

УДК 551.510.4: 551.521.3

Исследование динамики концентрации парниковых газов на территории Западной Сибири

О.Ю. Антохина¹, П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹,
Б.Д. Белан¹, С.Б. Белан¹, Д.К. Давыдов¹, Н.В. Дудорова¹, Г.А. Ивлев¹,
А.В. Козлов¹, О.А. Краснов¹, Ш.Ш. Максютлов², Т. Мачида², М.В. Панченко¹,
Д.А. Пестунов¹, Т.М. Рассказчикова¹, Д.Е. Савкин¹, М. Сасакава²,
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

²Национальный институт исследования окружающей среды
16-2 Опогаса, 305-8506, г. Цукуба, Япония

Поступила в редакцию 28.05.2019 г.

По данным многолетних измерений концентрации парниковых газов в приземном слое воздуха и свободной атмосфере определены тренды изменения их концентрации на территории Сибири. Установлено, что скорости роста концентраций CO₂ и CH₄ превышают среднеглобальные, а для NO₂ скорости ниже среднеглобальных.

Ключевые слова: атмосфера, газ, воздух, диоксид углерода, закись азота, метан, озон, примеси, вертикальное распределение; atmosphere, gas, air, carbon dioxide, nitrous oxide, methane, ozone, impurity, vertical distribution.

Введение

Исследования, выполненные к настоящему времени, подтверждают антропогенную природу наблюдающегося глобального потепления [1, 2]. Опубликовано много работ, посвященных наступившим его негативным последствиям. По данным [3], оно значительно влияет на качество жизни населения. В [4, 5] сообщается о проблемах с обеспечением населения продуктами, в [6] — со снижением уровня потребления мяса, что сказывается на популяции населения в отдельных странах [7]. Глобальное потепление благоприятно для развития насекомых-вредителей, существенно уменьшающих урожайность зерновых растений [8], оно вызывает трансформацию лесной растительности и уменьшает биоразнообразие [9, 10]. В условиях потепления меняются характеристики почвы, в частности микропористость, что ведет к нарушению гидрологического режима [11]. Продол-

жается таяние полярных льдов [12–14]. За счет таяния льдов и повышения уровня моря начинается подтопление прибрежных заболоченных мест [15, 16]. Уменьшается биологическая продуктивность океана [17]. По данным МГЭИК [18], допустимый рост температуры воздуха в будущем составлял 2 °С [19–21]. Но наблюдающиеся изменения в окружающей среде заставляют пересмотреть эту величину — она не должна превышать 1,5 °С.

По заключению МГЭИК [18], основной причиной роста глобальной температуры является увеличение выбросов в атмосферу радиационно-значимых примесей воздуха, имеющих антропогенную природу. К основным примесям, вносящим наибольший вклад в увеличение радиационного баланса Земли и, соответственно, температуры воздуха, относятся углекислый газ (CO₂), метан (CH₄) и закись азота (N₂O). Так, например, в 1977 г., когда мировое население было 4,23 млрд человек, эмиссия

* Ольга Юрьевна Антохина (olgayumarchenko@gmail.com); Павел Николаевич Антохин (apn@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); Нина Викторовна Дудорова (unv@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Олег Александрович Краснов (krasnov@iao.ru);

Шамиль Шавратович Максютлов (shamil@nies.go.jp); Тошинобу Мачида (tmachida@nies.go.jp); Михаил Васильевич Панченко (pmv@iao.ru); Дмитрий Александрович Пестунов (pest@iao.ru); Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин (densavkin88@rambler.ru); Мотоки Сасакава (Sasakawa.motoki@nies.go.jp); Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Скляднева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@ipc.tsc.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

CO₂ на душу населения составляла 1,19 т/год [22]. В 2017 г. эмиссия возросла до 1,34 т/год на человека при росте населения земного шара до 7,55 млрд.

Одним из первых обратил внимание на рост содержания CO₂ в атмосфере и необходимость снижения антропогенных выбросов Ч.Д. Килинг, показав, что скорость роста концентрации CO₂ на Южном полюсе соответствует количеству выбросов от сожженного ископаемого топлива во всем мире за год [23]. К 1980-м гг. пришло всеобщее осознание проблем, связанных с изменением климата и ухудшением качества воздуха. В 1989 г. Всемирная метеорологическая организация (ВМО) приняла решение создать Глобальную службу атмосферы – ГСА (Global Atmosphere Watch – GAW), одной из целей которой была организация систематических наблюдений за химическим составом и связанными с ним физическими характеристиками атмосферы [24, 25]. Для того чтобы измерения, проводимые на своих территориях разными странами, можно было сравнивать и использовать в глобальных климатических моделях, в рамках этой программы были выработаны требования к единому временному масштабу, единицам и точности измерения параметров атмосферы [26–28]. При этом ВМО постоянно ужесточает требования к точности измерений, прежде всего концентрации основных парниковых газов [29] и метеорологических величин [30]. Сеть станций ГСА ВМО состоит из 31 станции глобального уровня и более 400 станций регионального уровня. Большинство станций обоих уровней содержатся за счет средств национальных агентств, метеорологических служб или научно-исследовательских организаций. Сначала сеть предназначалась для контроля реактивных газов. Затем ее станции начали оснащаться датчиками парниковых газов [31].

В 2012 г. на территории России находилось 40 станций ГСА регионального уровня, в том числе 2 станции мониторинга парниковых газов, 10 – химического состава атмосферных осадков и 28 – наблюдений за общим содержанием озона. Что касается фоновых мониторингов состава атмосферы, то, согласно докладу, представленному в рамках четвертого национального собрания РФ, в конце 1970-х – начале 1980-х гг. на территории бывшего СССР была сформирована система комплексного фонового мониторинга (СКФМ). Важная часть программы СКФМ – измерения газовых и аэрозольных составляющих атмосферы [32]. В 2012 г. на территории РФ наблюдения за фоновым загрязнением атмосферного воздуха проводились на четырех станциях СКФМ, обеспечивая необходимый объем информации только для составления картины регионального фонового загрязнения атмосферы в центральных районах европейской территории России [33]. Территория Сибири, занимая около 10% суши, практически не охвачена современной наблюдательной сетью, что затрудняет диагностику и прогнозирование глобальных климатических изменений. Поэтому для исследования радиационно-значимых компонентов воздуха сначала нужно было создать соответствующий инструментарий.

