

УДК 535.23; 535.34

Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над Российским сектором Арктики

О.Ю. Антохина¹, П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹,
Б.Д. Белан¹, С.Б. Белан¹, Д.К. Давыдов¹, Г.А. Ивлев¹, А.В. Козлов¹,
P. Nédélec², J.-D. Paris³, Т.М. Рассказчикова¹, 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

²Лаборатория аэрологии
14, Avenue E. Belin, 31400, Toulouse, France

³Лаборатория исследования климата и окружающей среды,
Unite mixte CEA-CNRS, Bat. 709, CE L'Orme des Merisiers, 91191 GIF SUR YVETTE, France

Поступила в редакцию 29.06.2017 г.

Приводятся данные о вертикальном распределении газового и аэрозольного состава воздуха, измеренные на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» в октябре 2014 г. над Карским морем и прибрежными районами Российской Арктики. Выявлены особенности распределения по вертикали CO₂ и аэрозоля над Карским морем по сравнению с континентальными условиями. Для CH₄, CO и O₃ значительных отклонений от континентальных распределений не обнаружено.

Ключевые слова: Арктика, атмосфера, аэрозоль, воздух, вертикальное распределение, газы, континентальный, крупномасштабный, пространственный; Arctic, atmosphere, aerosol, air, vertical distribution, gases, continental, large-scale, spatial.

Введение

Арктический регион в настоящее время привлекает особое внимание в связи с более быстрым, по сравнению с другими районами земного шара, ростом температуры воздуха [1, 2]. Потепление уже называется на процессах жизнедеятельности в Ледовитом океане [3] и вызывает изменение состава воздуха над ним. Это изменение обусловлено не только повышением температуры [4–6], но и поступлением примесей извне [7–10].

Исследования состава воздуха в Арктическом регионе чаще всего ведутся в приземном слое воздуха вдоль побережья Ледовитого океана [11–19].

Полученные в таких работах данные позволяют судить о динамике аэрозольных и газовых примесей на прибрежных территориях, а также оценить мощности источников и стоков контролируемых примесей. При этом остается не ясным, как происходит обмен примесями между водной поверхностью все более освобождающегося ото льда океана и атмосферой. Нет сведений о вертикальном распределении примесей, что затрудняет моделирование будущих изменений климата.

Для получения недостающих данных в исследованиях вертикального распределения газовых и аэрозольных примесей над Арктическим регионом научное сообщество широко использует самолеты-лаборатории [7–9, 20–26]. Это обусловлено тем, что точность спутниковых данных недостаточна для потребностей моделирования [27, 28]. Однако процитированные выше исследования состава воздуха над районами Арктики не относятся к ее Российскому сектору.

В Российском секторе Арктики исследование состава воздуха выполнялось только в приземном (приводном) слое воздуха на дрейфующих станциях [29, 30] или с борта научно-исследовательских судов [31–33]. Опубликована одна работа, в которой исследовалось вертикальное распределение газового состава вдоль Российского побережья Арктики [34].

Для восполнения пробела в данных о вертикальном распределении газового и аэрозольного состава

* Ольга Юрьевна Антохина (arp@iao.ru); Павел Николаевич Антохин (arp@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова (arvi@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); 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); Philippe Nédélec (nedr@aero.obs-mip.fr); Jean-Daniel Paris (Jean-Daniel.Paris@cea.fr); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (sde@iao.ru); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Скляднева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

воздуха над этой территорией в октябре 2014 г. на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» было выполнено зондирование атмосферы над акваторией Карского моря. В настоящей работе описываются результаты этого зондирования.

Методы и районы зондирования

Для крупномасштабного исследования распределения состава воздуха использовался самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик». Его полное описание имеется в [35]. Измерения в данном эксперименте осуществлялись с помощью приборов, указанных в таблице.

Кроме оперативных измерений, на трех высотах отбирались пробы аэрозоля для определения его химического состава.

Зондирование выполнялось 15–17 октября 2014 г. по маршруту Новосибирск – Салехард – Карское море – Салехард – Новосибирск, который состоял из пяти участков в связи с необходимостью дозаправки самолета в аэропортах вышеупомянутых городов. Во время перелетов между городами самолет выполнял несколько подъемов (до высоты $\approx 8,2$ км) и снижений до минимальной безопасной для выполнения горизонтального полета высоты: 500 м над сушей и 200 м над водной поверхностью. Схема полетов показана на рис. 1.

Вначале эксперимента район полетов оказался под действием мощного циклона, центр которого располагался вблизи Обской губы (рис. 2).

Первый маршрут (район I на рис. 1) был выполнен по северной части циклона, где направление воздушных потоков у поверхности земли было преимущественно восточным. На следующий день, 16 октября, центр циклона сместился к юго-востоку и районы работ II и III оказались под воздействием северо-западной его периферии. Приземные потоки воздуха сменились на северные и северо-западные. Движение циклона продолжалось к востоку и на следующий день. В результате район работ оказался в области



Рис. 1. Схема проведения зондирования атмосферы. Цифрами показаны районы Карского моря, использованные для сравнения

малоградиентного поля повышенного давления. Приземные потоки воздуха сохранили северное направление.

Результаты измерений и их обсуждение

В ряде публикаций отмечаются [36, 37] определенные различия в распределении состава воздуха на границе континент–океан. Кроме того, океан обладает демпфирующим качеством, заключающимся в запаздывании максимума и минимума годового хода температуры воздуха относительно годового хода инсоляции [38]. Поэтому рассмотрение вертикальных распределений газового и аэрозольного составов проведем для трех пунктов: внутриконтинентального (Новосибирск), расположенного вблизи границы континент–океан (Салехард) и находящегося непосред-

Газоаналитическое и аэрозольное оборудование

Блок	Прибор/датчик	Параметр	Диапазон	Погрешность	Постоянная времени
Газоаналитический комплекс	G2301-m	CO ₂ , млн ⁻¹	0...1000	<0,2 млн ⁻¹	1 с
		CH ₄ , млн ⁻¹	0...20	<0,0015 млн ⁻¹	1 с
		H ₂ O, млн ⁻¹	0...70000	<150 млн ⁻¹	1 с
	TEI Model 49C	O ₃ , млн ⁻¹	0...200	0,001 млн ⁻¹	4 с
	LI-6262*	CO ₂ , млн ⁻¹	0...1000	<0,2 млн ⁻¹	1 с
Аэрозольный комплекс	GRIMM #1.109	D _p , мкм (31 канал) N, см ⁻³	0,25...32 0...2000	— ±3%	6 с
	Диффузионный спектрометр аэрозоля	D _p , нм (20 каналов) N, см ⁻³	3...200 0...500000	— ±10%	80 с
	Нефелометр ФАН	σ, км ⁻¹	—	—	1 с
	Аэталометр АМА-02	BC, мкг/м ³	0,01...100	0,01 мкг/м ³	20 с
Гамма-фон	ИРФ	γ-фон, мкР/ч	1...1000	30%	1 с

* Калибруется каждые 15 мин по эталонным газовым смесям (NIES scale).

