

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.42

Комплексная оценка состава воздуха над Российским сектором Арктики в сентябре 2020 г.

П.Н. Антохин, В.Г. Аршинова, М.Ю. Аршинов, Б.Д. Белан[✉], С.Б. Белан,
Д.К. Давыдов, Г.А. Ивлев, А.В. Козлов, Т.М. Рассказчикова, Д.Е. Савкин,
Д.В. Симоненков, Т.К. Складнева, Г.Н. Толмачев, А.В. Фофонов*

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

Поступила в редакцию 03.05.2024;
после доработки 13.06.2024;
принята к печати 30.07.2024

В Арктике потепление климата происходит в несколько раз быстрее, чем в других районах земного шара. Это может быть результатом усиления обратных связей между климатом и составом атмосферы. Однако данных об изменениях концентрации климатически активных веществ в этом регионе крайне мало. Поэтому 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 российских морей Северного Ледовитого океана. В настоящей работе приводится анализ пространственного распределения газового и аэрозольного составов арктической тропосферы. Показано, что в период эксперимента концентрация CO_2 в направлении с запада на восток росла в приземном и пограничном слоях и, наоборот, убывала в тропосфере. Содержание же метана в приземном слое в том же направлении уменьшалось. Концентрации CO , NO_x и SO_2 в Российском секторе Арктики были очень низкими, что характерно для удаленных фоновых районов. Все фракции аэрозоля также демонстрируют убывание содержания с запада на восток. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании атмосферных процессов, происходящих в Арктике в условиях изменяющегося климата.

Ключевые слова: Арктика, атмосфера, аэрозоль, вертикальное распределение, диоксид серы, метан, озон, оксиды азота, оксиды углерода, перенос, состав; Arctic, atmosphere, aerosol, vertical distribution, sulfur dioxide, methane, ozone, nitrogen oxides, carbon oxides, transport, composition.

Введение

По заключению Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК, ИРСС), глобальное потепление, обусловленное в основном изменением состава воздуха [1], продолжается. При этом оно происходит неравномерно по земному шару. Наиболее быстро температура воздуха растет в Арктике, где она увеличилась в четыре раза по сравнению с другими регионами [2–4]. Это вызы-

вает ряд вопросов: как из-за потепления изменяется состав воздуха в регионе и каким образом реальные вариации состава могут сказаться на самом потеплении [5–7]? Ответить на эти вопросы можно, только располагая информацией о составе воздуха [8]. Однако таких данных для Российского сектора Арктики крайне мало.

Измерения состава воздуха в этом секторе выполнялись только в приземном слое воздуха [9], приземном слое на дрейфующих станциях [10] или с борта судов [11], причем исследовались в основном парниковые газы [12]. Концентрация других малых газовых составляющих воздуха изучалась в регионе эпизодически.

Вне поля зрения ученых остаются процессы обмена примесями между водной поверхностью, все более освобождающейся ото льда, и атмосферой. Совершенно отсутствуют сведения о вертикальном распределении примесей. Нагревание может происходить не только в приземном слое воздуха, но и в средней тропосфере, как показано в [13, 14], что очень затрудняет моделирование климатических процессов и изменения окружающей среды.

* Павел Николаевич Антохин (arn@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); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); 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).

На сегодняшний день нет серийно выпускаемых средств для измерения вертикального распределения газовых и аэрозольных составляющих атмосферы. Решение проблемы мониторинга состава воздуха в Арктическом регионе, как и в других удаленных точках земного шара, связывали с развитием систем спутникового зондирования. Согласно данным обзора [15] в 2007 г. уже функционировали 15 типов космических аппаратов, измеряющих аэрозольный и газовый состав воздуха. Однако их эксплуатация показывает, что пока спутниковые данные не имеют необходимой точности измерений [16]. Поэтому требуется совершенствование как аппаратной, так и методической составляющих этого метода зондирования [17, 18].

За рубежом для исследования вертикального распределения газовых и аэрозольных примесей в Арктике широко используются самолеты-лаборатории. Самолетный метод признан эталонным для исследования состава воздуха по вертикали [19]. Поэтому для восполнения пробела в данных о вертикальном распределении газового и аэрозольного составов воздуха над Российским сектором Арктики был использован самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик».

Эксперимент по зондированию атмосферы и водной поверхности над акваториями всех морей Северного Ледовитого океана был проведен в сентябре 2020 г. В [20] приведено его описание, характеристики оборудования и средние концентрации примесей над всеми морями. В [21–24] был выполнен подробный анализ особенностей распределения состава воздуха над каждым из морей.

Цель работы — обобщить результаты исследования пространственного распределения газовых и аэрозольных компонентов воздуха, полученные в Российском секторе Арктики в сентябре 2020 г. В отличие от предыдущих работ, в настоящей статье приводятся не отдельные вертикальные распределения, а обобщенные для каждого из морей профили и специально построенные разрезы с использованием метода кригинга [25]. Это позволяет более

наглядно представить данные измерений и полнее отразить картину пространственного распределения газов и аэрозоля.

1. Материалы и методы

Арктическая авиационная кампания проводилась 04–17.09.2020 г.; схема маршрута показана на рис. 1 (цв. вкладка). В ходе выполнения эксперимента были измерены профили концентраций газовых и аэрозольных компонентов воздуха от минимально допустимых высот (200 м) до верхних слоев тропосферы (9000–10000 м). При наборе высоты и снижении над морями полеты проходили на трех уровнях (200, 5000 и 9000 м) в течение 5–15 мин без изменения высоты (горизонтально) с целью отбора проб аэрозолей на фильтры и исследования пространственной неоднородности в распределении газовых компонентов и метеорологических величин. Над каждым из морей было измерено четыре вертикальных профиля.

