходимость постоянных наблюдений за их содержанием в различных районах земного шара, особенно в регионах, где потепление происходит быстрее. К таким, в частности,

относится Арктика, где темпы роста температуры воздуха были в два-три раза выше, чем над другими районами Земли [2, 3], а согласно результатам анализа последних лет они стали выше в 4 раза [4–6]. В связи с этим появляются закономерные вопросы: как потепление в Арктике влияет на состав воздуха [7–10] и как поступающие в регион примеси влияют на потепление [11–14]? Ответить на них, так же как и наметить план мероприятий по сохранению уязвимой природы Арктики, можно только на основании данных измерений и анализа прямых

* 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); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Ка-

tharine Saran 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 Складнева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

и обратных связей между потеплением климата и изменением состава воздуха [15]. Однако таких данных в Российском секторе Арктики крайне мало.

Исследования состава воздуха в этом регионе выполнялись в основном в приземном слое [16–18], в приводном — на дрейфующих станциях [19] и с борта научно-исследовательских судов [20, 21]. Измерялись главным образом парниковые газы [22]. Другие малые составляющие атмосферы оказались не изученными.

Для восполнения пробела в данных о вертикальном распределении газового и аэрозольного составов воздуха над Российским сектором Арктики 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 [23] приведено описание этого эксперимента и характеристик использованного оборудования, проанализированы средние концентрации примесей над всеми морями. В [24, 25] был выполнен анализ особенностей распределения метана и углекислого газа над каждым из морей. В настоящей работе проводится анализ распределения следующих малых газовых составляющих над морями Российского сектора Арктики: оксида углерода (CO), озона (O₃), оксида и диоксида азота (NO, NO₂) и диоксида серы (SO₂).

1. Данные и методы исследования

Перечень и технические характеристики использованных для измерения приборов приведены в табл. 1.

Профили концентрации газов восстанавливались по данным измерений с указанным в табл. 1 периодом путем скользящего среднего по 15 точкам и последующей интерполяции с шагом 10 м по высоте. В [23] было показано, что выше 5000 м различия в концентрации газов над разными морями были небольшими. Поэтому в настоящей работе при анализе ограничимся этой высотой.

2. Вертикальное распределение

2.1. Баренцево море и прибрежные территории

Зондирование атмосферы над Баренцевым морем осуществлялось с 12:58 по 15:39 4.09.2020 г. Здесь и далее время приведено по Гринвичу. Это связано с тем, что весь эксперимент проводился в девяти

часовых поясах, в ряде крупных административных территорий которых местное и астрономическое время не совпадают (например, регион Саха Якутия).

Результаты измерений концентраций газов из табл. 1 над Баренцевым морем приведены на рис. 1 (цв. вкладка). Для сопоставления на этом же рисунке показаны их вертикальные профили, измеренные над прибрежной территорией, при вылете из аэропорта Архангельска.

Тропосферный озон является четвертым из парниковых газов по величине вклада в общий радиационный форсинг [26]. Предыдущие наши исследования показали, что в арктических районах его образование в нижней атмосфере незначительно [27, 28]. Проведенный эксперимент подтверждает этот вывод (рис. 1, а). Видно, что концентрация O₃ в приводном и пограничном слоях атмосферы (ПСА) резко уменьшается над всеми участками Баренцева моря по сравнению с вышележащими слоями тропосферы. В средней тропосфере его содержание составляет ≈ 50 млрд⁻¹.

Поскольку O₃ относится к малорастворимым газам, в отличие от CO₂ [29], то уменьшение концентрации O₃ объясняется не поглощением его океаном, а отсутствием его фотохимического образования. В этих районах основным источником поступления O₃ в тропосферу является стратосфера [30]. Такие низкие значения, возможно, связаны с эффектом истощения озона за счет химического стока при взаимодействии с бромом, содержащимся в морском аэрозоле [31].

Концентрация монооксида углерода (рис. 1, б) изменялась над акваторией Баренцева моря в пределах 60–120 млрд⁻¹ и имела близкое к нейтральному вертикальное распределение. Можно отметить небольшое ее увеличение в ПСА над прибрежными районами. Такой ход содержания CO по высоте говорит об отсутствии в этом районе источников и стоков этого газа. Полученные значения ниже, чем над континентальными районами [32, 33], и приближаются к величинам, характерным для удаленных районов Антарктиды [34]. Монооксид углерода, также как NO, NO₂, NO_x и SO₂, может иметь как природное, так и антропогенное происхождение [35]. Исследования последних лет показывают, что концентрации таких соединений резко снизились в урбанизированных регионах, не говоря уже о фоновых [36, 37].

Содержание оксида азота (рис. 1, в) над Баренцевым морем без учета прибрежной территории колебалось в пределах 0,01–0,10 млрд⁻¹. В районе Архангельска его концентрация повышалась за счет

Таблица 1

Технические характеристики газоанализаторов

Модель	Газ	Диапазон концентраций, млн ⁻¹	Инструментальная погрешность	Постоянная времени, с
49C	O ₃	0...200	$\pm 0,001$ млн ⁻¹	1
48C	CO	0...10000	$< \pm 1\%$	4
42i-TL	NO/NO ₂ /NO _x	0...0,5	$\pm 0,0004$ млн ⁻¹	10
43i-TLE	SO ₂	0...20	$\pm 0,0002$ млн ⁻¹	10

антропогенной деятельности до $0,24 \text{ млрд}^{-1}$ в приземном слое и до $0,13 \text{ млрд}^{-1}$ в пограничном. Ход вертикального распределения NO и его концентрации близки к величинам, приведенным в [38, 39] для зарубежных районов Арктики.

Несколько иное вертикальное распределение над Баренцевым морем имеет диоксид азота (рис. 1, з). Видно, что для его концентрации, несмотря на флуктуации, наблюдается тенденция уменьшения с высотой. На отдельных профилях (профили 1, 4, 5) видны слои с повышенным содержанием NO_2 , что, скорее всего, обусловлено переносом из урбанизированных районов. В день измерений перенос воздуха имел юго-западное направление [24, 25]. Концентрация NO_2 над морем находилась в пределах $0,2\text{--}1,0 \text{ млрд}^{-1}$ — это несколько больше, чем в [40], и меньше, чем в [41].

Учитывая достаточно низкие концентрации оксидов азота над Баренцевым и всеми анализируемым морями, целесообразно данные об этих газах рассматривать как оценочные, не акцентируя внимание на абсолютных значениях.

Концентрация диоксида серы над Баренцевым морем находилась в диапазоне $0,06\text{--}0,8 \text{ млрд}^{-1}$ (рис. 1, д) и была значительно ниже, чем над прибрежными территориями (над Архангельском она достигала $2,7 \text{ млрд}^{-1}$). Это свидетельствует о том, что на суше имелись источники SO_2 и, по-видимому, антропогенные. Данные хорошо совпадают с результатами измерений вертикального распределения диоксида серы над Тихим океаном, приведенными в [42], и значительно ниже полученных над континентом в Китае [43].

На рис. 1, е показаны профили вертикального распределения NO_x над Баренцевым морем. Поскольку NO_x — это сумма NO и NO_2 и, как видно из рис. 1, в, з, в рассматриваемом случае NO_2 почти на порядок больше, чем NO, то этот график повторяет в основных чертах рис. 1, з.

2.2. Карское море и прибрежные территории

Зондирование атмосферы над акваторией Карского моря (рис. 2, цв. вкладка) было выполнено 6.09.2020 г. [23, 24]. Согласно рис. 2, а концентрация озона в приземном и пограничном слоях резко уменьшается над всеми участками Карского моря по сравнению с вышележащими слоями тропосферы. В средней тропосфере его содержание находится в диапазоне $45\text{--}50 \text{ млрд}^{-1}$, который несколько уже, чем над Баренцевым морем. Можно также отметить слабую тенденцию увеличения концентрации O_3 выше ПСА.

Концентрация CO (рис. 2, б) изменялась над акваторией Карского моря в пределах $60\text{--}130 \text{ млрд}^{-1}$ и уменьшалась выше верхней границы ПСА. Можно также отметить значительное ее увеличение на высоте около 1000 м на первом измеренном над

акваторией профиле (13:30). Такой ход содержания CO по высоте говорит об отсутствии в данном районе источников и стоков этого газа и о поступлении его с материка. В пользу этого также свидетельствуют и более высокие концентрации CO над Карским морем по сравнению с Баренцевым.

Содержание NO (рис. 2, в) над Карским морем также без учета прибрежной территории колебалось в пределах $0,02\text{--}0,10 \text{ млрд}^{-1}$. В районе Нарьян-Мара его концентрация повышалась за счет антропогенной деятельности до $0,13 \text{ млрд}^{-1}$ в приземном слое и до $0,12 \text{ млрд}^{-1}$ — в пограничном. Вертикальное распределение NO близко к нейтральному со слабой тенденцией увеличения с высотой. Это указывает на отсутствие в акватории Карского моря источников этого газа, а рост его содержания с высотой — на перенос из сопредельных регионов.

Вертикальное распределение NO_2 над Карским морем схоже с полученным над Баренцевым (рис. 2, г). Наблюдается тенденция уменьшения его концентрации с высотой, несмотря на флуктуации по вертикали. На первом профиле, измеренном над акваторией (13:30), так же как и для CO (рис. 2, б), имеется слой с повышенным содержанием NO_2 вблизи уровня 1000 м, что, скорее всего, отражает его перенос из урбанизированных районов. Концентрация NO_2 над Карским морем варьировалась в пределах $0,2\text{--}0,9 \text{ млрд}^{-1}$. Это несколько меньше, чем над Баренцевым морем.

Концентрация SO_2 над Карским морем находилась в диапазоне $0,25\text{--}0,66 \text{ млрд}^{-1}$ (рис. 2, д) и была сопоставима со значением в Нарьян-Маре ($0,64 \text{ млрд}^{-1}$). Это свидетельствует о том, что на суше и над морем имелись слабые источники SO_2 .