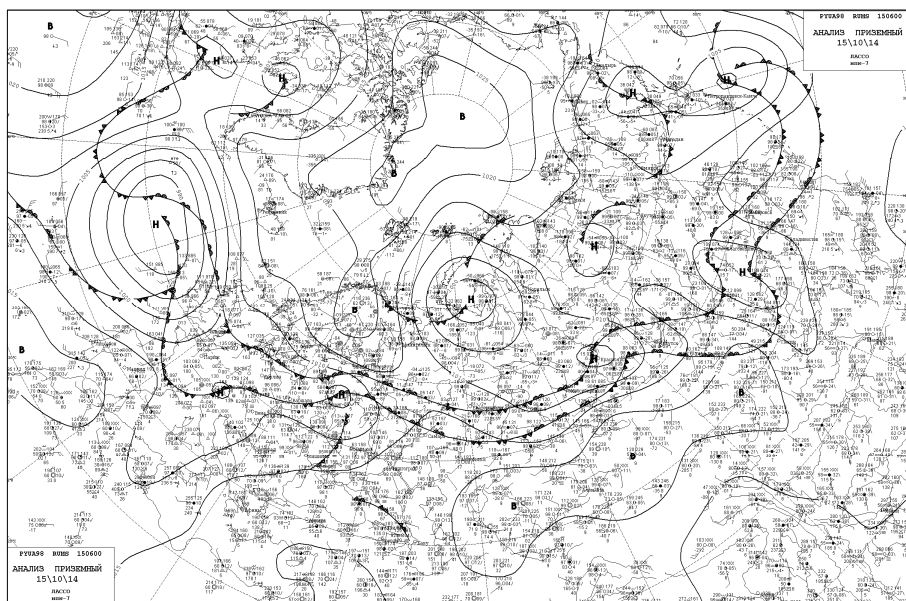


Рис. 2. Приземная карта погоды 15 октября 2014 г. (06:00 по Гринвичу)

ственно над океаном (Карское море). Также проанализируем распределение примесей над тремя районами Карского моря, которые на рис. 1 обозначены соответственно номерами I, II и III.

На рис. 3 приведены вертикальные профили концентрации углекислого газа 15 октября 2014 г. в районе Новосибирска и средние по всем полетам в Салехарде и над Карским морем. Последующие рисунки по другим примесям построены по такому же принципу.

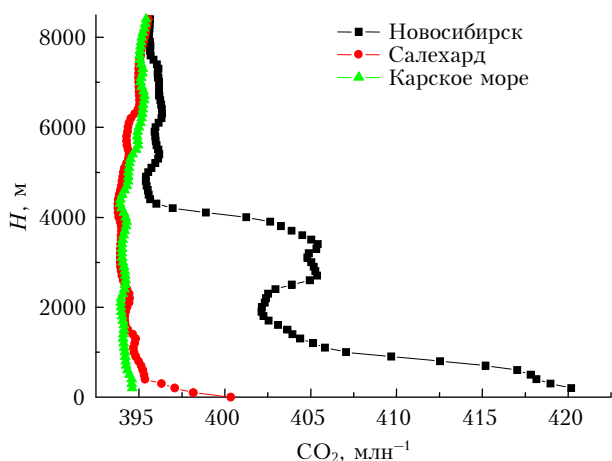


Рис. 3. Вертикальное распределение CO_2 над континентом, побережьем и океаном

Рис. 3 показывает значительные различия в вертикальном распределении CO_2 как по концентрации, так и по характеру изменения с высотой. Над континентом в пограничном слое воздуха содержание диоксида углерода достигало 420 млн^{-1} . Поскольку в октябре вегетационная деятельность растительности низкая, то такая высокая концентрация CO_2 , очевидно, обусловлена дыханием растений. Не исключен и антропогенный вклад. Выше 2000 м виден второй слой повышенных концентраций до 405 млн^{-1} .

Этот слой, как было показано ранее [39], является следствием переноса примесей с европейской территории России при экранировании нижней части потока Уральскими горами. Выше 4500 м концентрация CO_2 над тремя районами отличается всего лишь на 1 млн^{-1} , что отражает хорошее перемешивание воздуха в пределах северного полушария на таких высотах. В верхней тропосфере ($> 8000 \text{ м}$) различия в содержании углекислого газа вообще нивелируются.

Вертикальные профили над побережьем и океаном принципиально отличаются от внутриконтинентального. Над океаном, в слое от 200 до 4200 м, концентрация меньше, чем в средней и верхней тропосфере. Это подтверждает, что океан поглощает углекислый газ [37]. Над побережьем (Салехард) в пограничном слое концентрации CO_2 все-таки выше. По-видимому, на поверхности суши имеются небольшие источники углекислого газа.

Как распределена концентрация CO_2 над различными районами Карского моря, показано на рис. 4.