В настоящей работе рассматриваются концентрации диоксида и оксида углерода (CO_2 и CO), оксидов азота (NO_x), диоксида серы (SO_2), метана (CH_4), озона (O_3), аэрозольных частиц нуклеационного диапазона размеров (НУК), ядер Айткена (ЯА), аккумуляционной (АКМ) и грубодисперсной (ГБД) фракций аэрозоля. Характеристики приборов, использовавшихся при измерениях, приведены в табл. 1.

2. Результаты исследования и обсуждение

2.1. Газовый состав

На рис. 2 (цв. вкладка) представлено вертикальное распределение концентраций малых газовых составляющих атмосферы, которое измерялось над акваториями морей Северного Ледовитого океана в период с 4 по 16.09.2020 г. Из рис. 2, *a* видно, что имеется существенная разница изменения концентрации CO_2 по долготе в свободной тропосфере

Таблица 1

Технические характеристики газоанализаторов и спектрометров аэрозоля

Прибор	Измеряемый параметр	Диапазон измерений	Неопределенность	Постоянная времени, с
G2301-m	CO_2	0–1000 млн^{-1}	$< 0,2 \text{ млн}^{-1}$	1
	CH_4	0–20 млн^{-1}	$< 0,0015 \text{ млн}^{-1}$	1
	H_2O	0–70000 млн^{-1}	$< 150 \text{ млн}^{-1}$	1
Model 49C	O_3	0–200 млн^{-1}	$\pm 0,001 \text{ млн}^{-1}$	1
Model 48C	CO	0–10000 млн^{-1}	$\pm < 1\%$	4
Model 42i-TL	$\text{NO}/\text{NO}_2/\text{NO}_x$	0–0,5 млн^{-1}	$\pm 0,0004 \text{ млн}^{-1}$	10
Model 43i-TLE	SO_2	0–20 млн^{-1}	$\pm 0,0002 \text{ млн}^{-1}$	10
Диффузионный спектрометр аэрозоля	D_p (20 каналов)	3–200 нм	–	80
	N	0–500000 см^{-3}	$\pm 10\%$	
GRIMM Model 1.109	D_p (31 канал)	0,25–32 мкм	–	6
	N	0–2000 см^{-3}	$\pm 3\%$	

Примечание. D_p — диаметр частиц; N — количество частиц в единице объема.

и пограничном слое атмосферы. Поскольку Западная Европа является мощным антропогенным источником различных примесей, которые затем переносятся, как правило, с запада на восток, то в свободной тропосфере это находит отражение в уменьшении их содержания в том же направлении вследствие рассеивания при переносе.

В пограничном слое картина иная. Океан поглощает более трети избыточного углекислого газа, имеющегося в атмосфере [26]. Это хорошо видно на рис. 2, а, где концентрация в приземном слое воздуха значительно ниже, чем в свободной тропосфере, над всей акваторией Российского сектора Арктики. Внутри пограничного слоя содержание CO_2 , в отличие от вышележащих слоев, возрастает с запада на восток (табл. 2).

Согласно данным табл. 2 минимальная концентрация CO_2 наблюдалась над Баренцевым морем ($397,2 \pm 0,5$ млн⁻¹), максимальная – над Чукотским ($410,3 \pm 1,8$ млн⁻¹). Уменьшение поглощения CO_2 океаном, на наш взгляд, можно объяснить следующим. С одной стороны, если океан ассимилирует углекислый газ путем растворения, то должна существовать отрицательная зависимость его поглощения от температуры воды [27]. С другой стороны,

планктон, находящийся в верхнем слое океана, ассимилирует CO_2 . Скорость метаболизма для многих его видов положительно и нелинейно зависит от температуры воды [28]. Из табл. 3 следует, что чем выше температура воды в море, тем ниже концентрация CO_2 в воздухе над ним. Это означает, что здесь больше поглощение CO_2 океаном. Таким образом, в период проведения эксперимента для морей Российского сектора Арктики преобладающим процессом является ассимиляция углекислого газа микроорганизмами, находящимися в верхнем слое океана.

Рис. 2, б показывает, что концентрация метана в пограничном слое (> 2040 млрд⁻¹) существенно выше, чем в свободной атмосфере (< 1940 млрд⁻¹). При общей тенденции уменьшения содержания метана с запада на восток (рис. 2, б, табл. 2 и 3) выделяется Карское море, где наблюдается его всплеск. Это отчасти подтверждают результаты работы [29]. Однако проведенный нами ранее анализ [21] показал, что в данном случае наблюдался перенос CH_4 с материка на акваторию океана. В доказательство приведем рис. 3 (цв. вкладка), на котором представлен вертикальный разрез распределения концентрации, построенный для прибрежных территорий.

Т а б л и ц а 2

Средние и медианные значения концентрации малых газовых составляющих атмосферы над морями Российского сектора Арктики