На рис. 2, е показаны профили вертикального распределения NO_x над Карским морем. Поскольку концентрации NO_2 почти на порядок больше, чем NO, то этот график повторяет в основных чертах рис. 2, г.

Чтобы понять, чем был обусловлен максимум концентраций CO и NO_2 на высоте вблизи 1000 м, были построены обратные траектории движения воздушных масс для трех высот над Нарьян-Маром: 200, 1200 и 4000 м н.у.м. (рис. 3, цв. вкладка). Видно, что на большинстве уровней воздух поступал из одних и тех же районов. Только одна траектория для воздушной массы с максимальной концентрацией газов отличалась от остальных и указывала на ее формирования в Западной Европе. Учитывая большое количество промышленных предприятий, можно полагать, что рассматриваемый максимум концентрации образовался вследствие дальнего переноса примесей.

2.3. Море Лаптевых и прибрежные территории

Измерения состава воздуха над морем Лаптевых проводились 9.09.2020 г. (рис. 4, цв. вкладка).

Над акваторией моря Лаптевых концентрация O_3 в приводном слое воздуха находилась в пределах $20\text{--}30$ млрд $^{-1}$ и вначале быстро, а затем медленнее нарастала с высотой (рис. 4, а). Несмотря на большую площадь, охваченную зондированием, содержание O_3 над разными районами изменялось не сильно.

Концентрация CO (рис. 4, б) над акваторией моря Лаптевых находилась в пределах $80\text{--}120$ млрд $^{-1}$ и почти не варьировалась по высоте. На двух профилях, измеренных в начале полета над прибрежными районами (03:09) и в конце полета (05:58), можно выделить два максимума концентрации CO . Нейтральный ход в свободной тропосфере и наличие максимумов в пограничном слое атмосферы, возможно, связаны с переносом воздуха с континента.

Концентрация NO колебалась в пределах $0,005\text{--}0,10$ млрд $^{-1}$ (рис. 4, в). В районе Тикси она повышалась за счет локальной антропогенной деятельности до $0,12$ млрд $^{-1}$ в приземном слое. Вертикальный ход концентрации NO близок к нейтральному. Это указывает на отсутствие на акватории источников этого газа и переноса его из сопредельных регионов.

Вертикальное распределение NO_2 над морем Лаптевых не похоже на распределения, полученные над Баренцевым и Карским морями (рис. 2, з и 4, з). Видно, что высотный ход его концентрации почти нейтральный. На первом профиле, измеренном над прибрежными районами (03:09), так же как и для CO (рис. 4, б), имеется слой с повышенным содержанием NO_2 вблизи поверхности воды. Концентрация NO_2 над морем Лаптевых варьировалась в пределах $0,1\text{--}0,4$ млрд $^{-1}$. Это соизмеримо с динамикой NO_2 над Баренцевым и Карским морями.

Концентрация SO_2 над морем Лаптевых находилась в диапазоне $0,2\text{--}0,5$ млрд $^{-1}$ (рис. 4, д). Так же, как и на профилях CO и NO_2 , над прибрежными территориями она увеличивалась (до $1,0$ млрд $^{-1}$). Это свидетельствует о том, что на суше имелись слабые источники SO_2 .

На рис. 4, е показаны профили вертикального распределения NO_x над морем Лаптевых. Поскольку NO_2 почти на порядок больше, чем NO , то этот график повторяет в основных чертах рис. 4, з.

2.4. Восточно-Сибирское море

Зондирование акваторий Восточно-Сибирского и Чукотского морей осуществлялось из аэропорта Анадырь, который расположен достаточно далеко от Северного Ледовитого океана. Поэтому сопоставление данных, полученных над акваториями морей и территорией аэропорта, представляется не совсем корректным. Само исследование проводилось $15\text{--}16.09.2020$ г., учитывая 12-часовую разницу со временем Гринвича. Данные измерений представлены на рис. 5 (цв. вкладка).

Распределение озона над Восточно-Сибирским морем несколько отличается от профилей, измеренных над морями, расположенными западнее (рис. 5, а). Уменьшилась разница концентраций O_3 между приводным слоем и средней тропосферой; содержание озона в средней тропосфере снизилось до 50 млрд $^{-1}$; в нижней тропосфере различия между концентрациями O_3 в разных районах акватории стали меньше.

Концентрация CO в приводном слое воздуха изменялась над разными районами акватории в диапазоне $85\text{--}120$ млрд $^{-1}$, в средней тропосфере — от 60 до 100 млрд $^{-1}$. На рис. 5, б хорошо прослеживается тенденция изменения содержания CO с высотой.

Над Восточно-Сибирским морем произошло и снижение концентрации NO (рис. 5, в) по сравнению с западными морями. Вертикальное распределение этого газа демонстрирует нейтральный ход, а содержание от приводного слоя до верхней тропосферы находится в диапазоне $0,012\text{--}0,080$ млрд $^{-1}$.

Близким к нейтральному оказалось и вертикальное распределение диоксидов азота и серы над Восточно-Сибирским морем (рис. 5, з и д). Концентрация NO_2 лежит в пределах $0,1\text{--}0,38$ млрд $^{-1}$, SO_2 — $0,3\text{--}0,5$ млрд $^{-1}$.

Вертикальное распределение NO_x повторяет профили NO_2 .

2.5. Чукотское море

Самолетное зондирование состава воздуха над Чукотским морем проводилось $15.09.2020$ г. Условия измерений были ранее описаны в [23]. Результаты измерений приведены на рис. 6 (цв. вкладка). Здесь, так же как и на рис. 5, не показан вертикальный профиль над прибрежными районами из-за удаленности от основного места зондирования.

Над Чукотским морем профиль O_3 кардинально изменился (рис. 6, а). Здесь совсем не проявляется пограничный слой, который по ранее проведенному анализу был очень низким [24, 25]. Концентрация озона в приводном слое находилась в диапазоне $28\text{--}32$ млрд $^{-1}$ и почти равномерно возрастала до 60 млрд $^{-1}$ в верхней тропосфере. Такое распределение обусловлено сменой направления переноса воздушных масс на акваторию Чукотского моря. В [24, 25] было показано, что на акватории западных морей воздух поступал с азиатской части континента, в район же зондирования над Чукотским морем — с североамериканского.

По-видимому, смена направления основного переноса стала причиной аномального распределения CO над Чукотским морем (рис. 6, б). Над тремя районами акватории она уменьшалась выше пограничного слоя, а затем возрастала в средней тропосфере; над четвертым достигала значения 118 млрд $^{-1}$ в приводном слое и снижалась до 74 млрд $^{-1}$ в верхней тропосфере.

Оксид азота имел нейтральный ход по высоте, а его концентрации снизились даже по сравнению с Восточно-Сибирским морем и находились в диапазоне 0,025–0,08 млрд⁻¹.

Со сменой циркуляции воздуха в регионе на этом этапе зондирования, вероятно, связано изменение профилей NO₂ и NO_x (рис. 6, *г* и *е*). От приводного слоя до средней тропосферы наблюдалось слабое уменьшение концентрации этих газов, а затем начинался значительный ее рост.

Концентрация диоксида серы почти не изменялась с высотой и находилась в диапазоне 0,25–0,52 млрд⁻¹.

2.6. Берингово море и прибрежные территории

Зондирование атмосферы над акваторией Берингова моря выполнялось 16.09.2020 г. сразу после полета над Восточно-Сибирским морем (рис. 7, цв. вкладка). Целью этой дополнительной части эксперимента была проверка особенностей распределения концентраций углекислого газа и метана, обнаруженных над Чукотским и Восточно-Сибирским морями [24, 25].

Профили O₃, полученные над сушей (03:38 на рис. 7, *а*) и вблизи побережья (04:48 на рис. 7, *а*), значительно отличаются, особенно в средней и верхней тропосфере. Они демонстрируют поступление озона из вышележащих слоев атмосферы. Два других профиля (04:24 и 05:21) имеют нейтральных высотный ход. На первых двух профилях концентрация растет с высотой и достигает 70 млрд⁻¹; на вторых — колеблется в диапазоне 20–25 млрд⁻¹.

Содержание CO в нижней тропосфере по величине было близко к тому, которое наблюдалось над Восточно-Сибирским и Чукотским морями (рис. 7, *б*), и понижалось с высотой.

Концентрация NO при нейтральном вертикальном распределении была несколько больше, чем над Восточно-Сибирским и Чукотским морями (рис. 7, *в*).

Концентрации NO₂ и NO_x значительно различались над разными частями акватории Берингова моря (рис. 7, *г* и *е*). Над побережьем они находилась в диапазоне 0,3–0,5 млрд⁻¹, а над морскими районами понижались до 0,012–0,28 млрд⁻¹.

Диоксид серы имел нейтральный ход с высотой, а его концентрация изменялась от 0,32 до 0,53 млрд⁻¹.

Такие различия в профилях газов над арктическими морями и Беринговым морем, по-видимому, объясняются особенностями циркуляции воздуха в период эксперимента.

Если обратиться к рис. 8 (цв. вкладка), то легко увидеть, что воздух в районы зондирования переносился с территории Аляски или вдоль ее побережья сначала в Арктику, а затем — в район работ.

3. Горизонтальные неоднородности в распределении малых газовых составляющих

Анализ горизонтальных неоднородностей в распределении малых газовых составляющих атмосферы над акваториями арктических морей был выполнен на основе данных полетов, выполнявшихся на высоте 200 м. Регистрировались концентрации малых газовых составляющих с частотой 1 или 0,1 Гц. Участки, на которых были проведены измерения, представлены на рис. 9 (цв. вкладка). Можно предположить, что на этой высоте проявляются неоднородности расположения источников или стока газов, если они есть на поверхности океана.

3.1. Озон

В период эксперимента на борту самолета-лаборатории работали два однотипных озонметра, которые регистрировали концентрацию O₃ с частотой 1 и 0,4 Гц. На рис. 10 (цв. вкладка) представлены результаты измерений O₃ с частотой 1 Гц. Видно, что только над Восточно-Сибирским морем распределение концентрации озона над акваторией было довольно однородным. Над остальными морями она значительно изменялась при переходе из одного района зондирования в другой. Наибольшая изменчивость концентрации O₃ была зафиксирована над морем Лаптевых (перепад концентрации 15 млрд⁻¹), наименьшая — над Восточно-Сибирским морем (перепад всего 5 млрд⁻¹).