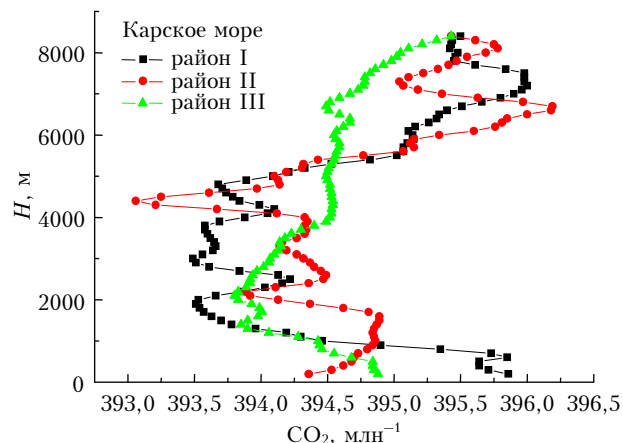
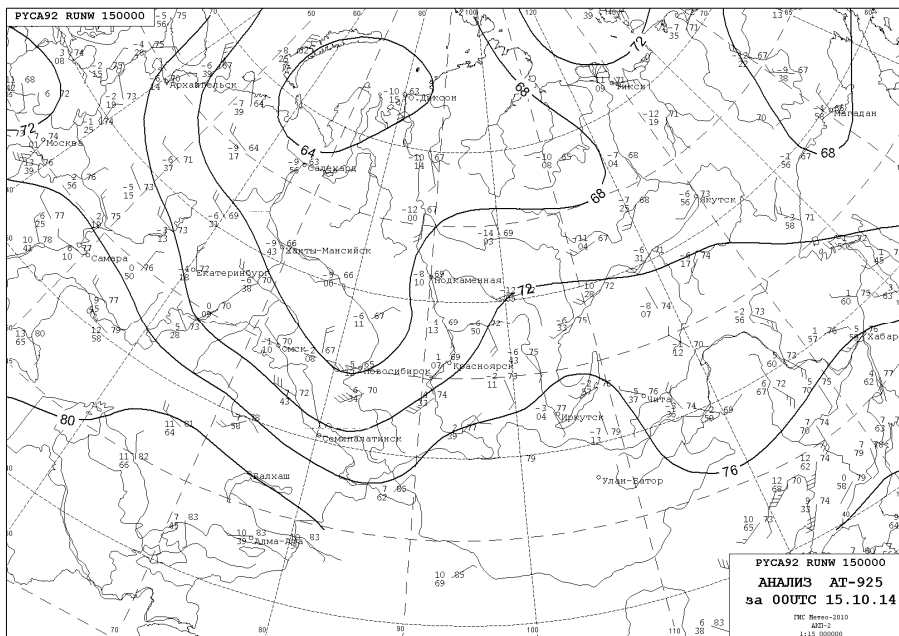
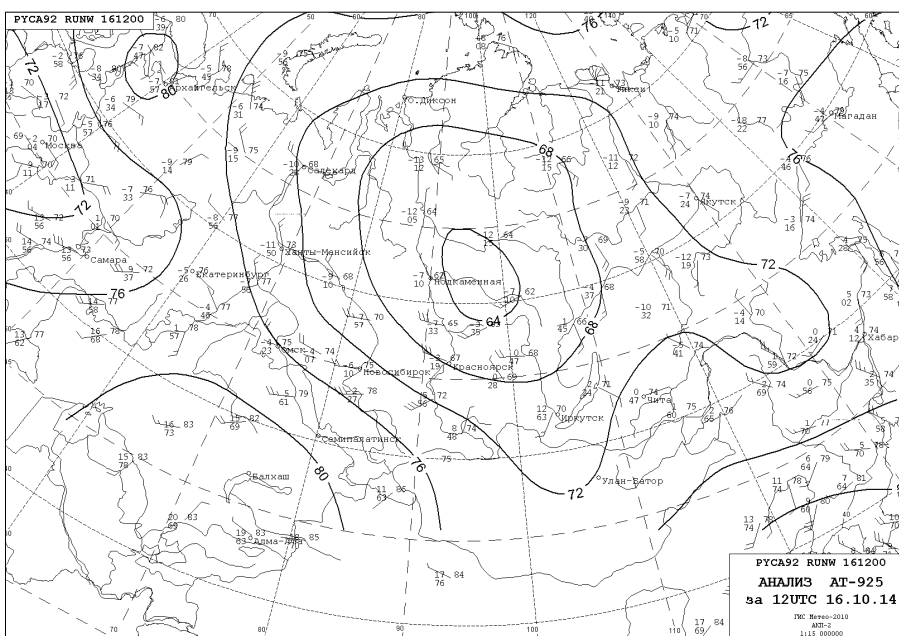


Рис. 4. Вертикальное распределение CO_2 над тремя районами Карского моря



a



б

Рис. 5. Карты АТ-925 (~750 м): 15 (а) и 16 октября 2014 г. (б)

Зондирование в районе I было выполнено 15 октября, в районах II и III – 16 октября 2014 г.

Из рис. 4 видно, что максимальное различие в содержании CO_2 составляет 3 млн^{-1} как по горизонтали, так и по вертикали. При этом во всех трех районах концентрация минимальна в слое 1000–5000 м. В верхней тропосфере ($> 5000 \text{ м}$) и в пограничном слое она возрастает. Минимум концентрации в слое 1000–5000 м, скорее всего, является следствием поглощения углекислого газа океаном. Рост концентрации в верхней тропосфере является отражением глобального фона в результате перемешивания при переносе газа на эти высоты от подстилающей поверх-

ности. Увеличение же содержания CO_2 в пограничном слое – следствие поступления воздуха в район измерений с континента. Если обратиться к картам АТ-925, то легко увидеть, что 15 октября перенос в район I происходил с юго-востока (рис. 5, а). На следующий день направление переноса изменилось на восточное (рис. 5, б). Возвращаясь к рис. 4, видим, что изменение направления переноса на 45° привело к уменьшению концентрации на $1,5 \text{ млн}^{-1}$ в пограничном слое. По-видимому, дальнейший поворот переноса к северу привел бы к уменьшению концентрации в пограничном слое и профиль стал бы похож на профиль, представленный на рис. 3.

Как изменяется вертикальное распределение углекислого газа в Российском секторе Арктики, рассмотрим по данным выполненного в 2008 г. проекта POLARCAT [34]. В отличие от [34], где анализировались вертикальные разрезы, на рис. 6 представлены вертикальные профили.

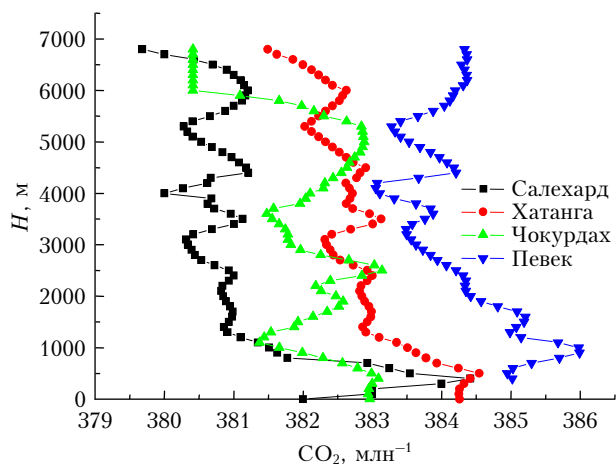


Рис. 6. Вертикальное распределение CO_2 над Арктическим побережьем России

Рис. 6 показывает характерное для полярных районов вертикальное распределение CO_2 , заключающееся в незначительном изменении концентрации с высотой. Исключение составляет район Салехарда, где в пограничном слое имеется максимум, очевидно, антропогенного происхождения. Обращает также на себя внимание увеличение концентрации почти во всем слое с запада (Салехард) на восток (Певек) в среднем на 6 млн^{-1} . Возможно, сказывается перенос из промышленных районов Китая, обнаруженный ранее [40, 41].