Море	Слой, км	CO_2 , млн ⁻¹	CH_4 , млрд ⁻¹	CO , млрд ⁻¹	NO_x , млрд ⁻¹	SO_2 , млрд ⁻¹	O_3 , млрд ⁻¹
<i>Среднее значение \pm СКО</i>							
Баренцево	ПСА < 1,9	$400,1 \pm 4,7$	$2009,1 \pm 31,2$	89 ± 18	$0,68 \pm 0,22$	$0,55 \pm 0,22$	32 ± 13
	СТ > 1,9	$411,4 \pm 1,4$	$1932,7 \pm 10,7$	95 ± 20	$0,42 \pm 0,12$	$0,39 \pm 0,13$	54 ± 6
Карское	ПСА < 1,8	$405,6 \pm 2,9$	$2065,4 \pm 35,5$	112 ± 17	$0,56 \pm 0,18$	$0,43 \pm 0,10$	28 ± 10
	СТ > 1,8	$411,8 \pm 1,2$	$1937,8 \pm 24,2$	94 ± 19	$0,34 \pm 0,13$	$0,35 \pm 0,08$	53 ± 6
Лаптевых	ПСА < 1,6	$407,8 \pm 1,6$	$2003,7 \pm 21,1$	106 ± 18	$0,27 \pm 0,07$	$0,36 \pm 0,08$	33 ± 9
	СТ > 1,6	$410,6 \pm 1,6$	$1942,4 \pm 15,3$	90 ± 18	$0,28 \pm 0,08$	$0,37 \pm 0,07$	53 ± 7
Восточно-Сибирское	ПСА < 1,8	$409,2 \pm 0,8$	$2006,7 \pm 13,5$	104 ± 16	$0,29 \pm 0,07$	$0,42 \pm 0,07$	31 ± 5
	СТ > 1,8	$408,3 \pm 1,0$	$1950,0 \pm 13,8$	87 ± 16	$0,24 \pm 0,05$	$0,41 \pm 0,08$	43 ± 6
Чукотское	ПСА < 1,3	$409,6 \pm 2,1$	$1998,4 \pm 17,5$	96 ± 14	$0,26 \pm 0,04$	$0,39 \pm 0,08$	31 ± 4
	СТ > 1,3	$409,5 \pm 2,1$	$1947,8 \pm 9,90$	88 ± 17	$0,26 \pm 0,09$	$0,38 \pm 0,08$	46 ± 8
<i>Медианное значение (МКР)</i>							
Баренцево	ПСА < 1,9	397,4 (7,4)	2018,2 (51,2)	89 (24)	0,60 (0,39)	0,50 (0,18)	26 (18)
	СТ > 1,9	411,5 (1,7)	1930,1 (10,6)	95 (24)	0,42 (0,14)	0,38 (0,11)	54 (7)
Карское	ПСА < 1,8	406,2 (3,4)	2084,6 (36,3)	111 (23)	0,48 (0,21)	0,44 (0,13)	23 (12)
	СТ > 1,8	411,9 (1,5)	1934,0 (31,8)	94 (25)	0,34 (0,16)	0,35 (0,10)	53 (8)
Лаптевых	ПСА < 1,6	407,5 (2,8)	2006,4 (34,2)	106 (25)	0,26 (0,05)	0,36 (0,11)	32 (13)
	СТ > 1,6	410,7 (2,3)	1943,1 (21,1)	89 (24)	0,28 (0,11)	0,37 (0,09)	54 (10)
Восточно-Сибирское	ПСА < 1,8	409,2 (0,6)	2012,1 (6,6)	105 (23)	0,27 (0,11)	0,41 (0,10)	29 (2)
	СТ > 1,8	408,7 (1,4)	1952,1 (18,3)	87 (22)	0,25 (0,07)	0,41 (0,11)	45 (10)
Чукотское	ПСА < 1,3	409,3 (4,0)	2002,7 (28,4)	97 (19)	0,26 (0,05)	0,38 (0,13)	31 (7)
	СТ > 1,3	409,4 (3,7)	1943,5 (14,6)	87 (19)	0,26 (0,13)	0,38 (0,11)	49 (11)

Примечание: ПСА – пограничный слой атмосферы; СТ – свободная тропосфера; МКР – межквартильный размах.

Таблица 3

Средние концентрации газов над арктическими морями на высоте 200 м в зависимости от температуры воды

Море	$T_{\text{воды}}, ^\circ\text{C}$	$\text{CO}_2, \text{млн}^{-1}$	$\text{CH}_4, \text{млрд}^{-1}$
Баренцево	11	$397,2 \pm 0,5$	$2027,4 \pm 10,4$
Карское	8	$406,2 \pm 1,9$	$2088,2 \pm 6,30$
Лаптевых	7	$407,9 \pm 1,6$	$2007,8 \pm 16,8$
Восточно-Сибирское	5	$409,5 \pm 0,4$	$2013,5 \pm 1,50$
Чукотское	4	$410,3 \pm 1,8$	$2003,3 \pm 13,3$

Сопоставление рис. 2, б и рис. 3 показывает, что концентрация метана над побережьем была выше, чем над акваторией Карского моря. Учитывая, что в период эксперимента в этом районе наблюдался юго-западный перенос [20, 21], становится очевидным, что повышение содержания CH_4 над этим морем было вызвано адвекцией воздуха, обогащенного метаном, с заболоченных территорий Западной Сибири.

В пользу такого вывода говорят и концентрации оксида углерода, приведенные на рис. 2, в. Этот газ обычно рассматривается как индикатор антропогенной деятельности или лесных пожаров, которые в данном случае могли быть только на материке. Сравнение рис. 2, б и в выявляет близость зон повышенных концентраций метана и оксида углерода. Сами же концентрации CO (рис. 2, в), так же как и NO_x (рис. 2, г), и SO_2 (рис. 2, д), в Российском секторе Арктики очень низкие (табл. 2), характерные для удаленных фоновых районов [30, 31].

Из рис. 2, г видно, что концентрация оксидов азота над большей частью акватории лежит в пределах $0,2\text{--}0,3 \text{млн}^{-1}$ и только в западной части

повышается до $0,6\text{--}0,7 \text{млн}^{-1}$. Это, скорее всего, отражает поступление данных газов из Западной Европы или с Кольского полуострова.

Концентрация SO_2 над арктическими морями также была невысокой, в пределах $0,3\text{--}0,6 \text{млн}^{-1}$ (рис. 2, д). Распределение этого газа подобно распределениям оксидов азота, что говорит о возможных антропогенных причинах повышения его содержания (см. левую часть рис. 2, д).