В настоящей работе дано описание созданной Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА) СО РАН и Национальным институтом исследования окружающей среды (NIES, Цукуба, Япония) многоуровневой системы мониторинга состава воздуха на территории Сибирского региона, приводятся основные полученные результаты.

Система мониторинга состава воздуха на территории Сибири

Для изучения поведения радиационно-активных примесей в атмосфере ИОА СО РАН совместно с NIES была создана многоуровневая система мониторинга, охватывающая значительную часть территории Сибири. Она состоит из стационарных и мобильных измерительных комплексов, схематически изображенных на рис. 1 (цв. вкладка). Исторически первой была TOR-станция, созданная в рамках проекта Tropospheric Ozone Research программы EUROTRAC. Регулярные измерения на ней начались в декабре 1992 г. Расположена станция на северо-восточной окраине томского Академгородка в здании Сибирской лидарной станции ИОА СО РАН. Измерения на TOR-станции проводятся в круглосуточном режиме. Динамику развития набора измеряемых параметров на станции можно проследить по публикациям [34–36].

В 2009 г. были запущены станции комплексного мониторинга состава атмосферы, расположенные на территории обсерваторий «Фоновая» и БЭК. Оба комплекса представляют собой вантовые мачты «Унжа-2», на которых размещены метеорологические датчики и пробоотборники малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, рядом с комплексами находятся помещения для оборудования. Для более точного определения стратификации атмосферы метеорологические датчики установлены на четырех уровнях, а расположение пробоотборников МГС на двух уровнях позволяет не только определять концентрации газов, но и выявлять вертикальные градиенты концентраций, отражающие влияние удаленных и местных источников. Организация измерений на постах описана в [37–39].

В 2002 г. началось развертывание сети постов мониторинга парниковых газов, впоследствии получившей название JR-Station. К 2008 г. она состояла уже из восьми постов [40], каждый из которых представляет собой стационарную мачту, оснащенную стандартным набором метеорологических датчиков и контейнером с идентичным оборудованием для газоанализа. Для исследования вертикальных градиентов отбор проб ведется на двух высотных уровнях, причем нижние воздухозаборники всегда располагаются над верхним срезом окружающей растительности во избежание излишнего влияния подстилающей поверхности.

Для пространственного изучения параметров атмосферы в ИОА СО РАН на протяжении уже почти сорока лет активно применяются самолеты-

лаборатории. В 1970–1980 гг. использовались самолеты-лаборатории на базе Ил-14ФКМ [41]. В середине 1980-х гг. параллельно с Ил-14ФКМ для оптико-метеорологического и экологического зондирования атмосферы и подстилающей поверхности стали использовать самолет-лабораторию «Оптик-Э», созданный на базе Ан-30 [42–46]. В начале 2000-х гг. для исследования пограничного слоя атмосферы была создана летающая лаборатория на базе самолета Ан-2 [47]. И наконец, в связи с тем, что у носителя Ан-30 закончился эксплуатационный ресурс, в 2011 г. был создан самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» на базе Ту-134А-3М [48].

В связи с возникающей необходимостью проведения эпизодических измерений качества воздуха в городе и его окрестностях в 2004 г. в ИОА СО РАН была создана мобильная станция АКВ-2 на базе автомобиля ГАЗ-66-КУНГ с возможностью проведения измерений как в стационарном положении, так и во время движения [49].

Результаты исследований

Основной целью мониторинга концентрации парниковых газов является определение тенденций их изменения как в приземном слое воздуха, так и в свободной атмосфере, поскольку знак и величина изменения концентраций — это базовые параметры для прогноза возможных изменений климата.

Для определения многолетних тенденций изменения концентраций парниковых газов в приземном слое атмосферы Западной Сибири на первом этапе весь ряд данных подвергся первичной фильтрации путем извлечения из него дневных значений концентрации, когда пограничный слой атмосферы достаточно хорошо перемешан. Для измерений был выбран интервал с 13:00 до 17:00 по местному времени [40]. На втором этапе из полученного ряда данных для этого временного интервала исключались те значения, при которых разница между ежечасными измерениями превышала, например для CO_2 , 10 млн^{-1} . Затем производился расчет средних дневных значений концентрации.

Данные измерений в приземном слое показывают, что концентрация CO_2 и CH_4 растет по всей территории Сибири так же, как и в опорных международных пунктах (табл. 1).

Из данных табл. 1 видно, что только в одном пункте (Березоречка) тренд концентрации CO_2 меньше среднеглобального [50]. Особенно интенсивно возрастает содержание углекислого газа над юго-западными (степными) районами Сибири (Азово, Ваганово).

Такие же тенденции в изменении парниковых газов наблюдаются и в свободной атмосфере из самолетных данных. В случае самолетных наблюдений нет необходимости проведения предварительной выборки, как для приземного слоя, так как измерения вертикального распределения парниковых газов проводятся раз в месяц с 13:00 до 15:00 по местному времени. Анализ временных рядов дневной концентрации парниковых газов проводился с использованием программы CCGCRV, находящейся в свободном доступе на сайте NOAA [51], работа которой основана на методе, предложенном Тонингом и соавторами [52, 53]. Согласно сравнительному анализу трех программ [54], широко используемых в настоящее время для аппроксимации (HPspline, STL и CCGCRV), для анализа межгодовой изменчивости, многолетних трендов и сезонных циклов рекомендуется использовать именно CCGCRV.

На рис. 2 приведены данные многолетнего изменения концентрации углекислого газа над указанным районом на высотах 0,5; 3,0 и 7,0 км, выбранных, исходя из предположения, что уровень 0,5 км отражает действие местных источников и стоков, концентрация на высоте 3,0 км определяется взаимодействием региональных факторов, а уровень 7,0 км соответствует глобальному фону.

Из данных на рис. 2 видно, что концентрация CO_2 в период с 1997 по 2018 г. на всех высотах возрастает. Однако в ее росте имеется особенность на высоте 0,5 км в летний период. С 1997 по 2004 г. значения летних минимумов на этом уровне изменялись незначительно, а с 2005 г. начался их рост, даже более интенсивный, чем на высотах 3,0 и 7,0 км. Эти особенности были рассмотрены нами в [55].