Согласно [42], рост концентрации CO_2 в среднем по земному шару составляет $2,08 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$. Имея данные измерений в Салехарде в 2008 и 2014 гг., сделаем оценку скорости изменения концентрации CO_2 в этом районе. На рис. 7 отражено, как изменились профили концентрации за этот период.

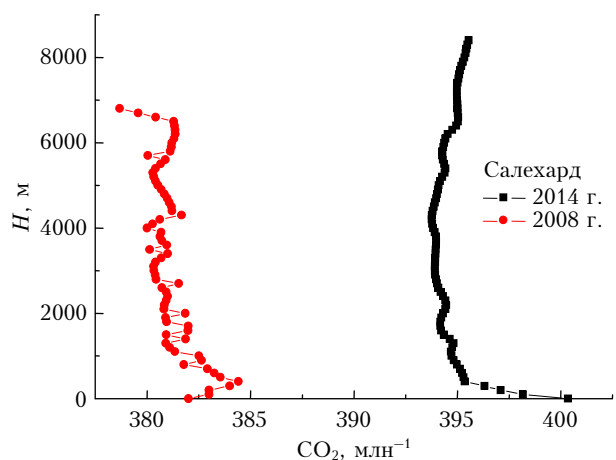


Рис. 7. Вертикальное распределение CO_2 над Салехардом в 2008 и 2014 гг.

Видно, что, не учитывая приземного и нижней части пограничного слоя, в которых могут сильно отражаться местные источники, рост концентрации наблюдался равномерно почти во всем слое атмосферы. Расчет изменения концентрации показывает, что в пограничном слое ее увеличение происходило со скоростью $2,00 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$, в свободной атмосфере — $2,17 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$. Первая величина немного ниже среднеглобального значения, вторая — несколько выше. К полученным показателям следует относиться с осторожностью, хотя они показывают, что значительных отклонений от общемировых тенденций в данном районе не фиксируется.

Оксид углерода является предшественником диоксида углерода и поступает в атмосферу из природных и антропогенных источников [43]. Следовательно, этот газ можно считать показателем чистоты воздуха в конкретном регионе. Изменения концентрации CO в фоновых районах в доиндустриальный период и в настоящее время показывают, что она возросла. Так, в доиндустриальный период, по данным [44], концентрация CO составляла в Гренландии 90 млрд^{-1} , в Антарктиде 55 млрд^{-1} . В [45] получено более низкое значение для Антарктиды — $(38 \pm 7) \text{ млрд}^{-1}$. В настоящее время она оценивается в среднем величиной 100 млрд^{-1} [46].

В период эксперимента концентрация оксида углерода над районами измерений находилась в пределах $90\text{--}110 \text{ млрд}^{-1}$, без учета верхней тропосферы и пограничного слоя на побережье (рис. 8). Вероятно, в районе Салехарда в приземном слое атмосферы имеется постоянно действующий источник CO .

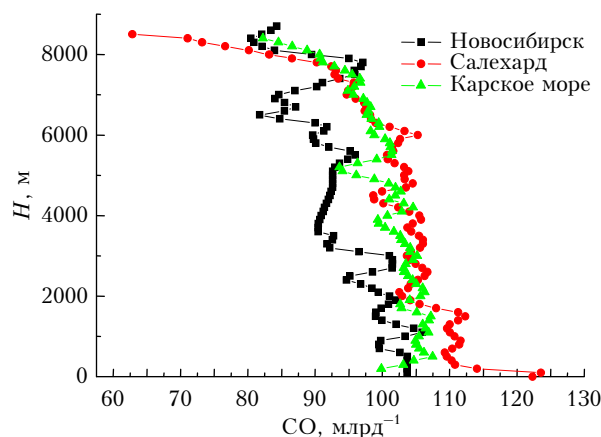


Рис. 8. Вертикальное распределение CO над континентом, побережьем и океаном

Поскольку CO относится к плохо растворимым газам [47], то его вертикальное распределение определяется в основном поступлением из других районов (рис. 9).

В отличие от CO_2 , концентрация которого над океаном пониженная, концентрация CO , несмотря на слоистость вертикального распределения, во всем слое атмосферы находится в основном в пределах $90\text{--}110 \text{ млрд}^{-1}$. Так как источник CO располагается на поверхности суши [48], то в верхней атмосфере наблюдается его закономерное убывание.

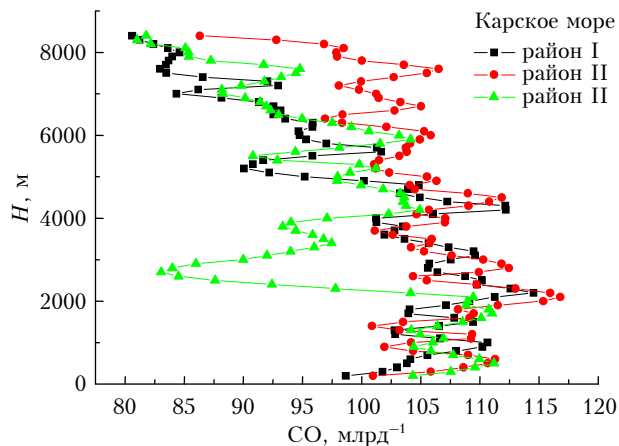


Рис. 9. Вертикальное распределение CO над тремя районами Карского моря

Полученные нами для Российского сектора Арктики значения оказались ниже, чем над другими ее секторами [7–9].

Метан – третий газ по значимости его вклада в глобальное потепление. Для Арктического района его исследование особенно важно в условиях потепления в связи с возможной деградацией придонной мерзлоты и разложением метаногидратов [49, 50]. Оценки поступления метана из Северного Ледовитого океана очень сильно различаются [21, 36, 51, 52].

Данные о вертикальном распределении метана представлены на рис. 10, на котором, кроме трех основных профилей, добавлен еще один, полученный при снижении над Васюганским болотом.

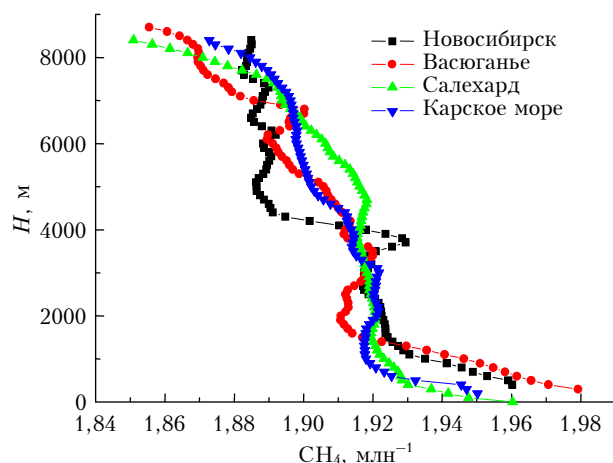


Рис. 10. Вертикальное распределение CH₄ над континентом, Васюганским болотом, побережьем и океаном

Болота, как известно, являются одним из основных источников метана над сушей [53, 54]. Из рис. 10 видно, что в период эксперимента поступление метана с поверхности Карского моря было заметно меньше (концентрация 1,95–1,96 млн⁻¹), чем с поверхности суши на континенте (1,97 млн⁻¹), и значительно меньше, чем с поверхности Васюганского болота (1,99 млн⁻¹). В свободной атмосфере концентрации метана близки над всеми районами.