Совершенно иначе ведет себя в арктических районах тропосферный озон (рис. 2, е): в пограничном слое его концентрация значительно ниже, чем в свободной тропосфере. А значит, его фотохимическая генерация полностью отсутствует [32]. Поступающий же из стратосферы озон расходуется за счет взаимодействия выделяемых океаном галогенов: фтора и хлора, так называемый эффект истощения [33, 34].

Таким образом, в период эксперимента газовый состав атмосферы над Российским сектором Арктики характеризовался повышенными концентрациями CH_4 и очень низкими значениями содержания CO , NO_x и SO_2 .

2.2. Атмосферный аэрозоль

В табл. 4 приведены средние и медианные значения суммарной счетной концентрации аэрозолей (N_Σ), частиц нуклеационного диапазона размеров ($N_{\text{НУК}}$; $0,003\text{--}0,025 \text{мкм}$), ядер Айткена ($N_{\text{ЯА}}$; $0,025\text{--}0,200 \text{мкм}$), аккумуляционной ($N_{\text{АКМ}}$; $0,25\text{--}1,0 \text{мкм}$) и грубодисперсной ($N_{\text{ГБД}}$; $> 1,0 \text{мкм}$) фракций аэрозоля, которые измерялись над акваториями морей Ледовитого океана в период с 4 по 16.09.2020 г.

Таблица 4

Средние и медианные значения счетной концентрации аэрозолей различных фракций, см^{-3} , над морями Российского сектора Арктики

Море	Слой, км	N_Σ	$N_{\text{НУК}}$	$N_{\text{ЯА}}$	$N_{\text{АКМ}}$	$N_{\text{ГБД}}$
<i>Среднее значение \pm СКО</i>						
Баренцево	ПСА < 1,9	1797 ± 937	464 ± 471	1081 ± 544	290 ± 144	$0,414 \pm 0,291$
	СТ > 1,9	374 ± 302	166 ± 128	162 ± 180	53 ± 105	$0,075 \pm 0,536$
Карское	ПСА < 1,8	2049 ± 700	317 ± 315	1287 ± 484	538 ± 177	$1,295 \pm 2,024$
	СТ > 1,8	370 ± 399	139 ± 172	167 ± 199	88 ± 128	$0,170 \pm 0,919$
Лаптевых	ПСА < 1,6	369 ± 173	83 ± 104	192 ± 64	199 ± 156	$0,473 \pm 1,263$
	СТ > 1,6	350 ± 366	145 ± 239	166 ± 143	48 ± 23	$0,010 \pm 0,027$
Восточно-Сибирское	ПСА < 1,8	570 ± 558	282 ± 302	243 ± 273	177 ± 358	$0,450 \pm 0,831$
	СТ > 1,8	136 ± 50	46 ± 32	66 ± 26	37 ± 9	$0,015 \pm 0,028$
Чукотское	ПСА < 1,3	704 ± 227	273 ± 174	358 ± 114	159 ± 135	$0,927 \pm 0,904$
	СТ > 1,3	213 ± 120	61 ± 73	129 ± 64	27 ± 14	$0,020 \pm 0,066$
<i>Медианное значение (МКР)</i>						
Баренцево	ПСА < 1,9	1603 (1688)	343 (551)	1039 (732)	249 (212)	0,375 (0,375)
	СТ > 1,9	252 (206)	122 (142)	105 (93)	19 (21)	< 0,07
Карское	ПСА < 1,8	1804 (513)	262 (262)	1172 (334)	579 (195)	0,700 (0,500)
	СТ > 1,8	325 (145)	101 (93)	129 (105)	36 (71)	< 0,1
Лаптевых	ПСА < 1,6	324 (148)	54 (56)	179 (49)	120 (154)	0,150 (0,225)
	СТ > 1,6	230 (98)	77 (68)	124 (79)	46 (36)	< 0,01
Восточно-Сибирское	ПСА < 1,8	184 (1016)	94 (475)	80 (243)	54 (121)	0,250 (0,500)
	СТ > 1,8	140 (44)	45 (39)	69 (30)	38 (10)	< 0,01
Чукотское	ПСА < 1,3	710 (342)	246 (327)	336 (158)	108 (162)	0,775 (0,900)
	СТ > 1,3	186 (57)	42 (46)	125 (57)	23 (19)	< 0,1

Вертикальные разрезы распределения концентраций частиц микродисперсной фракции ($N_{\text{МКД}} = N_{\text{НУК}} + N_{\text{ЯА}}$), $N_{\text{АКМ}}$ и $N_{\text{ГБД}}$ представлены на рис. 4 (цв. вкладка).

Данные табл. 4 и рис. 4, а показывают, что для N_{Σ} и $N_{\text{МКД}}$ характерно убывание концентрации с запада на восток. Наибольшие значения в пограничном слое атмосферы наблюдаются над западными морями — Баренцевым и Карским, наименьшие — над Восточно-Сибирским и Чукотским (табл. 4). Для АКМ эта закономерность частично нарушается (рис. 4, б). Наибольшая концентрация наблюдается над Карским морем. Также имеется не очень интенсивный слой внутри пограничного слоя атмосферы над всеми восточными морями (табл. 4). Подобное распределение зафиксировано и для ГБД фракции (табл. 4, рис. 4, в). Вероятно, такое распределение аэрозоля над морями связано с его переносом с прибрежных территорий, поскольку над большинством акваторий морей структура профилей имеет вид, характерный для континентальных районов [24].

Следует отметить, что тенденция уменьшения концентрации аэрозоля в Российском секторе Арктики с запада на восток была ранее зафиксирована в ходе многолетних морских экспедиций [35, 36]. В настоящей работе, в период короткой летней кампании, она подтверждается.