Таблица 1

Тренды роста концентраций углекислого газа и метана на территории Западной Сибири и обсерваторий Мауна-Лоа и Барроу (ESRL NOAA)

Пункт (координаты)	Тренд		Период
	CO_2 , $\text{млн}^{-1}/\text{год}$	CH_4 , $\text{млрд}^{-1}/\text{год}$	
Мауна-Лоа* (19°32' с.ш., 155°35' з.д.)	2,19	6,4	2004–2018
Барроу* (71°19' с.ш., 156°37' з.д.)	2,18	6,4	2004–2018
Березоречка (56°09' с.ш., 84°20' в.д.)	2,13	7,7	2004–2018
Карасевое (58°15' с.ш., 82°25' в.д.)	2,23	5,7	2005–2018
Ноябрьск (63°27' с.ш., 75°46' в.д.)	2,24	7,2	2006–2018
Демьянское (59°47' с.ш., 70°52' в.д.)	2,32	7,8	2006–2018
Азово (54°42' с.ш., 73°02' в.д.)	2,41	12,0	2006–2018
Ваганово (54°30' с.ш., 62°19' в.д.)	2,45	12,1	2009–2018
Фоновая (56°25' с.ш., 84°04' в.д.)	2,28	16,3	2009–2018

* Из баз данных ESRL NOAA [50].

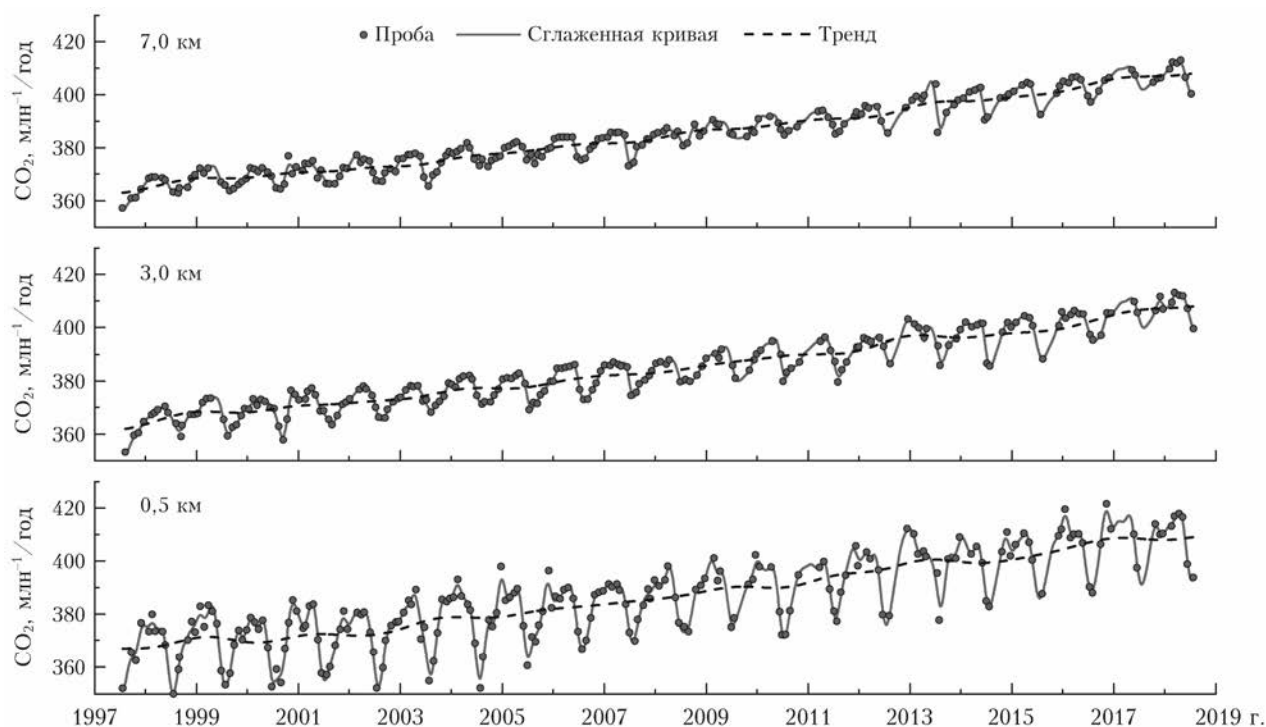


Рис. 2. Концентрация CO₂ на высотах 0,5; 3,0 и 7,0 км над юго-западной частью Западной Сибири

Проанализируем полученные ряды с помощью метода Тонинга. Для этого обратимся к скорости роста (GR) концентрации CO₂ на разных высотах в тропосфере над юго-западной частью Западной Сибири, представленным на рис. 3 (цв. вкладка), где для сравнения также приведены скорости роста, рассчитанные по данным наблюдений обсерватории Мауна-Лоа (MLO), и среднеглобальные концентрации CO₂ [55]. Видно, что картина многолетних изменений значений GR имеет волнообразный характер с периодом колебаний около 2–3 лет. Такая периодичность изменений GR была замечена достаточно давно, и чаще всего ее связывают с явлением Эль-Ниньо, поскольку была найдена значимая корреляция между изменениями GR и индексом Южной осцилляции. Наибольшие амплитуды изменений, достигающие порой приблизительно $-4-8$ млн⁻¹/год, наблюдаются в нижней атмосфере (0–3 км). В верхней тропосфере колебания значений GR близки к наблюдаемым в глобальном масштабе и в обсерватории Мауна-Лоа. Средние значения GR за период 1997–2018 гг. и линейные тренды, рассчитанные из представленных на рис. 2 данных, приведены в табл. 2.