Еще меньшие различия фиксируются над тремя районами Карского моря (рис. 11). Здесь концентрация метана убывает с высотой. В пограничном слое наблюдаются различия между районами I (измерения 15 октября 2014 г.), II и III (измерения 16 октября 2014 г.), очевидно, обусловленные изменением циркуляции атмосферы в разных слоях, о котором говорилось выше.

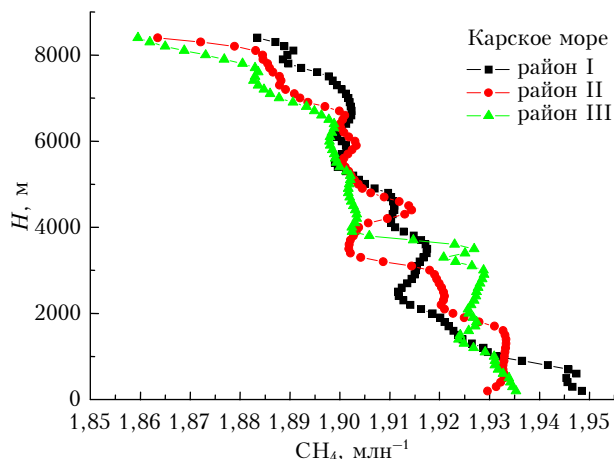


Рис. 11. Вертикальное распределение CH₄ над тремя районами Карского моря

Из рис. 10 и 11 можно сделать вывод об отсутствии эмиссии метана с поверхности Карского моря в районах измерений.

Еще слабее отличаются вертикальные распределения озона над всеми районами исследования (рис. 12). Небольшие различия видны в пограничном слое и средней тропосфере; более значительные – в верхней тропосфере. В пограничном слое в районе Новосибирска, вероятно, сказывается сток озона на аэрозоле [55]. В средней тропосфере всплеск озона, скорее всего, обусловлен поступлением озоноразрушающих соединений вследствие блокирования западного потока Уральскими горами [39]. Существенные различия в верхней тропосфере связаны с тем, что измерения над Новосибирском выполнены в умеренной

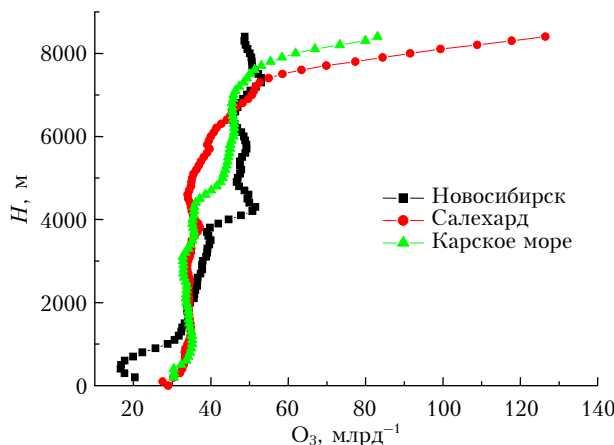


Рис. 12. Вертикальное распределение O₃ над континентом, побережьем и океаном

воздушной массе, над Салехардом и Карским морем — в арктической воздушной массе (см. рис. 2). Давно известно [56, 57], что высота тропопаузы над ними разная и составляет в среднем 11 км в умеренной и 9 км в арктической воздушных массах соответственно. Высота же тропопаузы тесно связана с высотой озонопаузы [58, 59]. Следовательно, рост концентрации озона над Салехардом и Карским морем отражает увеличение его содержания в районе озонопаузы в нижней стратосфере. Подобные профили зафиксированы и для других районов Арктики [7–9].

Весьма существенно отличаются вертикальные распределения аэрозоля над континентом и океаном (рис. 13).

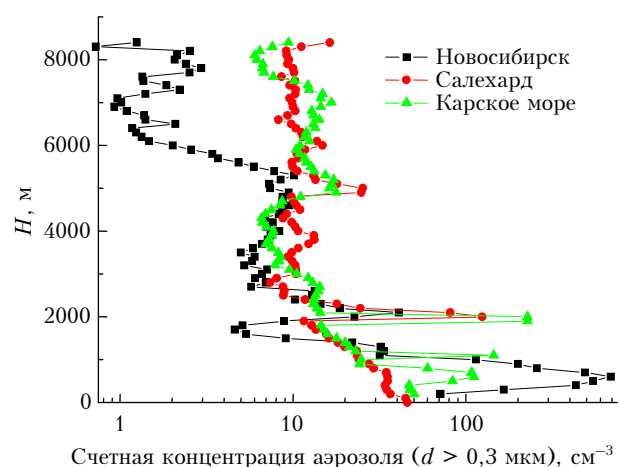


Рис. 13. Вертикальное распределение счетной концентрации аэрозоля над континентом, побережьем и океаном

Видно, что высокая концентрация аэрозоля наблюдается над континентом, в районе Новосибирска, скорее всего, из-за действия местных источников. Повышенные концентрации над Карским морем обусловлены поступлением частиц с континента, из Норильской промзоны [60, 61]. В районе Салехарда таких источников не обнаружено. Над всеми тремя районами зафиксирован слой аэрозоля вблизи 2000 м. Очевидно, он возникает за счет переноса частиц из других районов. Самые значительные различия зафиксированы выше 5500 м. Здесь количество частиц намного меньше (почти на порядок) над континентом, чем над океаном. Возможно, это связано с дальним переносом аэрозоля, который обнаружен в арктической массе в работах [62–64].

Описанное выше распределение счетной концентрации аэрозоля находит свое подтверждение и на вертикальных профилях его массовой концентрации (рис. 14). Отбор проб производился на высотах 500, 5000 и 8200 м.

Рис. 14 показывает, что над континентом массовая концентрация уменьшается с высотой во всем слое атмосферы. Над океаном и прибрежными районами содержание аэрозоля намного меньше в пограничном слое и возрастает либо в средней тропосфере, либо в верхней. Значения массовой концентрации (5–7 мкг/м³) соответствуют данным измере-

ний в других регионах Арктики [25]. Это подтверждает вывод о высотном переносе аэрозоля в Арктику [62–64].