Учитывая, что озон не выбрасывается каким-либо источником, а образуется непосредственно в тропосфере или переносится из стратосферы [44], такую изменчивость можно объяснить только неоднородностью переноса с материка.

3.2. Оксид углерода

Этот газ также регистрировался с частотой 1 Гц. Характерная особенность газоанализатора: он периодически входил в режим калибровки (рис. 11, цв. вкладка). Видно, что различия в концентрациях CO над разными участками акваторий морей были не столь велики, как для O₃. Наибольшая разница (70 млрд⁻¹) была также над морем Лаптевых; наименьшая — 24 млрд⁻¹ над Чукотским морем. Над остальными морями различия были в диапазоне 40–50 млрд⁻¹.

3.3. Оксид азота

Оксид азота регистрировался с частотой 0,25 Гц. В результате период зафиксированных флуктуаций для NO значительно меньше, чем для других газов,

измерявшихся с частотой 1 Гц (рис. 12, цв. вкладка). Показано, что на горизонтальных участках полета на высоте 200 м концентрация оксида азота над всеми морями была крайне низкой, в диапазоне 0,01–0,12 млрд⁻¹. Наибольшие значения фиксировались над Баренцевым, Карским и морем Лаптевых, наименьшие – над Чукотским и Беринговым морями.

3.4. Диоксид азота

Наибольшие значения NO₂ наблюдались над Баренцевым морем, затем над Карским (рис. 13, цв. вкладка). Причем над Баренцевым морем хорошо заметен большой горизонтальный градиент концентрации по акватории. По мере смещения на восток концентрация этого газа уменьшалась и приближалась к порогу определения 0,4 млрд⁻¹.

3.5. Диоксид серы

Распределение диоксида серы (рис. 14, цв. вкладка) над акваториями арктических морей очень похоже на динамику диоксида азота. Различия концентрации SO₂ между разными морями меньше, чем для NO₂. Можно также отметить меньшее различие содержания SO₂ между отдельными морями. Таким образом, для SO₂ не полностью выполняется закономерность уменьшения концентрации с запада на восток.

4. Обсуждение результатов

Проведем сравнение средних концентраций малых газовых компонентов воздуха над рассматриваемыми морями. Данные табл. 2 показывают, что почти у всех приведенных газов нет однозначной тенденции изменения концентрации с запада на восток, которая четко проявилась для CO₂ [25].

Наименьшие концентрации O₃ зафиксированы в приводном слое (200–600 м) над Баренцевым, Карским и Беринговым морями. Они были выше и почти одинаковыми над морем Лаптевых, Вос-

точно-Сибирским и Чукотским. Поскольку перенос воздуха на Баренцево и Карское моря был с суши, то, возможно, это является следствием стока части молекул озона в результате реакций с другими соединениями, поступающими с материка.

Нет также однозначной тенденции в изменении содержания CO. Небольшое повышение его значений можно отметить над Карским, Восточно-Сибирским и морем Лаптевых, наименьшее значение – над Баренцевым морем. Очевидно, что это связано с поступлением воздуха с континента в районы акватории морей.

Содержание NO в Российском секторе Арктики было крайне низким и находилось в диапазоне 0,03–0,07 млрд⁻¹. Это единственный газ, концентрация которого уменьшалась с запада на восток, если не учитывать Берингово море. Наибольшее значение наблюдалось над Баренцевым морем, наименьшее – над Чукотским.

Концентрация NO₂ (хотя и небольшая в арктическом регионе, почти на порядок выше, чем у NO) также уменьшалась с запада на восток, за исключением моря Лаптевых. Почему содержание NO₂ оказалось самым низким над морем Лаптевых, пока сложно предположить, хотя концентрация его предшественника NO соизмерима с соседними морями. Различия в концентрации NO и NO₂ определили и общую динамику NO_x, которая повторяет ход NO₂.

Содержание SO₂ над западными морями соизмеримо с NO_x и даже несколько больше, чем над восточными. Вероятно, на территории восточных районов имеются слабые источники этого газа, повышающие его фоновые концентрации. Возможно, это следствие работы предприятия «Норникель», использующего уголь с большим содержанием серы.

Сопоставление данных с аналогичными для зарубежного сектора Арктики показывает, что полученные нами концентрации O₃ и CO соизмеримы с результатами [45, 46]. Такие же низкие значения оксидов азота фиксировались в [39, 40]. Исследования вертикального распределения концентрации SO₂ в последние годы не проводилось.

Таблица 2

Средние концентрации малых газовых компонентов (млрд⁻¹)

Газ	Море					
	Баренцево	Карское	Лаптевых	Восточно-Сибирское	Чукотское	Берингово
O ₃	19,6 ± 3,10	16,1 ± 2,60	23,3 ± 4,20	24,1 ± 2,10	24,3 ± 3,90	19,5 ± 3,40
CO	88,7 ± 14,8	107,8 ± 15,2	107,6 ± 18,8	105,4 ± 14,7	98,2 ± 12,9	104,4 ± 17,0
NO	0,07 ± 0,03	0,05 ± 0,02	0,05 ± 0,02	0,05 ± 0,02	0,03 ± 0,01	0,06 ± 0,02
NO	0,62 ± 0,21	0,37 ± 0,06	0,14 ± 0,03	0,21 ± 0,03	0,21 ± 0,03	0,16 ± 0,03
NO _x	0,69 ± 0,23	0,42 ± 0,05	0,19 ± 0,04	0,26 ± 0,04	0,24 ± 0,03	0,22 ± 0,03
SO ₂	0,53 ± 0,14	0,40 ± 0,08	0,36 ± 0,07	0,41 ± 0,07	0,38 ± 0,07	0,44 ± 0,07

Заключение

Выполненный за достаточно короткое время комплексный эксперимент по зондированию атмосферы позволил сопоставить концентрации малых газовых компонентов воздуха над всеми морями Российского сектора Арктики и Беринговым в Тихом океане. Оказалось, что в этот период их содержание, в отличие от метана и углекислого газа, было крайне низким.

Вертикальное распределение озона характеризовалось ростом концентрации с высотой, что говорит о слабости фотохимических процессов и преобладании поступления озона из стратосферы. Для остальных газов наблюдалось либо уменьшение их содержания с высотой, либо его однородное распределение по высоте. Это свидетельствует об отсутствии источников этих газов в регионе или об их малой мощности.

Для диоксидов азота и серы можно обнаружить тенденцию к уменьшению концентраций с запада на восток.

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

Важно также подчеркнуть, что в период эксперимента концентрации всех измеренных газов были очень низкими, характерными для удаленных фоновых районов.

Финансирование. Зондирование атмосферы выполнено на УНУ «самолет-лаборатория Ту-134 „Оптик“», созданной в рамках госзадания ИОА СО РАН. Обработка данных и анализ результатов проведены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (соглашение № 075-15-2021-934) в рамках проекта «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“».

Список литературы

1. IPCC, 2021: Summary for policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: 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., Zwiern F.W., Gillett N.P. Attribution of Arctic temperature change to greenhouse-gas and aerosol influences // Nat. Clim. Change. 2015. N 2. P. 4.
4. Rantanen M., Karpechko A.Yu., Lipponen A., Nording K., Hyvarinen O., Ruosteenoja K., Vihma T., Laaksonen A. The Arctic has warmed nearly four times faster than the globe since 1979 // Commun. Earth Environ. 2022. V. 3. P. 168.
5. Thoman R., Druckenmiller M.L., Moon T. State of the climate in 2021 // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2022. V. 103, N 8. P. S257–S306.
6. Wendisch M., Brückner M., Crewell S., Ehrlich A., Notholt J., Lüpkes C., Macke A., Burrows J.P., Rinke A., Quaas J., Maturilli M., Schemann V., Shupe M.D., Akansu E.F., Barrientos-Velasco C., Bärfuß K., Blechschmidt A.-M., Block K., Bougoudis I., Bozem H., Böckmann C., Bracher A., Bresson H., Bretschneider L., Buschmann M., Chechin D.G., Chylik J., Dahlke S., Deneke H., Dethloff K., Donth T., Dorn W., Dupuy R., Ebell K., Egerer U., Engelmann R., Eppers O., Gerdes R., Gierens R., Gorodetskaya I.V., Gottschalk M., Griesche H., Gryanik V.M., Handorf D., Harm-Altstädter B., Hartmann J., Hartmann M., Heinold B., Herber A., Herrmann H., Heygster G., Höschel I., Hofmann Z., Hölemann J., Hünerbein A., Jaafariserajehlou S., Jäkel E., Jacobi C., Janout M., Jansen F., Jourdan O., Jurányi Z., Kalesse-Los H., Kanzow T., Käthner R., Kliesch L.L., Klingebiel M., Knudsen E.M., Kovács T., Körte W., Krampe D., Kretschmar J., Kreyling D., Kulla B., Kunkel D., Lampert A., Lauer M., Lelli L., von Lerber A., Linke O., Löhnert U., Lonardi M., Losa S.N., Losch M., Maahn M., Mech M., Mei L., Mertes S., Metzner E., Mewes D., Michaelis J., Mioche G., Moser M., Nakouidi K., Neggers R., Neuber R., Nomokonova T., Oelker J., Papakonstantinou-Presvelelou I., Pätzold F., Pefanis V., Pohl C., van Pinxteren M., Radovan A., Rhein M., Rex M., Richter A., Risse N., Ritter C., Rostosky P., Rozanov V.V., Ruiz Donoso E., Saavedra Garfias P.S., Salzmann M., Schacht J., Schäfer M., Schneider J., Schmierstein N., Seifert P., Seo S., Siebert H., Sopp M.A., Spreen G., Stachlewska I.S., Stapf J., Stratmann F., Tegen I., Viceto C., Voigt C., Vountas M., Walbröl A., Walter M., Wehner B., Wex H., Willmes S., Zanatta M., Zeppenfeld S. Atmospheric and surface processes, and feedback mechanisms determining Arctic amplification // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2023. V. 104, N 1. P. E208–E242.
7. Najafi M.R., Zwiern F.W., Gillett N.P. Attribution of Arctic temperature change to greenhouse-gas and aerosol influences // Nature Clim. Change. 2015. N 2. P. 4.
8. Sand M., Berntsen T.K., von Salzen K., Flanner M.G., Langner J., Victor D.G. Response of Arctic temperature to changes in emissions of short-lived climate forcers // Nat. Clim. Change. 2015. N 11. P. 4.
9. Nomura D., Granskog M.A., Fransson A., Chierici M., Silyakova A., Ohshima K.I., Cohen L., Delille B., Hudson S.R., Dieckmann G.S. CO₂ flux over young and snow-covered Arctic pack ice in winter and spring // Biogeosci. 2018. V. 15, N 11. P. 3331–3343.
10. Willis M.D., Leitch R.W., Abbatt J.P.D. Processes controlling the composition and abundance of Arctic aerosol // Rev. Geophys. 2018. V. 56, N 4. P. 621–671.
11. Arnold S.R., Law K.S., Brock C.A., Thomas J.L., Starkweather S.M., Salzen K., Stohl A., Sharma S., Lund M.T., Flanner M.G., Petäjä T., Tanimoto H., Gamble J., Dibb J.E., Melamed M., Johnson N., Fieder M., Tynkkynen V.-P., Baklanov A., Eckhardt S., Monks S.A., Browne J., Bozem H. Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade // ELEMENTA: Sci. Atmos. 2016. N 4. P. 16.
12. Law K.S., Stohl A., Quinn P.K., Brock C.A., Burkhardt J.F., Paris J.D., Ancellet G., Singh B., Roiger A., Schlager H. Arctic air pollution // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2014. V. 95, N 12. P. 1873–1895.
13. Roiger A., Thomas J.-L., Schlager H., Law K.S., Kim J., Schafner A., Weinzierl B., Dähler F., Krisch I., Marelle L., Minikin A., Raut J.-C., Reiter A., Rose M., Scheibe M., Stock P., Baumann R., Clerbaux C., George M., Onishi T., Flemming J. Quantifying emerging