На рис. 4 представлен многолетний ход и линия тренда концентрации CH₄ на разных высотах в тропосфере над южной частью Западной Сибири. Так же как и на глобальном уровне, концентрация CH₄ на всех высотах в тропосфере демонстрирует возрастающий тренд с периодом стагнации (2000–2006 гг.), причины которого обсуждаются в последние годы многими авторами [56–58]. Период стагнации и дальнейший рост концентрации CH₄, наблюдаемый повсеместно, могут быть связаны

Таблица 2

Средние значения GR и линейные тренды увеличения концентрации CO₂ в тропосфере над юго-западной частью Западной Сибири за период 1997–2018 гг. (млн⁻¹/год)

Высота, км	\overline{GR}	Тренд
7,0	2,14	2,09
5,5	2,15	2,07
4,0	2,11	2,07
3,0	2,20	2,08
2,0	2,14	2,07
1,5	2,06	2,08
1,0	2,08	2,14
0,5	2,01	2,14
В среднем в слое 0–7 км	2,11	2,09
MLO (3,4 км)	2,10	2,10
Среднеглобальный (у.м.)	2,12	2,06

с временным изменением мощности первичных источников (сельского хозяйства, свалок, болот и сжигания топлива), поскольку роль процессов стока пока остается малоисследованной из-за недостаточной количественной оценки межгодовых и междекадных изменений концентрации ОН [59].

Накопленные нами ряды данных наблюдений позволяют сделать некоторые выводы. Более высокие концентрации CH₄ наблюдаются в нижней тропосфере и проявляют наибольшую изменчивость вследствие мощной эмиссии от земной поверхности. Из-за того что возобновление роста содержания метана началось с 2007 г., а до этого наблюдалась относительная стагнация, для расчета трендов мы разбили ряд данных на два периода: 1997–2006 и 2007–2018 гг. включительно (табл. 3).

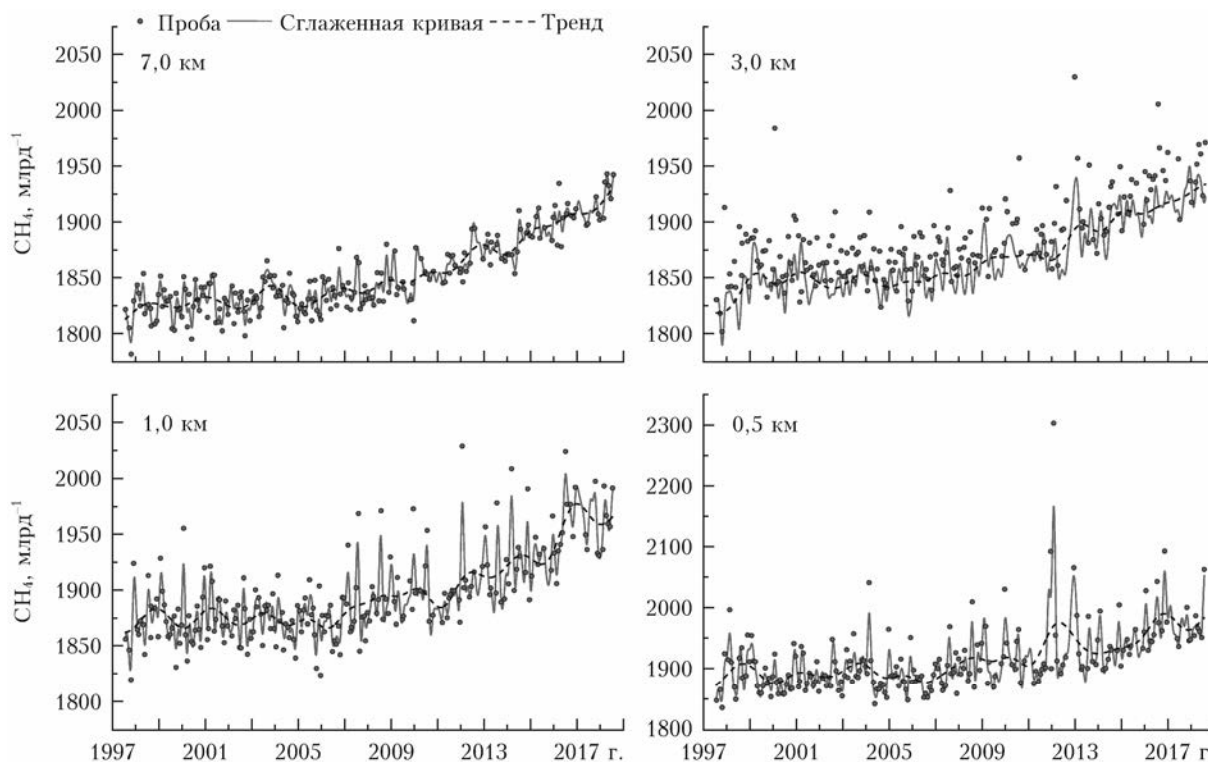


Рис. 4. Многолетний ход концентрации CH_4 на разных высотах в тропосфере над юго-западной частью Западной Сибири

Таблица 3
Линейные тренды увеличения концентрации CH_4 и средние значения GR в тропосфере над юго-западной частью Западной Сибири за период 1997–2018 гг. (млрд⁻¹/год)

Высота, км	Тренд (1997–2006)	Тренд (2007–2018)	$\overline{\text{GR}}$ (1997–2018)
7,0	+1,4	+7,6	+5,6
5,5	+0,8	+7,0	+4,4
4,0	+1,5	+6,7	+5,1
3,0	+1,2	+7,2	+5,5
2,0	+0,4	+7,7	+5,3
1,5	+0,1	+6,9	+5,1
1,0	-0,4	+7,9	+4,9
0,5	-0,7	+6,9	+5,2
В среднем в слое 0–7 км	+0,5	+7,2	+5,1

Из табл. 3 следует, что до 2006 г. наблюдались небольшие (в слое 1,5–7,0 км) и даже отрицательные (в слое 0,5–1,0 км) линейные тренды, после чего восстановился рост концентрации с усредненным по всему тропосферному слою от 0,5 до 7,0 км трендом, равным +7,2 млрд⁻¹/год. С другой стороны, темпы роста, наблюдаемые в нижней тропосфере Сибири, имеют несколько отличную от темпов, полученных на наблюдательной сети NOAA [60], тенденцию, с гораздо большей межгодовой изменчивостью. Так же как и в случае с CO_2 , это обусловлено сильным влиянием наземных источников в районе проведения полетов, тогда как подавляющая часть станций сети NOAA расположена вблизи побережья океанов.