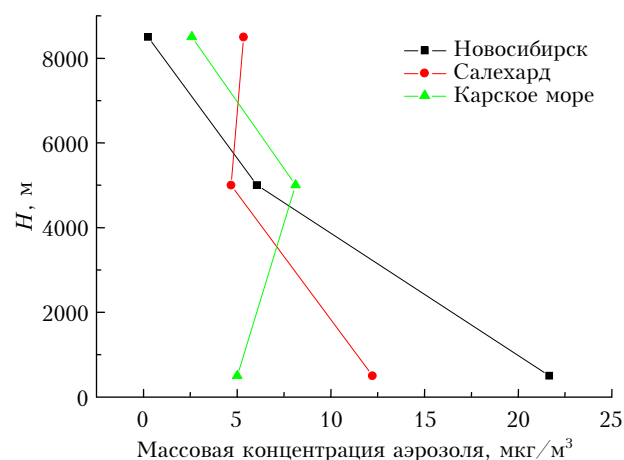


Рис. 14. Вертикальное распределение массовой концентрации аэрозоля над континентом, побережьем и океаном

Вывод о дальнем переносе аэрозоля следует также из анализа химического состава отобранных частиц (рис. 15).

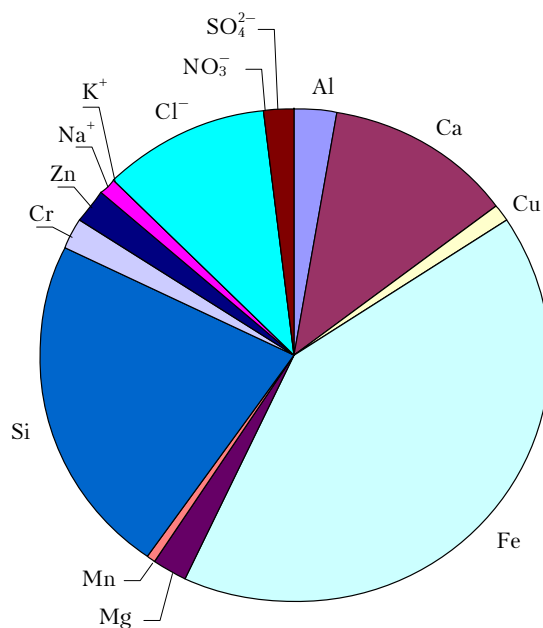


Рис. 15. Химический состав аэрозоля над Карским морем

Результаты анализа свидетельствуют, что аэрозоль над океаном в основном образован терригенными элементами Fe, Si, Ca, Al, Mg, Cr, Zn, Cu, Mn. Ионы, которые обычно входят в состав морского аэрозоля в приземном (придонном) слое воздуха [65–67], такие как Na⁺, K⁺, Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, составляют в сумме менее 20%. Учитывая, что терригенные элементы не могут попасть в воздух с поверхности океана, естественно считать, что они принесены из других регионов, с иным характером подстилающей поверхности.

Заключение

Измерение вертикального распределения газового и аэрозольного состава воздуха, выполненное над Карским морем и прибрежными районами Российской Арктики, выявило ряд особенностей, не характерных для континентальных районов.

В вертикальном распределении диоксида углерода наблюдается минимум концентрации в пограничном и приземном слоях воздуха, который создается за счет стока газа путем поглощения его океаном.

Вертикальные профили концентрации метана не выявляют эмиссии газа с поверхности океана. Концентрация метана в приземном и пограничном слоях меньше, чем над континентом и прибрежными районами.

В распределении оксида углерода и озона особых различий с другими районами не обнаружено.

Имеются особенности в вертикальном распределении аэрозоля, которые заключаются в его повышенном содержании в верхней тропосфере и доминировании терригенных элементов в его химическом составе. По-видимому, это обусловлено дальним переносом частиц из регионов с открытой подстилающей поверхностью.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 17-17-01095.

1. *Shepherd T.G.* Effects of a warming Arctic // *Science*. 2016. V. 353, N 6303. P. 989–990.
2. *Johannessen O.M., Kuzmina S.I., Bobylev L.P., Miles M.W.* Surface air temperature variability and trends in the Arctic: New amplification assessment and regionalisation // *Tellus*. 2016. V. 68. 28234. URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusa.v68.28234>.
3. *Vogt M.* Adrift in an ocean of change // *Science*. 2015. V. 350, N 6267. P. 1466–1468.
4. *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 5. P. 246–249.
5. *Tranvik L.* Carbon cycling in the Arctic // *Science*. 2014. V. 345, N 6199. P. 870.
6. *Cory R.M., Ward C.P., Crump B.C., Kling G.W.* Sunlight controls water column processing of carbon in arctic fresh waters // *Science*. 2014. V. 345, N 6199. P. 925–928.
7. *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., Petaja T., Tanimoto H., Gamble J., Dibb J.E., Melamed M., Johnson N., Fider M., Tynkkynen V.-P., Baklanov A., Eckhardt S., Monks S.A., Browse J., Bozem H.* Arctic air pollution: Challenges and opportunities for the next decade // *Elementa: Sci. Anth.* 2016. N 4. 16 p.
8. *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.
9. *Roiger A., Thomas J.-L., Schlager H., Law K.S., Kim J., Schafner A., Weinzierl B., Dahlkotter 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.
10. *Evangelidou N., Balkanski Y., Hao W.M., Petkov A., Silverstein R.P., Corley R., Nordgren B.L., Urbanski S.P., Eckhardt S., Stohl A., Tunved P., Crepinsek S., Jeffer-*