Для отдельных составляющих химического состава аэрозоля таких вертикальных разрезов построить не удастся, так как для анализа нужно накопить необходимое количество вещества, отбираемого на фильтры. Идентифицируемая же по отдельным пробам элементная часть аэрозоля над Арктикой в три-четыре раза больше, чем для ионов. Над всеми морями в состав арктического аэрозоля в основном входят элементы терригенного происхождения Al, Cu, Fe, Si, что свидетельствует о его континентальном происхождении. Над некоторыми морями в составе частиц доминирует Si, вклад которого составляет от 67 до 85%. Анализ обратных траекторий показал, что во всех рассмотренных случаях, зарождался ли аэрозоль над континентом или морем, траектории воздуха проходили над обоими видами подстилающей поверхности. В таком случае образовавшиеся частицы могли обогащаться по пути дополнительными ионами и элементами.

Заключение

Краткосрочность самолетного эксперимента позволила провести сопоставление состава воздуха над всеми морями Российского сектора Арктики. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

Концентрация углекислого газа в свободной тропосфере уменьшается с запада на восток по мере удаления от основных антропогенных источников, расположенных в Западной Европе. Поглощение диоксида углерода океаном в период эксперимента зависело от температуры воды. Эта связь была

положительной, что означает преобладание процессов ассимиляции CO_2 планктоном, а не его растворения в воде.

Для метана такой однозначной тенденции изменения с запада на восток не наблюдается. Наибольшая концентрация CH_4 на высоте 200 м была над Карским морем, наименьшая — над Чукотским. Вертикальное распределение метана говорит о том, что основной его источник находится на подстилающей поверхности (будь то суша или море). Сравнение содержания метана над морем и суши на одной и той же высоте выявило, что в районе Баренцева и Карского морей концентрация была выше над прибрежной территорией, чем над акваторией. Это свидетельствует о том, что это превышение создавалось за счет переноса CH_4 с суши.

Вертикальное распределение озона характеризовалось ростом концентрации с высотой. Это говорит об отсутствии фотохимических процессов в пограничном слое и преобладании поступления озона из стратосферы. Падение концентрации внутри пограничного слоя атмосферы также отражает факт его гибели на галогенах морского происхождения. У остальных измеренных газов концентрации были очень низкими, характерными для удаленных фоновых районов, каковым и является Арктика.

Для счетной концентрации аэрозоля характерно убывание с запада на восток. Наибольшие ее значения наблюдаются над западными морями — Баренцевым и Карским, а наименьшие — над Восточно-Сибирским и Чукотским. В пользу «чистоты» этого региона свидетельствует также факт почти полного отсутствия грубодисперсных частиц выше 2–3 км над всеми морями.

Поскольку такого рода эксперимент является первым в российской истории исследования состава воздуха в атмосфере Арктики, 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 вегетации растительности.