Многолетние вариации и линии тренда концентрации N_2O на разных высотах в тропосфере над юго-западной частью Западной Сибири приведены на рис. 5. Поскольку в тропосфере практически отсутствуют механизмы интенсивного стока N_2O , время его жизни в атмосфере составляет (116 ± 9) лет [61].

На рис. 5 видно, что концентрация N_2O в слое 0,5–7,0 км незначительно изменяется с высотой. Если обратиться к концентрации N_2O , то можно заметить, что в 2001, 2002 и 2015 гг. наблюдалась ее некоторая стабилизация, причем на всех высотах. В остальное же время многолетний тренд ее изменения был практически линейным. Вариации GR и тренды концентрации N_2O приведены в табл. 4.

Таблица 4
Средние значения GR и линейные тренды увеличения концентрации N_2O в тропосфере над юго-западной частью Западной Сибири за период 1997–2018 гг. (млрд⁻¹/год)

Высота, км	$\overline{\text{GR}}$	Тренд
7,0	0,83	0,79
5,5	0,81	0,77
4,0	0,85	0,80
3,0	0,85	0,78
2,0	0,85	0,78
1,5	0,84	0,78
1,0	0,81	0,77
0,5	0,83	0,77
В среднем в слое 0–7 км	0,83	0,78

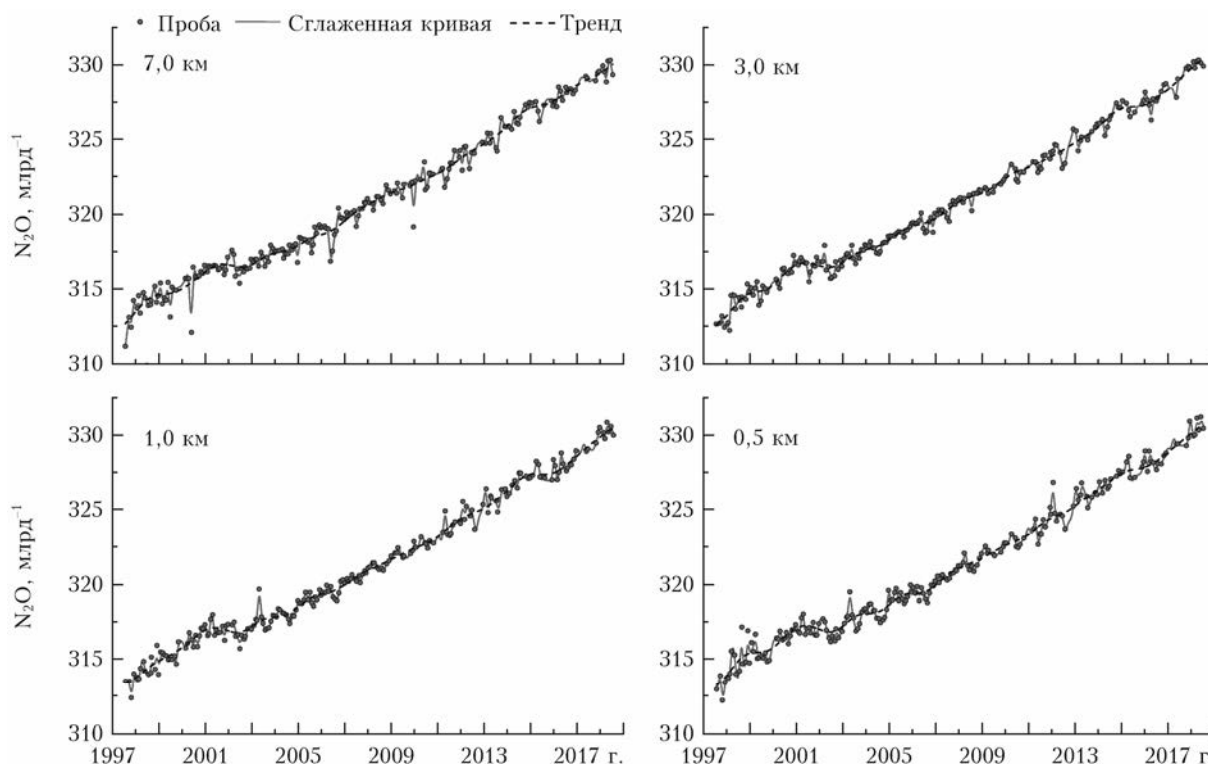


Рис. 5. Многолетний ход концентрации N_2O на разных высотах в тропосфере над юго-западной частью Западной Сибири

Обычно снижение концентрации N_2O является индикатором стратосферно-тропосферного обмена (СТО) [62], поэтому период локальной стагнации N_2O в 2001, 2002 и 2015 гг., скорее всего, был вызван усилением СТО, что привело к глубокому проникновению стратосферного воздуха в тропосферу за счет развитого в летние месяцы конвективного перемешивания. Так, снижение концентрации N_2O в 2001 и 2002 гг. наблюдалось над многими районами, в том числе и во всей толще тропосферы над Сургутом [63].

В среднем же линейный тренд изменения концентрации азота в тропосфере сибирского региона за период с 1997 по 2018 г. составил $0,78 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$, что несколько ниже среднеглобального значения, наблюдавшегося в последние 10 лет [64].

Заключение

На основании данных многолетнего мониторинга установлено, что концентрация парниковых газов возрастает на территории Сибири как в приземном слое воздуха, так и в свободной атмосфере.

Тренд концентрации CO_2 в приземном слое воздуха изменяется по территории Сибири от 2,13 до 2,45 $\text{млн}^{-1}/\text{год}$, метана — от 5,7 до 16,3 $\text{млрд}^{-1}/\text{год}$.