- local anthropogenic emissions in the Arctic region // Bull. Am. Meteorol. Soc. 2015. V. 96, N 3. P. 441–460.
14. *Evangelidou N., Balkanski Y., Hao W.M., Petkov A., Silverstein R.P., Corley R., Nordgren B., Urbanski S.P., Eckhardt S., Stohl A., Tunved P., Crepinsek S., Jefferson A., Sharma S., Njgaard J.K., Skov H.* Wildfires in northern Eurasia affect the budget of black carbon in the Arctic – a 12-year retrospective synopsis (2002–2013) // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 12. P. 7587–7604.
 15. *Kulmala M., Nieminen T., Chellapermal R., Makkonen R., Back J., Kerminen V.-M.* Climate feedbacks linking the increasing atmospheric CO₂ concentration, BVOC emissions, aerosols and clouds in forest ecosystems / U. Niinemets, R.K. Monson (eds.). Biology, Controls and Model Tree Volatile Organic Compound Emissions. Dordrecht: Springer, 2010. P. 489–508.
 16. *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 Northeastern Siberia // Polar Sci. 2021. V. 28. P. 100644.
 17. *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 northeastern Siberia // Biogeosci. 2022. V. 19, N 13. P. 3151–3167.
 18. *Ивахов В.М., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Зинченко А.В., Лоскутова М.А., Макутас 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.
 19. *Нагурный А.П.* Анализ данных измерений концентрации диоксида углерода в приледном слое атмосферы на ледовой дрейфующей станции «Северный Полюс-35» (2007–2008 г.) // Метеорол. и гидрол. 2010. № 9. С. 55–61.
 20. *Пупко И.И., Пугач С.П., Семилетов И.П.* Динамика CO₂ на шельфе Восточно-Сибирского моря // Метеорол. и гидрол. 2010. № 9. С. 62–73.
 21. *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.
 22. *Клепиков А.В., Данилов А.И.* Полярная метеорология (результаты российских исследований в 2015–2018 г.) // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2021. Т. 57, № 3. С. 261–277.
 23. *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., Kotelnikov S.N., Kozlov A.S., Kozlov A.V., Law K., Mikhailchishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopko O.V., Olkin 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.
 24. *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.S., Рассказчикова Т.М., Парис Ж.-Д., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 1. Метан // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 2. С. 100–110; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Gurulev E.V., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Law K., Nédélec P., Rasskazchikova T.M., Paris J.-D., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Air Composition over the Russian Arctic: 1 – Methane // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 5. P. 470–489.
 25. *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.S., Рассказчикова Т.М., Парис Ж.-Д., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 2. Углекислый газ // Оптика атмосф. и океана. 2023. Т. 36, № 4. С. 280–288; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Gurulev E.V., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Law K., Nédélec P., Rasskazchikova T.M., Paris J.-D., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Air composition over the Russian Arctic: 2 – Carbon dioxide // Atmos. Ocean. Opt. 2023. V. 36, N 5. P. 490–500.
 26. *Rowlinson M.J., Rap A., Hamilton D.S., Pope R.J., Hantson S., Arnold S.R., Kaplan J.O., Arneeth A., Chipperfield M.P., Forster P.M., Nieradzik L.* Tropospheric ozone radiative forcing uncertainty due to pre-industrial fire and biogenic emissions // Atmos. Chem. Phys. 2020. V. 20, N 18. P. 10937–10951.
 27. *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., Парис Ж.-Д., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Крупномасштабные исследования газового и аэрозольного состава воздуха над Сибирским регионом // Оптика атмосф. и океана. 2014. Т. 27, № 3. С. 232–239.
 28. *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., Nédélec 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 атмосф. 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., Nédélec P., Paris J.-D., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic. // Atmos. Ocean. Opt. 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
 29. *Глинка Н.Л.* Общая химия. Л.: Химия, 1985. 702 с.
 30. *Антохин П.Н., Белан Б.Д.* Регулирование динамики тропосферного озона через стратосферу // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 10. С. 890–895.
 31. *Cao L., Li S., Gu Y., Luo Y.* A three-dimensional simulation and process analysis of tropospheric ozone depletion events (ODEs) during the springtime in the Arctic using CMAQ (Community Multiscale Air Quality Modeling System) // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23, N 5. P. 3363–3382.

32. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофанов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет ТОР-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853; Davydov D.K., Belan B.D., Antokhin P.N., Antokhina O.Yu., Antonovich V.V., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Akhlestin A.Yu., Belan S.B., Dudorova N.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Pestunov D.A., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadneva T.K., Tolmachev G.N., Fazliev A.Z., Fofonov A.V. Monitoring of atmospheric parameters: 25 years of the Tropospheric Ozone Research Station of the Institute of Atmospheric Optics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences // Atmos. Ocean. Opt. 2019. V. 32, N 2. P. 180–192.
33. Штабкин Ю.А., Моисеенко К.Б., Скороход А.И., Васильева А.В., Хайманн М. Источники и вариации тропосферного СО в Центральной Сибири: численные эксперименты и наблюдения на высотной мачте в ЗОТТО // Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана. 2016. Т. 52, № 1. С. 51–63.
34. Устинов В.П., Баранова Е.Л., Вишератин К.Н., Грачев М.И., Кальсин А.В. Вариации окиси углерода в атмосфере Антарктиды по данным наземных и спутниковых измерений // Исслед. Земли из космоса. 2019. № 2. С. 97–100.
35. Seinfeld J.H., Pandis S.N. Chemistry and Physics: From air Pollution to Climate Change. New Jersey: Wiley, 2006. 1190 p.
36. Lefohn A.S., Husar J.D., Husar R.B. Estimating historical anthropogenic global sulfur emission patterns for the period 1850–1990 // Atmos. Environ. 1999. V. 33, N 21. P. 3435–3444.
37. Galloway J.N., Winiwarter W., Leip A., Leach A.M., Bleeker A., Erisman J.W. Nitrogen footprints: Past, present and future // Environ. Res. Lett. 2014. V. 9. P. 115003. P. 11.
38. Olson J.R., Crawford J.H., Brune B., Mao J., Ren X., Fried A., Anderson B., Apel E., Beaver M., Blake D., Chen G., Crouse J., Dibb J., Diskin G., Hall S.R., Huey L.G., Knapp D., Richter D., Riemer D., Clair J.St., Ullmann K., Walega J., Weibring P., Weinheimer A., Wennberg P., Wisthaler A. An analysis of fast photochemistry over high northern latitudes during spring and summer using *in-situ* observations from ARCTAS and TOPSE // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 15. P. 6799–6825.
39. Ianniello A., Salzano R., Salvatori R., Esposito G., Spataro F., Montagnoli M., Mabilia R., Pasini A. Nitrogen oxides (NO_x) in the Arctic troposphere at Ny-Ålesund (Svalbard Islands): Effects of anthropogenic pollution sources // Atmosphere. 2021. V. 12, N 7. P. 901.
40. Shah V., Jacob D.J., Dang R., Lamsal L.N., Strode S.A., Steenrod S.D., Boersma K.F., Eastham S.D., Fritz T.M., Thompson Ch., Peischl J., Bourgeois I., Pollack I.B., Nault B.A., Cohen R.C., Campuzano-Jost P., Jimenez J.L., Andersen S.T., Carpenter L.J., Sherwen T., Evans M.J. Nitrogen oxides in the free troposphere: Implications for tropospheric oxidants and the interpretation of satellite NO₂ measurements // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23, N 2. P. 1227–1257.
41. Lamsal L.N., Janz S.J., Krotkov N.A., Pickering K.E., Spurr R.J.D., Kowalewski M.G., Loughner C.P., Crawford J.H., Swartz W.H., Herman J.R. High-resolution NO₂ observations from the Airborne Compact Atmospheric Mapper: Retrieval and validation // J. Geophys. Res.: Atmos. 2017. V. 122, N 3. P. 1953–1970.
42. Tu F.H., Thornton D.C., Bandy A.R., Carmichael G.R., Tang Y., Thornhill K.L., Sachse G.W., Blake D.R. Long-range transport of sulfur dioxide in the central Pacific // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. D15S08.
43. Can Li, Stehr J.W., Marufu L.T., Li Z., Dickerson R.R. Aircraft measurements of SO₂ and aerosols over north-eastern China: Vertical profiles and the influence of weather on air quality // Atmos. Environ. 2012. V. 62. P. 492–501.
44. Белан Б.Д., Складнева Т.К. Тропосферный озон: 4. Фотохимическое образование тропосферного озона: роль солнечной радиации // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 10. С. 858–868.
45. Whaley C.H., Law K.S., Hjorth J.L., Skov H., Arnold S.R., Langner J., Pervov J.B., Bergeron G., Bourgeois I., Christensen J.H., Chien R.-Y., Deushi M., Dong X., Effertz P., Faluvegi G., Flanner M., Fu J.S., Gauss M., Huey G., Im U., Kivi R., Marelle L., Onishi T., Oshima N., Petropavlovskikh I., Peischl J., Plummer D.A., Pozzoli L., Raut J.-C., Ryerson T., Skeie R., Solberg S., Thomas M.A., Thompson C., Tsigaridis K., Tsyro S., Turnock S.T., von Salzen K., Tarasick D.W. Arctic tropospheric ozone: Assessment of current knowledge and model performance // Atmos. Chem. Phys. 2023. V. 23, N 1. P. 637–661.
46. Dekhtyareva A., Hermanson M., Nikulina A., Hermansen O., Svendby T., Holmén K., Graversen R.G. Spring-time nitrogen oxides and tropospheric ozone in Svalbard: Results from the measurement station network // Atmos. Chem. Phys. 2022. V. 22, N 17. P. 11631–11656.