Финансирование. Зондирование атмосферы выполнено на УНУ самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик», созданной в рамках госзадания ИОА СО РАН. Обработка данных и анализ результатов проведены в рамках проекта Министерства науки и высшего образования РФ «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 // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. England: Cambridge University Press, 2021. P. 1–41.
- 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. Art. N 168. DOI: 10.1038/s43247-022-00498-3.
 - 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. DOI: 10.1175/BAMSStateoftheclimate.1.
 - 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., Hünnerbein A., Jafariserajehlou 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., Kretzschmar 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., Nakoudi K., Neggers R., Neuber R., Nomokonova T., Oelker J., Papakonstantinou-Prevelou I., Pätzold F., Pefanis V., Pohl C., van Pinxteren M., Radovan A., Rhein M., Rex M., Richter A., Risse N., Ritter C., Rostovsky 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., Soppa 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., Zannata M., Zeppenfeld S. Atmospheric and surface processes, and feedback mechanisms determining Arctic amplification: A review of first results and prospects of the (AC)³ project // *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 2023. V. 104, N 1. P. E208–E242. DOI: 10.1175/BAMS-D-21-0218.1.
 - 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. 286–289. DOI: 10.1038/nclimate2880.
 - 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. DOI: 10.5194/bg-15-3331-2018.
 - Willis M.D., Leaitch 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. DOI: 10.1029/2018RG000602.
 - 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 // *Biology, Controls and Model Tree Volatile Organic Compound Emissions* / U. Niinemets, R.K. Monson (eds.). Dordrecht: Springer, 2010. P. 489–508.
 - Ивахов В.М., Парамонова Н.Н., Привалов В.И., Зинченко А.В., Лоскутова М.А., Махтас А.П., Кустов В.А., Лаурица Т., Аурела М., Асми Э. Атмосферная концентрация диоксида углерода на станциях Тикси и Мыс Баранова в 2010–2017 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2019. № 4. С. 110–121.
 - 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.
 - Pankratova N., Skorokhod A., Belikov I., Belousov V., Murayeva V., Flint M. Ship-borne observations of atmospheric CH₄ and δ¹³C isotope signature in methane over Arctic seas in summer and autumn 2021 // *Atmosphere.* 2022. V. 13, N 3. P. 458. DOI: 10.3390/atmos13030458.
 - Клепиков А.В. Российские исследования в области полярной метеорологии в 2019–2022 гг. // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2023. Т. 59, № 7. С. 915–929.
 - Kylling A., Zwaafink G.C.D., Stohl A. Mineral dust instantaneous radiative forcing in the Arctic // *Geophys. Res. Lett.* 2018. V. 45, N 9. P. 4290–4298. DOI: 10.1029/2018GL077346.
 - Журавлева Т.Б., Панченко М.В., Козлов В.С., Насртдинов И.М., Польшин В.В., Терпугова С.А., Чернов Д.Г. Модельные оценки динамики вертикальной структуры поглощения солнечного излучения и температурных эффектов в фоновых условиях и экстремально задымленной атмосфере по данным самолетных наблюдений // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 10. С. 834–839. DOI: 10.15372/AOO20171004; Zhuravleva T.B., Panchenko M.V., Kozlov V.S., Nasrtidinov I.M., Pol'kin V.V., Terpugova S.A., Chernov D.G. Model estimates of dynamics of the vertical structure of solar absorption and temperature effects under background conditions and in extremely smoke-laden atmosphere according to data of aircraft observations // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 1. P. 24–30.
 - Burrows J.P., Martin R. Satellite observations of tropospheric trace gases and aerosols. Introduction // *IGAC Newsletter.* 2007. N 35. P. 2–7.
 - Tollefson J. Carbon-sensing satellite system faces high hurdles // *Nature.* 2016. V. 533, N 7604. P. 446–447.
 - Popkin G. Commercial space sensors go high-tech // *Nature.* 2017. V. 545, N 7655. P. 397–398.
 - Costantino L., Cuesta J., Emili E., Coman A., Foret G., Dufour G., Eremenko M., Chailleux Y., Beekmann M., Flaud J.-M. Potential of multispectral synergism for observing ozone pollution by combining IASI-NG and UVNS measurements from the EPS-SG satellite // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10, N 4. P. 1281–1298. DOI: 10.5194/amt-10-1281-2017.
 - Wendisch M., Brenguier J.-L. (eds.). *Airborne Measurements for Environmental Research.* Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013. 655 p.
 - 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., Mikhal'chishin A.V., Moseikin I.A., Nasonov S.V., Nédélec P., Okhlopkova 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. DOI: 10.5194/amt-15-3941-2022.
21. 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., Paris J.-D., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева 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. DOI: 10.15372/AOO20230204; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Guruleva E.V., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Law K., 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. DOI: 10.1134/S1024856023050032.
 22. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ancellet G., Белан Б.Д., Белан С.Б., Гурулева Е.В., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Law K.S., Nédélec Ph., Рассказчикова Т.М., Paris J.-D., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 2. Углекислый газ // *Оптика атмосфер. и океана.* 2023. Т. 36, № 4. С. 280–288. DOI: 10.15372/AOO20230404; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Ancellet G., Belan B.D., Belan S.B., Guruleva 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.
 23. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ancellet G., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Law K.S., Nédélec Ph., Рассказчикова Т.М., Paris J.-D., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Состав воздуха над Российским сектором Арктики. 3. Малые газовые составляющие атмосферы // *Оптика атмосфер. и океана.* 2023. Т. 36, № 11. С. 895–903. DOI: 10.15372/AOO20231104; Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Ancellet G., Belan B.D., Belan S.B., 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: 3 – Trace gases // *Atmos. Ocean. Opt.* 2024. V. 37, N 1. P. 31–47.
 24. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Бердашкинова О.И., Голобокова Л.П., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Онищук Н.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Ходжер Т.В. Состав атмосферы над Российским сектором Арктики в сентябре 2020 г. 4. Атмосферный аэрозоль // *Оптика атмосфер. и океана.* 2024. Т. 37, № 3. С. 214–224. DOI: 10.15372/AOO20240305.
 25. Deutsch C.V., *Journal A.G.* GSLIB – Geostatistical Software Library and User's Guide. New York: Oxford University Press, 1992. 338 p.
 26. 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. DOI: 10.1038/s41586-023-06605-4.
 27. Глинка Н.Л. Общая химия. Л.: Химия, 1985. 702 с.
 28. 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. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.08.017.
 29. Yurganov L., Carroll D., Pnyushkov A., Polyakov I., Zhang H. Ocean stratification and sea–ice cover in Barents and Kara seas modulate sea–air methane flux: Satellite data // *Adv. Polar Sci.* 2021. V. 32, N 2. P. 118–140. DOI: 10.13679/j.advps.2021.0006.
 30. Seinfeld J.H., Pandis S.N. *Chemistry and Physics: From air Pollution to Climate Change.* New Jersey: Wiley, 2006. 1190 p.
 31. 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. DOI: 10.5194/acp-22-11631-2022.
 32. Белан Б.Д. *Озон в тропосфере.* Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
 33. 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. DOI: 10.5194/acp-23-3363-2023.
 34. Fan S.-M., Jacob D. Surface ozone depletion in Arctic spring sustained by bromine reactions on aerosols // *Nature.* 1992. V. 359, N 6395. P. 522–524. DOI: 10.1038/359522a0.
 35. Сакерин С.М., Зенкова П.Н., Кабанов Д.М., Калашникова Д.А., Лисицын А.П., Макаров В.И., Полькин В.В., Попова С.А., Симонова Г.В., Чанкина О.В., Шевченко В.П. Результаты исследований физико-химических характеристик атмосферного аэрозоля в 71-м рейсе НИС «Академик Мстислав Келдыш» // *Оптика атмосфер. и океана.* 2020. Т. 33, № 5. С. 358–367. DOI: 10.15372/AOO20200505; Sakerin S.M., Zenkova P.N., Kabanov D.M., Kalashnikova D.A., Lisitsin A.P., Makarov V.I., Polkin V.V., Popova S.A., Simonova G.V., Chankina O.V., Shevchenko V.P. Results of studying physicochemical characteristics of atmospheric aerosol in the 71st cruise of RV Akademik Mstislav Keldysh // *Atmos. Ocean. Opt.* 2020. V. 33, N 5. P. 470–479.
 36. Голобокова Л.П., Ходжер Т.В., Изосимова О.Н., Зенкова П.Н., Почуфаров А.О., Хуриганова О.И., Онищук Н.А., Маринайте И.И., Полькин В.В., Радионых В.Ф., Сакерин С.М., Лисицын А.П., Шевченко В.П. Химический состав атмосферного аэрозоля в арктическом районе по маршрутам морских экспедиций 2018–2019 гг. // *Оптика атмосфер. и океана.* 2020. Т. 33, № 6. С. 421–429. DOI: 10.15372/AOO20200601; Golobokova L.P., Khodzher T.V., Izosimova O.N., Zenkova P.N., Pochufarov A.O.,

Khuriganova O.I., Onishyuk N.A., Marinayte I.I., Polkin V.V., Radionov V.F., Sakerin S.M., Lisitzin A.P., Shevchenko V.P. Chemical composition of atmospheric

aerosol in the Arctic Region and adjoining seas along the routes of marine expeditions in 2018–2019 // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 5. P. 480–489.