Увеличение концентрации парниковых газов в свободной атмосфере происходит с меньшей скоростью. Для CO_2 средний тренд в слое от 0,5 до 7,0 км составляет 2,09 $\text{млн}^{-1}/\text{год}$ и изменяется на разных высотах от 2,07 до 2,14 $\text{млн}^{-1}/\text{год}$. Концентрация метана возрастает в среднем в слое 0,5–7,0 км

со скоростью 5,1 $\text{млрд}^{-1}/\text{год}$. Эта скорость колеблется по высотам от 4,4 до 5,6 $\text{млрд}^{-1}/\text{год}$. Концентрация азота также растет на всех высотах в среднем с трендом $0,78 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$. Величина тренда не сильно изменяется с высотой — от 0,77 до 0,80 $\text{млрд}^{-1}/\text{год}$.

Тренды на территории Сибири превышают среднеглобальные темпы по CO_2 и CH_4 , но оказываются меньше для N_2O .

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН (№ АААА-А17-117021310142-5), при поддержке Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии и ФЦП (соглашение № 14.613.21.0082, идентификатор RFMEF161317X0082).

1. *Randel W.J.* The seasonal fingerprint of climate change // *Science*. 2018. V. 361, N 6399. P. 227–228.
2. *Santer B.D., Po-Chedley S., Zelinka M.D., Cvijanovic I., Bonfils C., Durack P.J., Fu Q., Kiehl J., Mears C., Painter J., Pallotta G., Solomon S., Wentz F.J., Zou C.-Z.* Human influence on the seasonal cycle of tropospheric temperature // *Science*. 2018. V. 361. eaas 8806. 12 p.
3. *Bonan G.B., Doney S.C.* Climate, ecosystems, and planetary futures: The challenge to predict life in Earth system models // *Science*. 2018. V. 359, N 6375. eaam 8328. 9 p.
4. *Fischer G.* Transforming the global food system // *Nature*. 2018. V. 562, N 7728. P. 501–502.
5. *Springmann M., Clark M., Mason-D'croz D., Wiebe K., Bodirsky B.L., Lassaletta L., de Vries W., Vermeulen S.J., Herrero M., Carlson K.M., Jonell M., Troell M., Declerck F., Gordon L.J., Zurayk R., Scarborough P.,*

- Rayner M., Loken B., Fanzo J., Godfray H.C.J., Tilman D., Rockström J., Willett W. Options for keeping the food system within environmental limits // *Nature*. 2018. V. 562, N 7728. P. 519–525.
6. Godfray H.C.J., Aveyard P., Garnett T., Hall J.W., Key T.J., Lorimer J., Pierrehumbert R.T., Scarborough P., Springmann M., Jebb S.A. Meat consumption, health, and the environment // *Science*. 2018. V. 361, N 6399. eeam 5324. 8 p.
 7. Bongaarts J., O'Neill B.C. Global warming policy: Is population left out in the cold? // *Science*. 2018. V. 361, N 6403. P. 650–652.
 8. Deutsch C.A., Tewksbury J.J., Tigchelaar M., Battisti D.S., Merrill S.C., Huey R.B., Naylor R.L. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate // *Science*. 2018. V. 361, N 6405. P. 916–919.
 9. Nolan N., Overpeck J.T., Allen J.R.M., Anderson P.M., Betancourt J.L., Binney H.A., Brewer S., Bush M.B., Chase B.M., Cheddadi R., Djamali M., Dodson J., Edwards M.E., Gosling W.D., Haberle S., Hotchkiss S.C., Huntley B., Ivory S.J., Kershaw A.P., Kim S.-H., Latorre C., Leydet M., Lézine A.-M., Liu K.-B., Liu Y., Lozhkin A.V., McGlone M.S., Marchant R.A., Momohara A., Moreno P.I., Müller S., Otto-Bliesner B.L., Shen C., Stevenson J., Takahara H., Tarasov P.E., Tipton J., Vincens A., Weng C., Xu Q., Zheng Z., Jackson S.T. Past and future global transformation of terrestrial ecosystems under climate change // *Science*. 2018. V. 361, N 6405. P. 920–923.
 10. Fadrique B., Báez S., Duque A., Malizia A., Blundo C., Carilla J., Osinaga-Acosta O., Malizia L., Silman M., Farfán-Rios W., Malhi Y., Young K.R., Cuesta F., Homeier J., Peralvo M., Pinto E., Jadan O., Aguirre N., Aguirre Z., Feeley K.J. Widespread but heterogeneous responses of Andean forests to climate change // *Nature*. 2018. V. 564, N 7735. P. 207–212.
 11. Hirmas D.R., Giménez D., Nemes A., Kerry R., Brunzell N.A., Wilson C.J. Climate-induced changes in continental-scale soil macroporosity may intensify water cycle // *Nature*. 2018. V. 561, N 7721. P. 100–103.
 12. Seroussi H. Fate and future role of polar ice sheets // *Nature*. 2019. V. 566, N 7742. P. 48–49.
 13. Edwards T.L., Brandon M.A., Durand G., Edwards N.R., Golledge N.R., Holden P.B., Nias I.J., Payne A.J., Ritz C., Wernecke A. Revisiting Antarctic ice loss due to marine ice-cliff instability // *Nature*. 2019. V. 566, N 7742. P. 58–64.
 14. Golledge N.R., Keller E.D., Gomez N., Naughten K.A., Bernales J., Trusel L.D., Edwards T.L. Global environmental consequences of twenty-first-century ice-sheet melt // *Nature*. 2019. V. 566, N 7742. P. 65–72.
 15. Woodruff J.D. The future of tidal wetlands is in our hands // *Nature*. 2018. V. 561, N 7722. P. 183–185.
 16. Schuerch M., Spencer T., Temmerman S., Kirwan M.L., Wolff C., Lincke D., McOwen C.J., Pickering M.D., Reef R., Vafeidis A.T., Hinkel J., Nicholls R.J., Brown S. Future response of global coastal wetlands to sea-level rise // *Nature*. 2018. V. 561, N 7722. P. 231–234.
 17. Moore J.K., Fu W., Primeau F., Britten G.L., Lindsay K., Long M., Doney S.C., Mahowald N., Hoffman F., Randerson J.T. Sustained climate warming drives declining marine biological productivity // *Science*. 2018. V. 359, N 6680. P. 1139–1143.
 18. МГЭИК, 2013 г.: Резюме для политиков. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / под ред. Т.Ф. Стоккер, Д. Цинь, Дж.-К. Платтнер, М. Тигнор, С.К. Аллен, Дж. Бошунг, А. Науэлс, Ю. Ся, В. Бекс, П.М. Миддлей // *Изменение климата. Кембридж Университи Пресс, Кембридж, Соединенное Королевство, Нью-Йорк, США*. 2013. 44 с.
 19. Seneviratne S.I., Rogelj J., Séférian R., Wartenburger R., Allen M.R., Cain M., Millar R.J., Ebi K.L., Ellis N., Hoegh-Guldberg O., Payne A.J., Schleussner C.-F., Tschakert P., Warren R.F. The many possible climates from the Paris Agreement's aim of 1.5 °C warming // *Nature*. 2018. V. 558, N 7708. P. 41–49.
 20. Burke M., Davis W.M., Diffenbaugh N.S. Large potential reduction in economic damages under UN mitigation targets // *Nature*. 2018. V. 557, N 7706. P. 549–553.
 21. Warren R., Price J., Graham E., Forstenhaeusler N., VanDerWal J. The projected effect on insects, vertebrates, and plants of limiting global warming to 1.5 °C rather than 2 °C // *Science*. 2018. V. 360, N 6390. P. 791–795.
 22. Marland G., Oda T., Boden T.A. Cut emissions per capita to 1955 levels // *Nature*. 2019. V. 565, N 7741. P. 567.
 23. Keeling C.D. The concentration and isotopic abundances of carbon dioxide in the atmosphere // *Tellus*. 1960. V. 12, N 2. P. 200–203. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1960.tb01300.x.
 24. Schultz M.G., Akimoto H., Bottenheim J., Buchmann B., Galbally I.E., Gilje S., Helmig D., Koide H., Lewis A.C., Novelli P.C., Plass-Dülmer C., Ryerson T.B., Steinbacher M., Steinbrecher R., Tarasova O., Tørseth K., Thouret V., Zellweger C. The Global Atmosphere Watch reactive gases measurement network // *Elementa: Science of the Anthropocene*. 2015. V. 3, N 000067. DOI: 10.12952/journal.elementa.000067elementascience.org.
 25. WMO Global Atmosphere Watch (GAW) Implementation Plan: 2016–2023: Report N 228. Geneva, Switzerland: WMO, 2017. 75 p.
 26. WMO Guidelines for Continuous Measurements of Ozone in the Troposphere: GAW Report N 209. 2013. 80 p.
 27. WMO Guidelines for the Measurement of Atmospheric Carbon Monoxide: GAW Report N 192. 2010. 49 p.
 28. A WMO/GAW Expert Workshop on Global Long-term Measurements of Nitrogen Oxides and Recommendations for GAW Nitrogen Oxides Network: GAW Report N 195. Germany, 2011. 45 p.
 29. 18th WMO/IAEA Meeting of Experts on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases and Related Tracers Measurement Techniques (GGMT-2015): GAW Report N 229. Geneva, Switzerland: WMO, 2016. 137 p.
 30. WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: GAW Report N 8. 2014. 1127 p.
 31. Fang S.X., Zhou L.X., Tans P.P., Ciais P., Steinbacher M., Xu L., Luan T. In situ measurement of atmospheric CO₂ at the four WMO/GAW stations in China // *Atmos. Chem. Phys.* 2014. V. 14, N 5. P. 2541–2554.
 32. Четвертое национальное сообщение Рамочной Конвенции ООН об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола / под ред. Ю.А. Израэля, А.И. Нахутина, С.М. Семенова, В.П. Седякина, Е.М. Артемова, Г.В. Груза, Ю.А. Анохина, А.Ф. Яковлева, В.И. Егорова, Л.И. Болтневой, М.Л. Гитарского, Р.Т. Карабань, А.А. Романовской, А.Е. Кухта // *Доклад о глобальных системах наблюдения за изменением климата*. М., 2006. 164 с.
 33. Обзор состояния и загрязнения окружающей среды в Российской Федерации за 2012 год / под ред. Ю.А. Израэля, Г.М. Черногаевой, Р.Н. Шпаковой, Ю.В. Пешкова, М.Г. Котляковой, Т.А. Красильниковой. М.: Росгидромет, 2013. 178 с.
 34. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Зуев В.В., Зуев В.Е., Ковалевский В.К., Лиготский А.В., Мелешкин В.Е.,