O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, G. Ancellet, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, 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 Arctic. 3 – Trace gases.**

Based on the results of a comprehensive experiment conducted in September 2020, the spatial distribution of the following trace gases over the seas of the Russian Arctic are analyzed: carbon monoxide (CO), ozone (O₃), nitrogen oxide and dioxide (NO and NO₂), and sulfur dioxide (SO₂). It is shown that the gas concentrations in the surface air layer over the seas (at a height of 200 m) vary in the range 18–36 ppb for O₃, 60–130 ppb for CO, 0.005–0.12 ppb for NO, 0.10–1.00 ppb for NO₂, and 0.06–0.80 ppb for SO₂. Over most seas, the distribution of the gases across the water area is heterogeneous, which most likely reflects differences in their uptake by the ocean and peculiarities of transport from the continent.

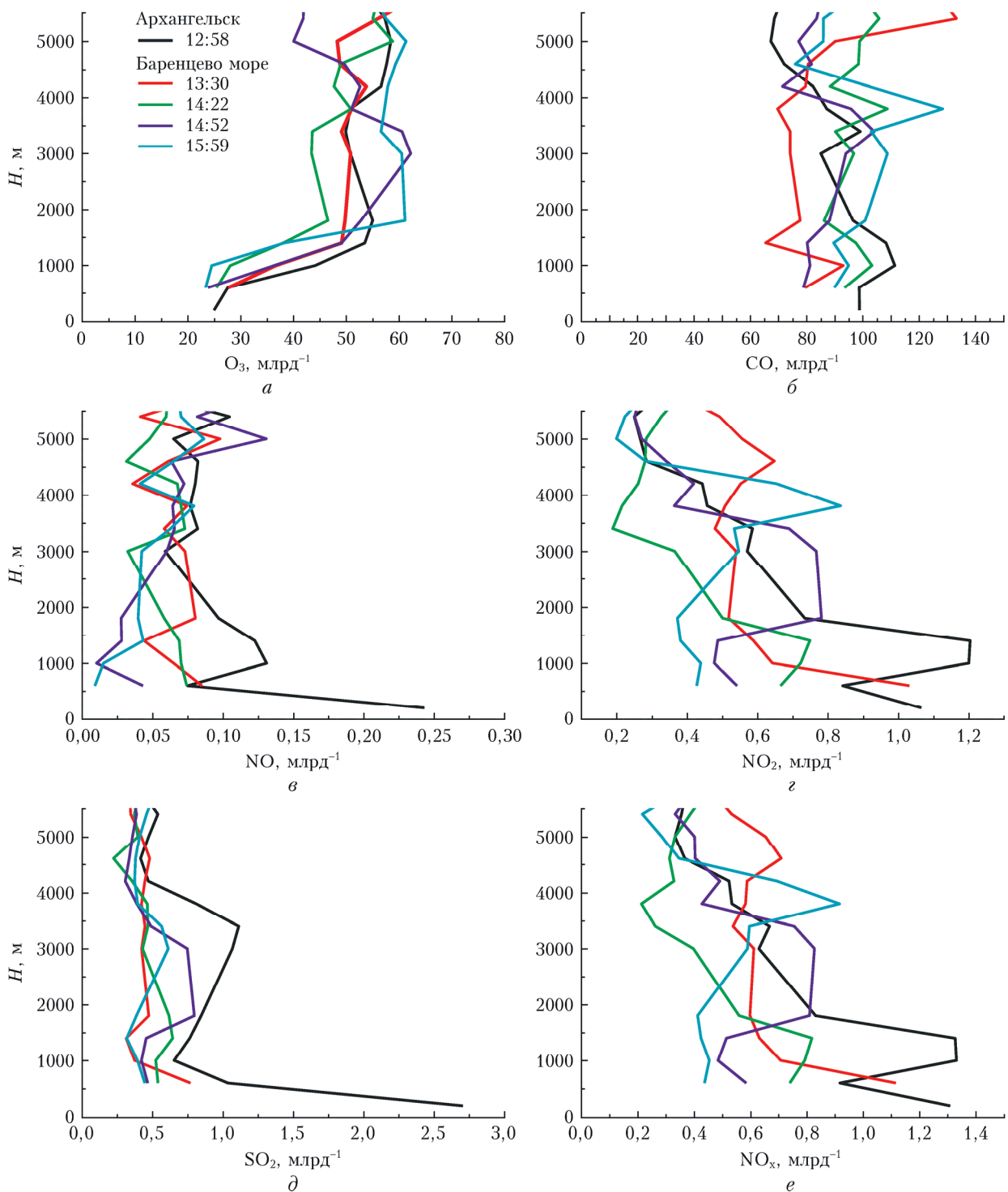


Рис. 1. Вертикальное распределение концентрации O_3 (*a*), CO (*б*), NO (*в*), NO_2 (*г*), SO_2 (*д*), NO_x (*е*) над Баренцевым морем 4.09.2020 г.

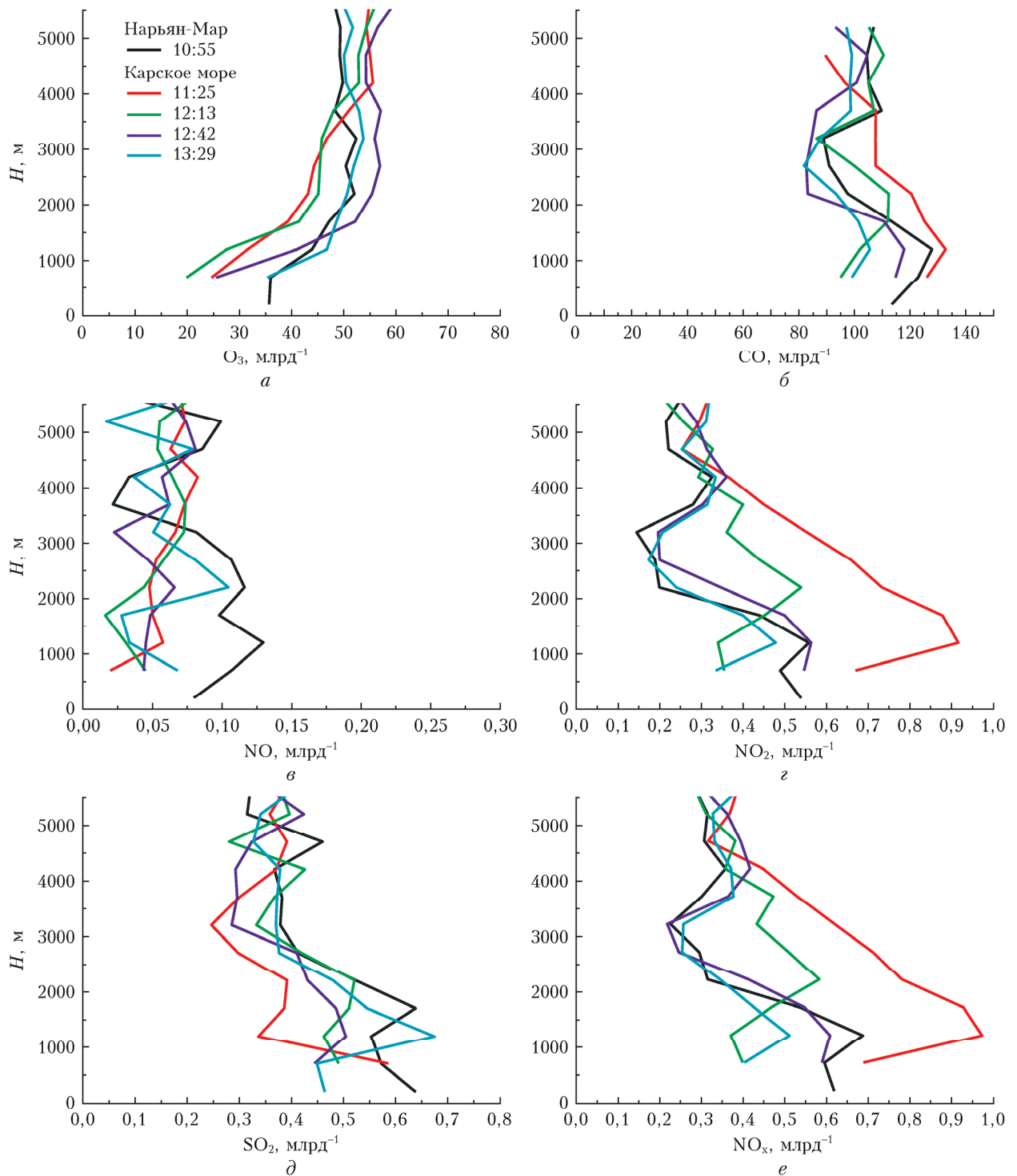


Рис. 2. То же, что на рис. 1, для Карского моря 6.09.2020 г.