- son 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.
11. *O’Shea S.J., Allen G., Gallagher M.W., Bower K., Illingworth S.M., Muller J.B.A., Jones B.T., Percival C.J., Bauguutte 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.
12. *Willis M.D., Burkart J., Thomas J.L., Kollner F., Schneider J., Bozem H., Hoor P.M., Aliabadi A.A., Schulz H., Herber A.B., Leaitch W.R., Abbatt J.D.* Growth of nucleation mode particles in the summertime Arctic: A case study // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 12. P. 7663–767.
13. *Asmi E., Kondratyev V., Brus D., Laurila T., Lihavainen H., Backman J., Vakkari V., Aurela M., Hatakka J., Viisanen Y., Uttal T., Ivakhov V., Makshitas A.* Aerosol size distribution seasonal characteristics // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 13. P. 1271–1287.
14. *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 // *Biogeosciences*. 2016. V. 13, N 8. P. 2291–2303.
15. *Strachan I.B., Nugent R.A., Crombie S., Bonneville M.C.* Carbon dioxide and methane exchange at a cool-temperate freshwater marsh // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10, N 10. P. 10.
16. *Fisher J.B., Sikka M., Oechel W.C., Huntzinger D.N., Melton J.R., Koven C.D., Ahlstrom A., Arian M.A., Baker I., Chen J.M., Ciais P., Davidson C., Dietze M., El-Marsi B., Hayes D., Huntingford C., Jain A.K., Levy P.E., Lomas M.R., Poulter B., Price D., Sahoo A.K., Schaefer K., Tian H., Tomelleri E., Verbeeck H., Viovy N., Wania R., Zeng N., Miller C.E.* Carbon cycle uncertainty in the Alaskan Arctic // *Biogeosciences*. 2014. V. 11, N 15. P. 4271–4288.
17. *Langer M., Westermann S., Anthony K.W., Wischniewski K., Boike J.* Frozen ponds: Production and storage of methane during the Arctic winter in a lowland tundra landscape in northern Siberia, Lena // *Biogeosciences*. 2015. V. 12, N 4. P. 977–990.
18. *Голубятников Л.Л., Казанцев В.С.* Вклад тундровых озер Западной Сибири в метановый бюджет атмосферы // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана*. 2013. Т. 49, № 4. С. 430–438.
19. *Киселев А.А., Решетников А.И.* Метан в Российской Арктике: результаты наблюдений и расчетов // *Проблемы Арктики и Антарктиды*. 2013. № 2. С. 5–15.
20. *Giamarelou M., Eleftheriadis K., Nyeki S., Torseth K., Biskos G.* Indirect evidence of the composition of nucleation mode atmospheric particles in the high Arctic // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121, N 2. P. 965–975.
21. *Myhre C.L., Ferre B., Platt M., Silyakova A., Hermansen O., Allen G., Pizzo I., Schmidbauer N., Stohl A., Pitt J., Jansson P., Greinert J., Percival C., Fjaeraa A.M., O’Shea S.J., Gallagher M., Breton M.L., Bower K.N., Bauguutte S.J.-B., Dalsoren S., Vadakkepuliyaambatta S., Fisher R.E., Nisbet E.G., Lowry D., Myhre G., Pyle J.A., Cain M., Mienert J.* Extensive release of methane from Arctic seabed west of Svalbard during summer 2014 // *Geophys. Res. Lett.* 2016. V. 43, N 9. P. 4624–4631.
22. *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 $\delta^{13}\text{C}$ in CH_4 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.
23. 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.
24. Leaitch W.R., Korolev A., Aliabadi A.A., Burkart J., Willis M.D., Abbatt J.P.D., Bozem H., Hoor 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.
25. Groot Zwaafink C.D., Grythe H., Skov H., Stohl A. Substantial contribution of northern high-latitude sources to mineral dust in the Arctic // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2016. V. 121, N 23. P. 13678–13697.
26. Heintzenberg J., Leck C. The summer aerosol in the central Arctic 1991–2008: Did it change or not? // *Atmos. Chem. Phys.* 2012. V. 12, N 9. P. 3969–3983.
27. Tollefson J. Carbon-sensing satellite system faces high hurdles // *Nature*. 2016. V. 533, N 7604. P. 446–447.
28. Popkin G. Commercial space sensors go high-tech // *Nature*. 2017. V. 545, N 7655. P. 397–398.
29. Назурный 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.
30. Назурный А.П., Макутас А.П. Концентрация метана в пограничном слое атмосферы по данным измерений на дрейфующих ледовых станциях «Северный полюс-36» и «Северный полюс-39» // *Метеорол. и гидрол.* 2016. № 3. С. 63–71.
31. Пупко И.И., Пузач С.П., Семилетов И.П. Динамика CO_2 на шельфе Восточно-Сибирского моря // *Метеорол. и гидрол.* 2010. № 9. С. 62–73.
32. 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 // *Biogeosciences*. 2013. V. 10, N 9. P. 5977–5996.
33. Yu J., Xie Z., Sun L., Kang H., He P., Xing G. $\delta^{13}\text{C}$ - CH_4 reveals CH_4 variations over oceans from mid-latitudes to the Arctic // *Sci. Rep.* 2015. V. 5, N 13760. 9 p.
34. 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 P., Paris J.-D., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Складнева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Крупномасштабные исследования газового и аэрозольного состава воздуха над Сибирским регионом // *Оптика атмосфер. и океана*. 2014. Т. 27, № 3. С. 232–239.
35. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсуков В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сиков Г.П., Симоненков Д.В., Синецын Д.С., Толмачев Г.Н., Филитов Д.В., Фофонов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // *Оптика атмосфер. и океана*. 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
36. Berchet A., Bousquet P., Pison I., Locatelli R., Chevalier F., Paris J.-D., Dlugokencky E.J., Laurila T., Hatakka J., Viisanen Y., Worthy D.E.J., Nisbet E., Fischer R., France J., Lowry L., Ivakhov V., Hermansen O. Atmospheric constraints on the methane emissions from the East Siberian Shelf // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, N 6. P. 4147–4157.
37. Bourgeois T., Orr J.C., Resplandy L., Terhaar J., Ethe C., Gehlen M., Bopp L. Coastal-ocean uptake of anthropogenic carbon // *Biogeosciences*. 2016. V. 13, N 14. P. 4167–4185.
38. Шерстюков Б.Г. Инерционность изменений температуры в приповерхностном слое // *Метеорол. и гидрол.* 2017. № 4. С. 5–16.
39. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Фофонов А.В. Блокирующая роль Уральских гор в трансграничном переносе примесей из Европы в Азию // *Оптика атмосфер. и океана*. 2010. Т. 23, № 11. С. 937–941; Antochin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Rasskazchikova T.M., Fofonov A.V. The blocking role of the Ural mountains in the transborder transfer of impurities from Europe to Asia // *Atmos. Ocean. Opt.* 2011. V. 24, N 3. P. 242–246.
40. Paris J.-D., Stohl A., Ciais P., Nédélec P., Belan B.D., Arshinov M.Y., Ramonet M. Source-receptor relationships for airborne measurements of CO_2 , CO and O_3 above Siberia: A cluster-based approach // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10, N 4. P. 1671–1687.
41. Paris J.-D., Ciais Ph., Nédélec Ph., Stohl A., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Carouge C., Golitsyn G., Granberg I.G. New insights on the chemical composition of the Siberian air shed from the YAK-AEROSIB aircraft campaigns // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2010. V. 91, N 5. P. 625–641.
42. The state of greenhouse gases in the atmosphere based on global observations through 2015: Greenhouse Gas Bulletin. Geneva, Switzerland: WMO, 2016. N 12. 7 p.
43. Cicerone R.J. How has the atmospheric concentration of CO changed? // *In the Changing Atmosphere*. New York: John Willey & Sons, 1988. P. 49–61.
44. Delmas R.Y., Legrand M. Trends recorded in Greenland in relation with northern hemisphere anthropogenic pollution // *IGActiv. Newslett.* 1998. N 14. P. 19–22.
45. Assonov S.S., Breminkmeijer C.A.M., Jöckel P., Mulvaney R., Bernard S. Chappellaz J. Evidence for CO increase in the SH during the 20th century based on firn air samples from Berkner Island, Antarctica // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 2. P. 295–308.
46. Atmosphere trace gases that are radiatively active and significance to global change // *Earth Quest.* 1990. V. 4, N 2. P. 10–11.
47. Глинка Н.Л. Общая химия. Л.: Химия, 1985. 702 с.
48. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990. 261 с.
49. Сергиенко В.И., Дударев О.В., Дмитриевский Н.Н., Шахова Н.Е., Никольский Н.Н., Никуфоров С.Л., Саломатин А.С., Салюк Р.А., Карнаух В.В., Черных Д.Б., Тумской В.Е., Чувилин Е.М., Буханов Б.А. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина «метановой катастрофы»: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // *Докл. АН.* 2012. Т. 445, № 3. С. 330–335.
50. Анисимов О.А., Забойкина Ю.Г., Кокорев В.А., Юрганов Л.Н. Возможные причины эмиссии метана на шельфе морей Восточной Арктики // *Лёд и снег*. 2014. Т. 54, № 2. С. 69–81.