- Панченко М.В., Покровский Е.В., Рогов А.Н., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н. TOR-станция мониторинга атмосферных параметров // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1085–1092.
35. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ковалевский В.К., Плотников А.П., Покровский Е.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н. Автоматический пост для контроля качества воздуха // Метеорол. и гидрол. 1999. № 3. С. 110–118.
36. 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., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофанов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет TOR-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., Akhlyostin 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., Sklyadnueva 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.
37. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуе Г., Краснов О.А., Machida T., Maksutov Sh.Sh., Недзлэк Ф., Рамонет М., Суас Ф., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу компонент над территорией Сибири и некоторые его результаты. 1. Газовый состав // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 11. С. 948–955.
38. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу компонентов над территорией Сибири и некоторые его результаты. 2. Аэрозольный состав // Оптика атмосф. и океана. 2006. Т. 19, № 12. С. 1062–1067.
39. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // Оптика атмосф. и океана. 2007. Т. 20, № 1. С. 53–61.
40. Sasakawa M., Machida T., Tsuda N., Arshinov M., Davydov D., Fofonov A., Krasnov O. Aircraft and tower measurements of CO₂ concentration in the planetary boundary layer and the lower free troposphere over southern taiga in West Siberia: Long-term records from 2002 to 2011 // J. Geophys. Res.: Atmos. 2013. V. 118. P. 9489–9498. DOI: 10.1002/jgrd.50755.
41. Белан Б.Д. Самолет-лаборатория НТК «Институт оптики атмосферы» для оптико-метеорологического зондирования атмосферы // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы. Томск: ТФ СО АН СССР, 1987. С. 34–40.
42. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Микушев М.К., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Покровский Е.В., Сакерин С.М., Терпугова С.А., Толмачев Г.Н., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Щербатов А.И. Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 10. С. 1012–1021.
43. Панченко М.В., Терпугова С.А., Тумаков А.Г., Белан Б.Д., Рассказчикова Т.М. Методические аспекты самолетных нефелометрических исследований тропосферного аэрозоля в региональном масштабе // Оптика атмосф. и океана. 1994. Т. 7, № 8. С. 1022–1032.
44. Панченко М.В., Белан Б.Д., Шаманаев В.С. Роль самолета-лаборатории ИОА СО РАН в изучении окружающей среды оз. Байкал // Оптика атмосф. и океана. 1997. Т. 10, № 4–5. С. 463–472.
45. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.С., Козлов В.С., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сафатов А.С., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследований окружающей среды // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 950–957.
46. Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Zhidovkin E.V., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Kozlov V.S., Panchenko M.V., Penner I.E., Pestunov D.A., Simonenkov D.V., Tolmachev G.N., Fofonov A.V., Shamanaev V.S., Shmargunov V.P. Optik-É An-30 aircraft laboratory: 20 years of environmental research // J. Atmos. Ocean. Technol. 2012. V. 29, N 1. P. 64–75.
47. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Краснов О.А., Пестунов Д.А., Праслова О.В., Фофанов А.В., Иноуе Г., Machida T., Maksutov Sh.Sh., Shimoyama Ko., Sutoh H. Применение самолета Ан-2 для исследования состава воздуха в пограничном слое атмосферы // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 8. С. 714–720.
48. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсук 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., Синицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов Д.В., Фофанов А.В., Чернов Д.Г., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
49. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Симоненков Д.В., Ужегова Н.В., Фофанов А.В. Мобильная станция АКВ-2 и ее применение на примере г. Томска // Оптика атмосф. и океана. 2005. Т. 18, № 8. С. 643–648.
50. URL: <http://www.esrl.noaa.gov/gmd> (last access: 28.04.2019).
51. Enhalt D.H. The atmospheric cycle of methane // Tellus. 1974. V. 26, N 1–2. P. 58–70.
52. URL: <ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/user/thoning/ccgcrv/> (last access: 28.04.2019).
53. Thoning K.W., Tans P.P., Komhyr W.D. Atmospheric carbon dioxide at Mauna Loa Observatory. 2. Analysis of the NOAA GMCC Data, 1974–1985 // J. Geophys. Res. 1989. V. 94, iss. D6. P. 8549–8565.
54. Pickers P.A., Manning A.C. Investigating bias in the application of curve fitting programs to atmospheric time series // Atmos. Meas. Tech. 2015. V. 8, iss. 3. P. 1469–1489. DOI: <https://doi.org/10.5194/amt-8-1469-2015>.
55. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Краснов О.А., Maksutov Sh.Sh., Machida T., Sasakawa M., Фофанов А.В. Особенности вертикального распределения углекислого газа над югом Западной Сибири в летний период // Оптика атмосф. и океана. 2018. Т. 31, № 8. С. 670–681.
56. URL: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg> (last access: 28.04.2019).
57. Patra P.K., Saeki T., Dlugokencky E.J., Ishijima K., Umezawa T., Ito A., Aoki S., Morimoto S., Kort E.A., Crotwell A. Regional methane emission estimation based on observed atmospheric concentrations (2002–2012) // J. Meteorol. Soc. Jpn. 2016. V. 94, N 1. P. 31–113. DOI: 10.2151/jmsj.2016-006.