NOAA HYSPLIT MODEL
 Backward trajectories ending at 1100 UTC 06 Sep 20
 GDAS Meteorological Data

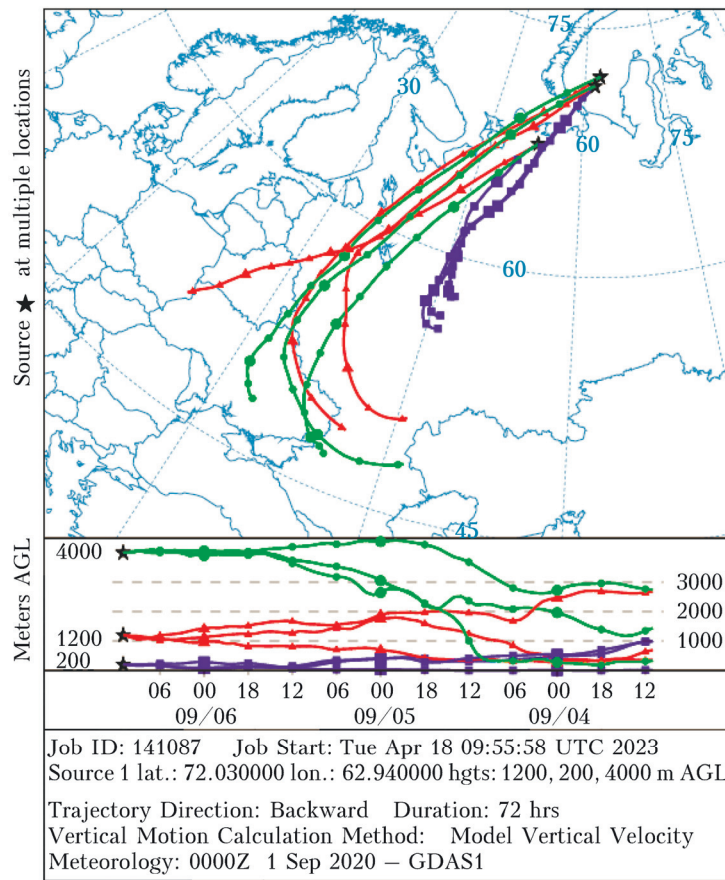


Рис. 3. Обратные траектории движения воздушных масс для акватории Карского моря и Нарьян-Мара 6.09.2020 г.

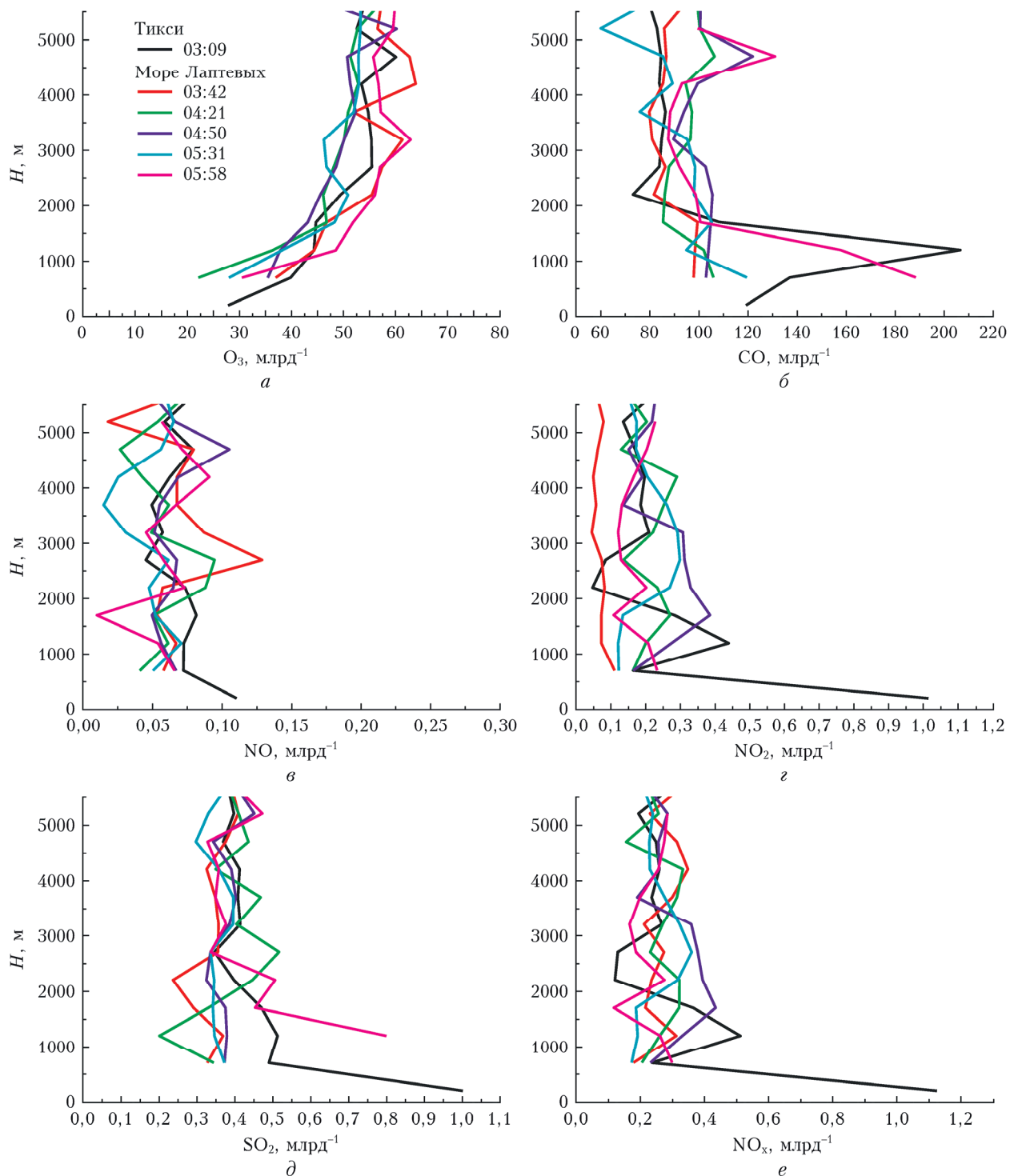


Рис. 4. То же, что на рис. 1, для моря Лаптевых 9.09.2020 г.

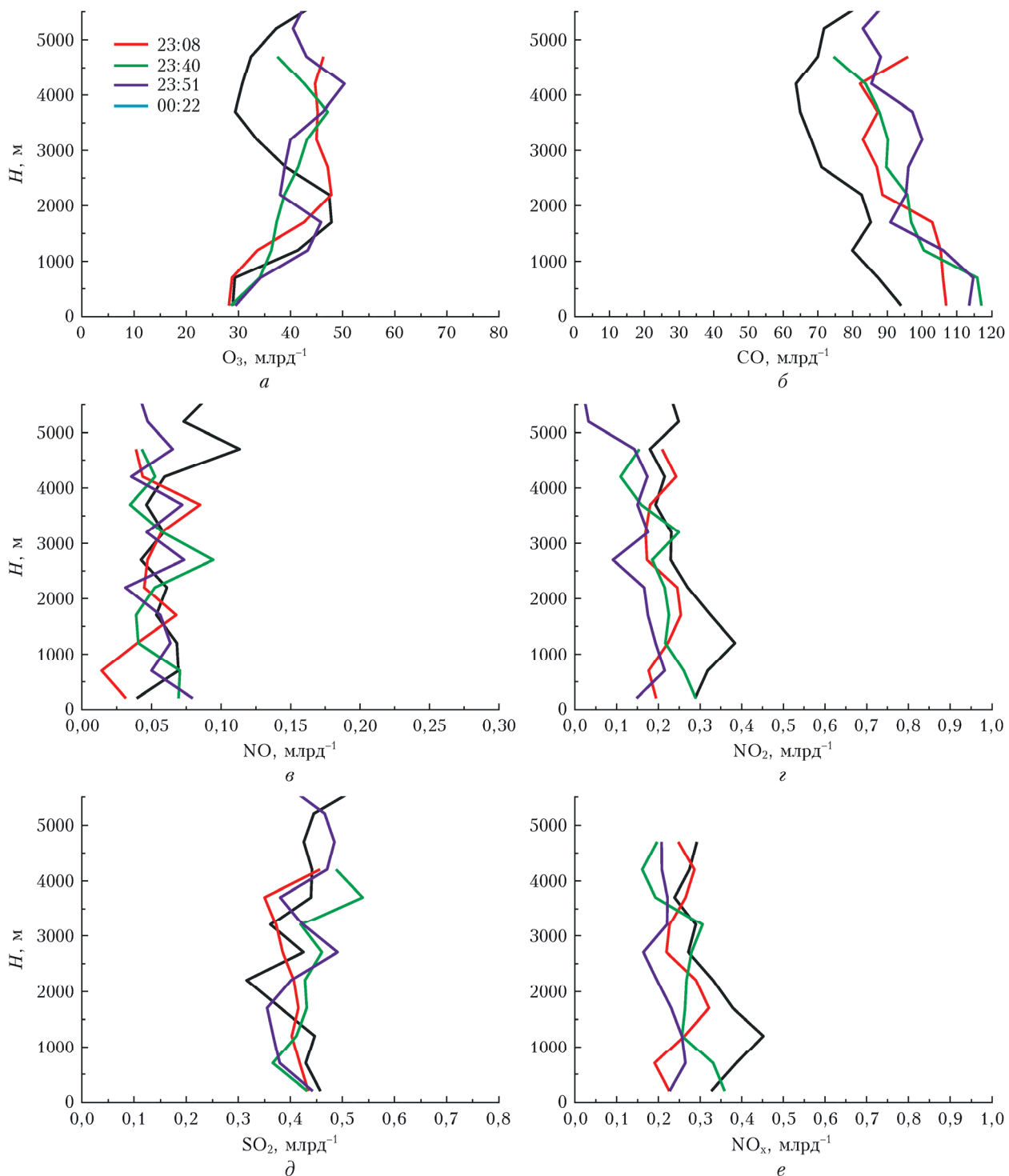


Рис. 5. То же, что на рис. 1, для Восточно-Сибирского моря 15–16.09.2020 г.