51. *Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., Yusupov V., Kosmach D., Gustafsson O.* Extensive methane venting to the atmosphere from sediments of the East Siberian Arctic Shelf // *Science*. 2010. V. 327. P. 1246–1250.
52. *Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., Sergienko V., Salyuk A., Kosmach D., Chernykh D., Stubbs C., Nicolsky D., Tamsky V., Gustafsson O.* Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf // *Nat. Geosci.* 2014. V. 7. P. 64–70.
53. *Enhalt D.H.* The atmospheric cycle of methane // *Tellus*. 1974. V. 26, N 1–2. P. 58–70.
54. *Заварзин Г.А.* Микробный цикл метана в холодных условиях // *Природа*. 1995. № 6. С. 3–14.
55. *Белан Б.Д.* Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
56. *Воробьев В.И.* Синоптическая метеорология. Л.: Гидрометеоздат, 1991. 616 с.
57. *Маховер З.М.* Климатология тропопаузы. Л.: Гидрометеоздат, 1983. 254 с.
58. *Krzyscin J., Krizan P., Jaroslowski J.* Long-term changes in the tropospheric column ozone from the ozone soundings over Europe // *Atmos. Environ.* 2007. V. 41, N 3. P. 606–616.
59. *Follette-Cook M.B., Hudson R.D., Nedoluha G.E.* Classification of Northern Hemisphere stratospheric ozone and water vapor profiles by meteorological regime // *Atmos. Chem. Phys.* 2009. V. 9, N 16. P. 5989–6003.
60. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Краснов О.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района. Ч. 3. Распространение примесей в воздушном бассейне Норильского региона // *Оптика атмосфер. и океана*. 2006. Т. 19, № 9. С. 798–804.
61. *Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Ивлев Г.А., Рассказчикова Т.М., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Комплексная оценка состояния воздушного бассейна Норильского промышленного района. Ч. 4. Вертикальная стратификация примесей // *Оптика атмосфер. и океана*. 2006. Т. 19, № 10. С. 905–908.
62. *Панченко М.В., Терпугова С.А.* Годовой ход содержания субмикронного аэрозоля в тропосфере над Западной Сибирью // *Оптика атмосфер. и океана*. 1994. Т. 7, № 8. С. 1033–1044.
63. *Панченко М.В., Польшкин В.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Шмаргунов В.П., Яушева Е.П.* О формировании среднерегионального аэрозольного фона // *Оптика атмосфер. и океана*. 1995. Т. 8, № 7. С. 1112–1114.
64. *Панченко М.В., Терпугова С.А.* Внутрисезонные факторы изменчивости характеристик субмикронного аэрозоля. 1. Воздушные массы // *Оптика атмосфер. и океана*. 1995. Т. 8, № 12. С. 1761–1767.
65. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М.* Мелко- и грубодисперсные компоненты аэрозольной оптической толщи атмосферы в морских и полярных районах // *Оптика атмосфер. и океана*. 2015. Т. 28, № 8. С. 690–697; *Sakerin S.M., Kabanov D.M.* Fine and coarse components of atmospheric aerosol optical depth in maritime and polar regions // *Atmos. Ocean. Opt.* 2015. V. 28, N 6. P. 510–517.
66. *Сакерин С.М., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Радионов В.Ф., Holben B.N., Smirnov A.* Вариации оптических и микрофизических характеристик аэрозоля на маршруте Российских антарктических экспедиций в Восточной Атлантике // *Оптика атмосфер. и океана*. 2016. Т. 29, № 8. С. 666–678; *Sakerin S.M., Kabanov D.M., Polkin V.V., Radionov V.F., Holben B.N., Smirnov A.* Variations in aerosol optical and microphysical characteristics along the route of Russian Antarctic expeditions in the East Atlantic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 1. P. 89–102.
67. *Сакерин С.М., Голобокова Л.П., Кабанов Д.М., Польшкин В.В., Турчинович Ю.С., Ходжер Т.В., Хуриганова О.И.* Пространственно-временная изменчивость характеристик аэрозоля на маршруте Индо-Атлантической экспедиции НИС «Академик Николай Страхов» // *Оптика атмосфер. и океана*. 2017. Т. 30, № 1. С. 42–52; *Sakerin S.M., Golobokova L.P., Kabanov D.M., Polkin V.V., Turchinovich Yu.S., Khodzher T.V., Khuriganova O.I.* Spatiotemporal variations in aerosol characteristics along the route of the Indian-Atlantic expedition onboard the research vessel Akademik Nikolaj Strakhov // *Atmos. Ocean. Opt.* 2017. V. 30, N 4. P. 349–359.

O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, P. Nédélec, J.-D. Paris, T.M. Rasskazhikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **The vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic.**

The vertical distributions of gas and aerosol compositions of air over the Kara Sea and coastal areas of the Russian Arctic, measured by Tu-134 Optic airborne laboratory in October, 2014, are analyzed. Features of the altitude distributions of CO₂ and aerosol over the Kara Sea that differ them from continental conditions are revealed. No considerable deviations from continental distributions are found for CH₄, CO, and O₃.