P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, G.A. Ivtsev, A.V. Kozlov, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Complex assessment of air composition over the Russian Arctic in September 2020.**

In the Arctic, climate warming is occurring several times faster than in other regions of the globe. This can be the result of strengthening feedbacks between climate and atmospheric composition. However, there are very few data on changes in the concentration of climatically active substances in this region. Therefore, to fill the gap in data on the vertical distribution of gas and aerosol composition of the air over the Russian Arctic, an airborne survey of the atmosphere and water surface over the all Russian seas of the Arctic Ocean was performed with use of the Tu-134 Optik aircraft laboratory in September 2020. This paper analyzes the spatial distribution of gas and aerosol composition in the Arctic troposphere. It is shown that during the experiment, the CO₂ mixing ratio changed from west to east in the opposite direction in the near-water and boundary layers compared to the free troposphere (FT), namely, it was increasing in the planetary boundary layer (PBL) and was decreasing in the FT. The methane content in the near-water layer decreased in the same direction. Concentrations of CO, NO_x, and SO₂ in the Russian Arctic were very low, which is typical for remote background areas. All aerosol fractions also showed a decrease in their content from west to east.

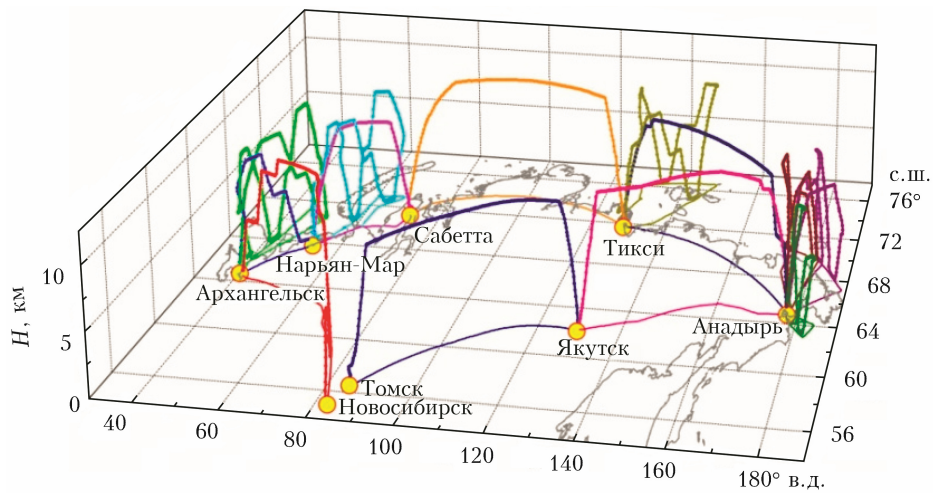


Рис. 1. Схема маршрута авиационной кампании в сентябре 2020 г.