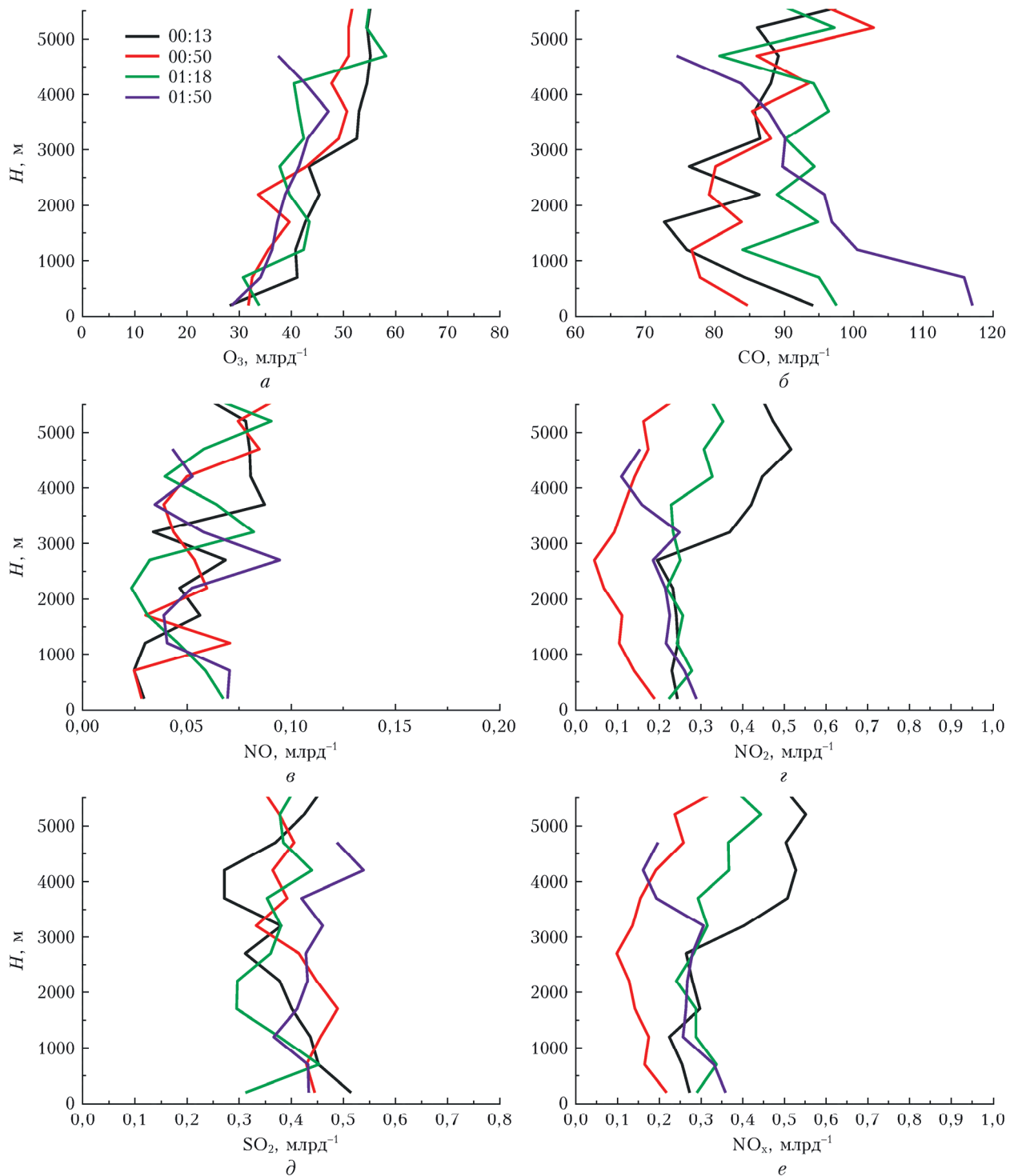


Рис. 6. То же, что на рис. 1, для Чукотского моря 15.09.2020 г.

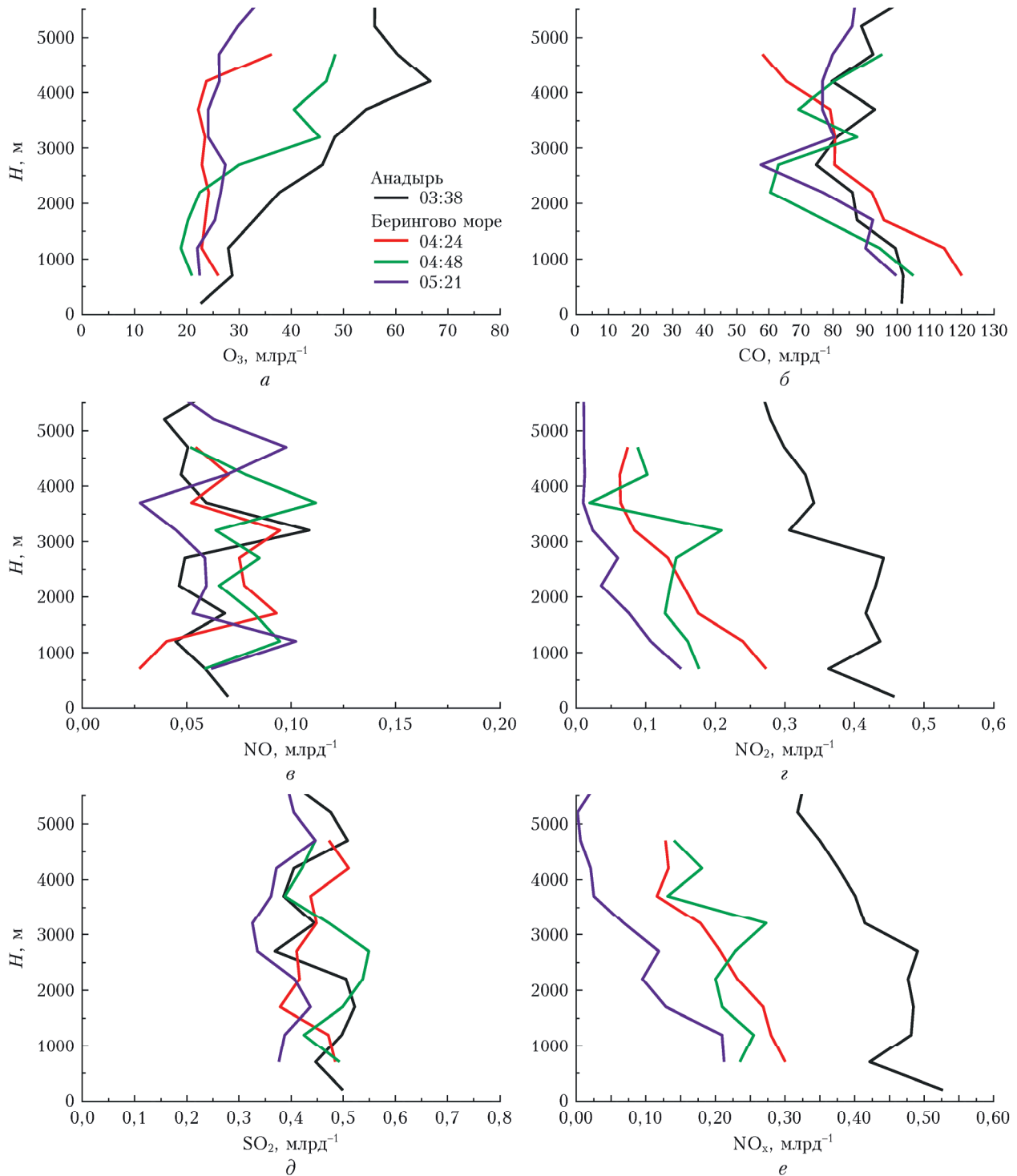


Рис. 7. То же, что на рис. 1, для Берингова моря 16.09.2020 г.

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

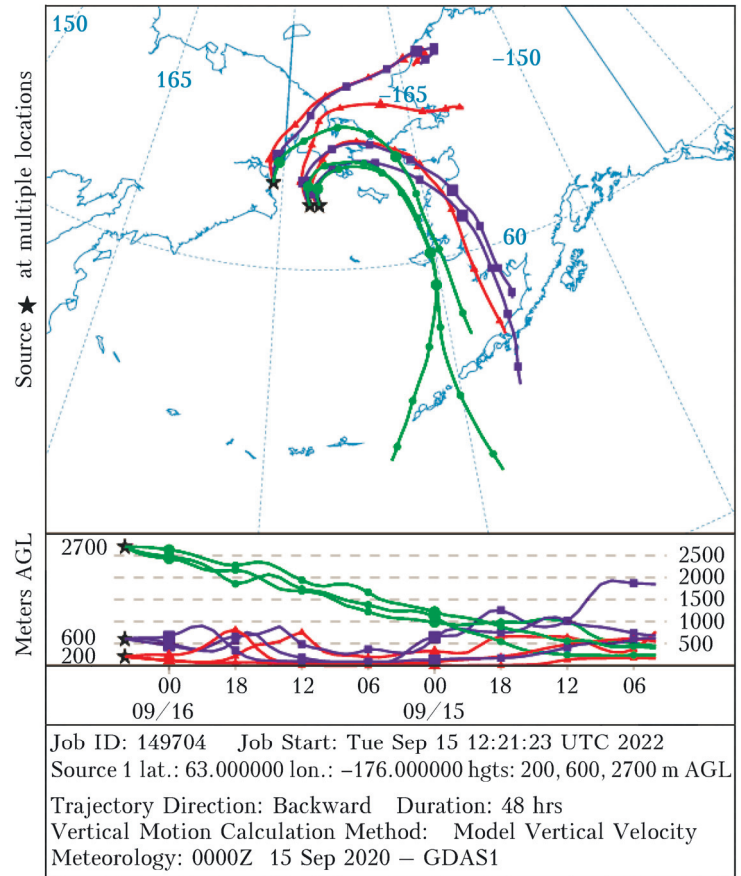


Рис. 8. Обратные траектории движения воздушных масс для акватории Берингова моря 16.09.2020 г.

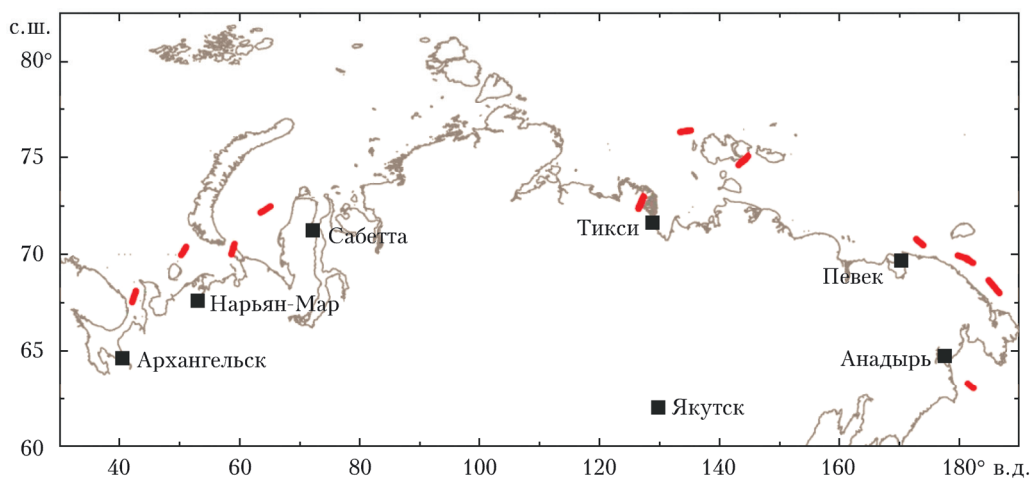


Рис. 9. Участки (красные линии) измерений концентраций газов над морями Российского сектора Арктики и Тихого океана на высоте 200 м

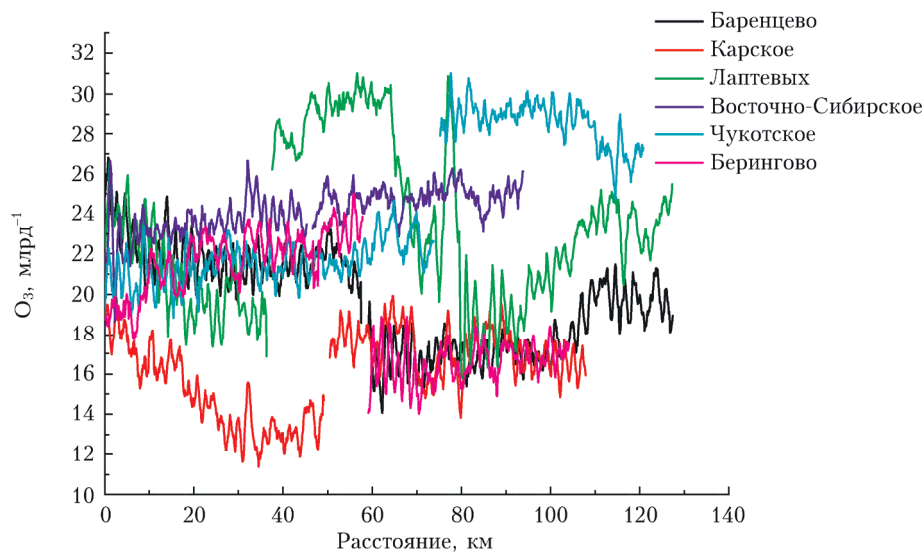


Рис. 10. Концентрация озона на высоте 200 м над морями Российского сектора Арктики и Тихого океана

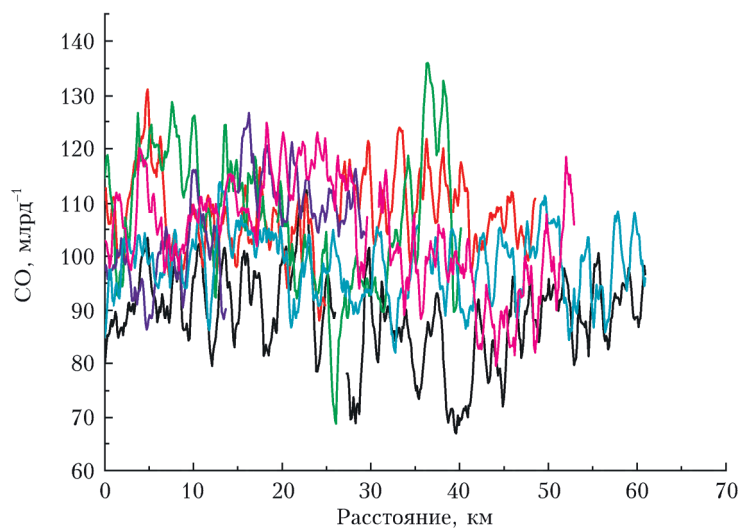


Рис. 11. То же, что на рис. 10, для оксида углерода

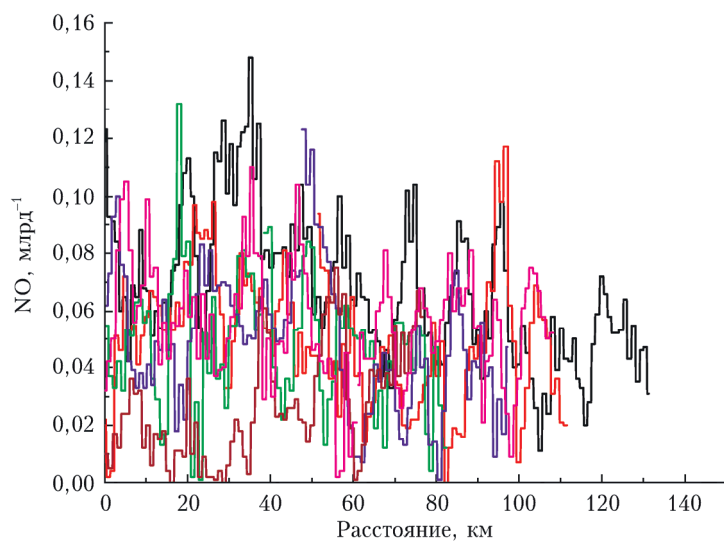


Рис. 12. То же, что на рис. 10, для оксида азота

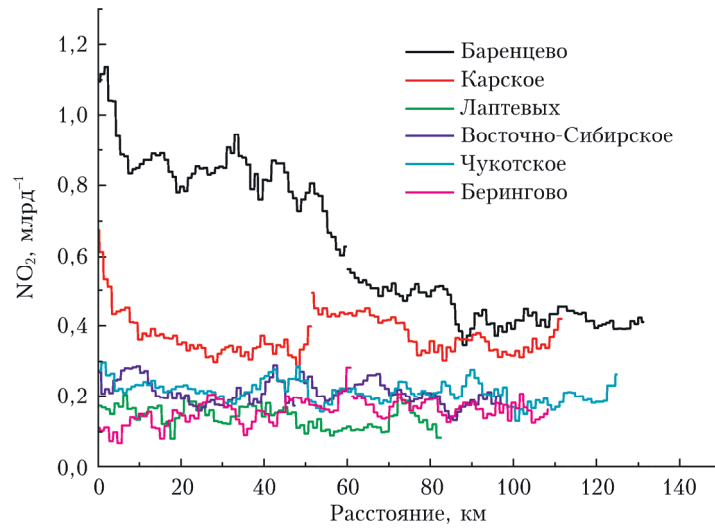


Рис. 13. То же, что на рис. 10, для диоксида азота

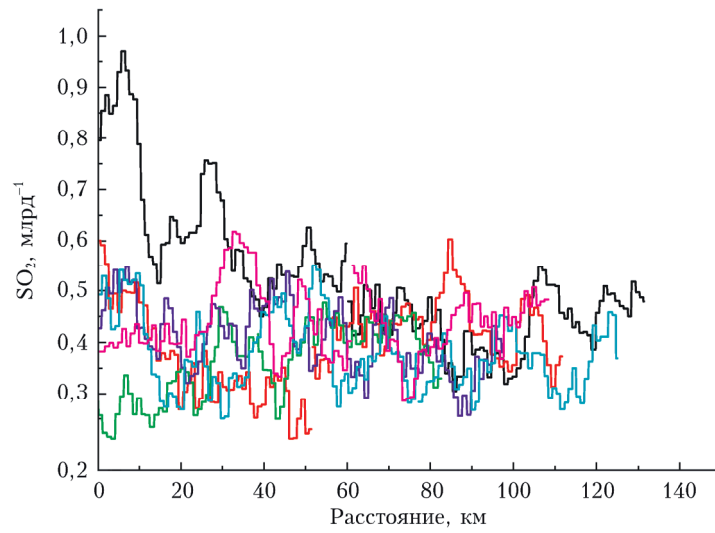


Рис. 14. То же, что на рис. 10, для диоксида серы