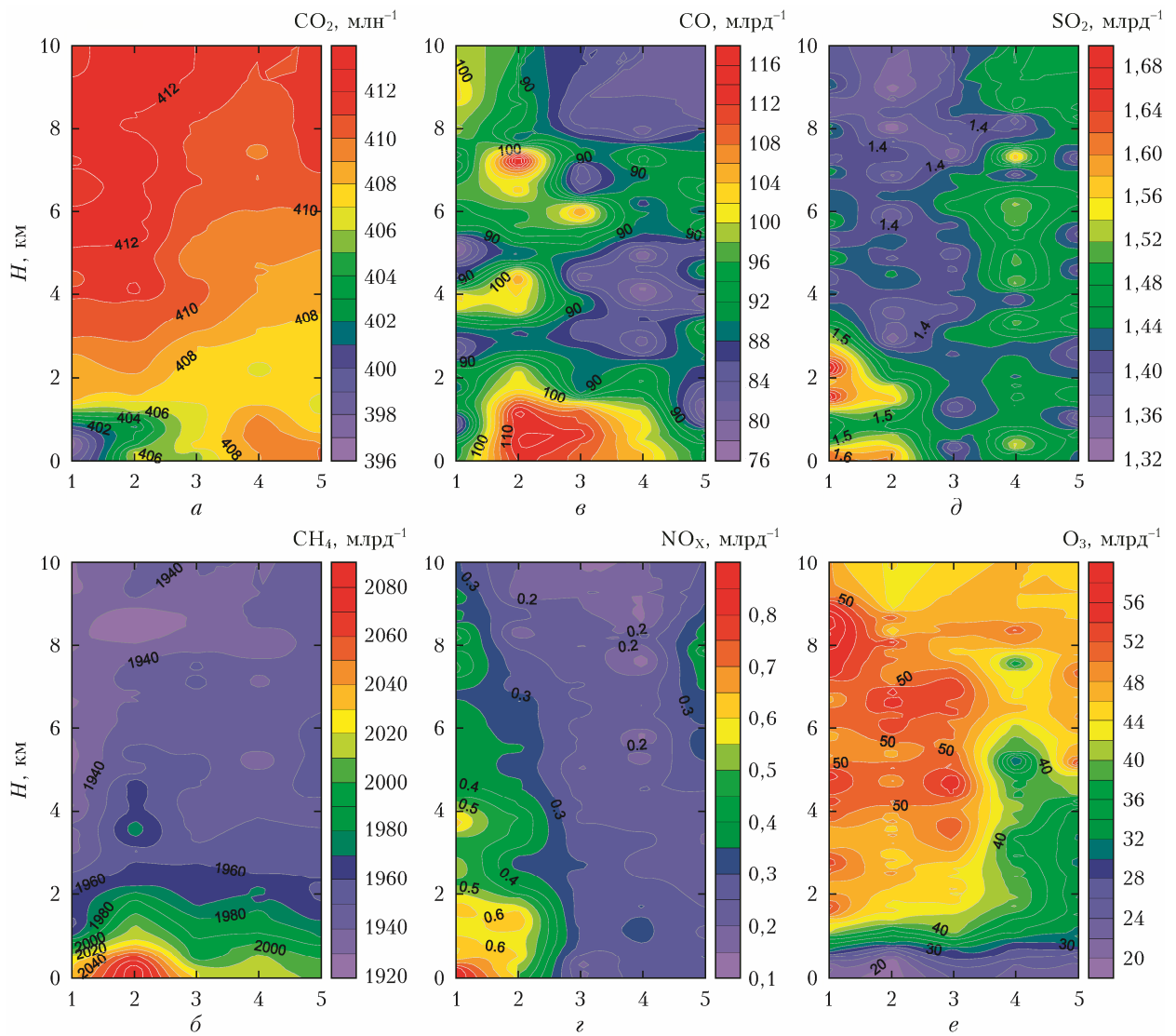


Рис. 2. Вертикальное распределение концентрации малых газовых составляющих над морями Российского сектора Арктики: а – CO_2 ; б – CH_4 ; в – CO ; г – NO_x ; д – SO_2 ; е – O_3 . Здесь и на рис. 4 цифры на оси x: 1 – Баренцево море, 2 – Карское море, 3 – море Лаптевых, 4 – Восточно-Сибирское море, 5 – Чукотское море

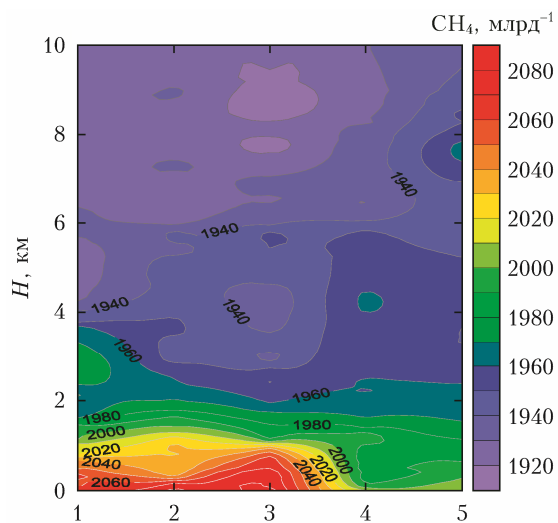


Рис. 3. Вертикальное распределение метана над прибрежными районами Российского сектора Арктики: 1 – Архангельск, 2 – Нарьян-Мар, 3 – Сабетта, 4 – Тикси, 5 – Анадырь

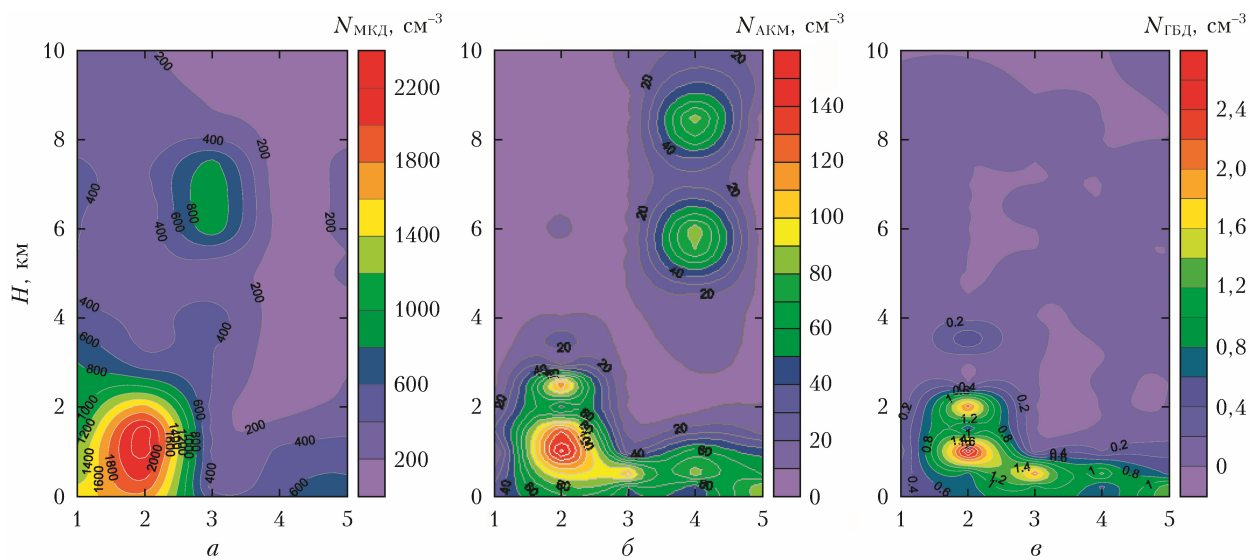


Рис. 4. Вертикальные разрезы распределения концентрации: *a* – МКД; *б* – АКМ; *в* – ГБД фракций аэрозоля над морями Российского сектора Арктики