58. McNorton J., Chipperfield M.P., Gloor M., Wilson C., Feng W., Hayman G.D., Rigby M., Krummel P.B., O'Doherty S., Prinn R.G., Weiss R.F., Young D., Dlugokencky E., Montzka S.A. Role of OH variability in the stalling of the global atmospheric CH₄ growth rate from 1999 to 2006 // *Atmos. Chem. Phys.* 2016. V. 16, iss. 12. P. 7943–7956. DOI: 10.5194/acp-16-7943-2016.
59. Saunio M., Bousquet P., Poulter B., Peregón A., Ciais P., Canadell J.G., Dlugokencky E.J., Etiope G., Bastviken D., Houweling S., Janssens-Maenhout G., Tubiello F.N., Castaldi S., Jackson R.B., Alexe M., Arora V.K., Beerling D.J., Bergamaschi P., Blake D.R., Brailsford G., Brooklin V., Bruhwiler L., Crevoisier C., Crill P., Covey K., Curry C., Frankenberg C., Gedney N., Hoeglund-Isaksson L., Ishizawa M., Ito A., Joos F., Kim H.-S., Kleinen T., Krummel P., Lamarque J.-F., Langenfelds R., Locatelli R., Machida T., Maksyutov S., McDonald K.C., Marshall J., Melton J.R., Morino I., Naik V., O'Doherty S., Parmentier F.-J.W., Patra P.K., Peng C., Peng S., Peters G.P., Pison I., Prigent C., Prinn R., Ramonet M., Riley W.J., Saito M., Santini M., Schroeder R., Simpson I.J., Spahni R., Steele P., Takizawa A., Thornton B.F., Tian H., Tohjima Y., Viovy N., Voulgarakis A., van Weele M., van der Werf G.R., Weiss R., Wiedinmyer C., Wilton D.J., Wiltshire A., Worthy D., Wunch D., Xu X., Yoshida Y., Zhang B., Zhang Z., Zhu Q. The global methane budget 2000–2012 // *Earth Syst. Sci. Data.* 2016. V. 8, iss. 2. P. 697–751. DOI: 10.5194/essd-8-697-2016.
60. Naik V., Voulgarakis A., Fiore A.M., Horowitz L.W., Lamarque J.-F., Lin M., Prather M.J., Young P.J., Bergmann D., Cameron-Smith P.J., Cionni I., Collins W.J., Dalsuren S.B., Doherty R., Eyring V., Faluvegi G., Folberth G.A., Josse B., Lee Y.H., MacKenzie I.A., Nagashima T., van Noije T.P.C., Plummer D.A., Righi M., Rumbold S.T., Skeie R., Shindell D.T., Stevenson D.S., Strode S., Sudo K., Szopa S., Zeng G. Preindustrial to present-day changes in tropospheric hydroxyl radical and methane lifetime from the Atmospheric Chemistry and Climate Model Intercomparison Project (ACCMIP) // *Atmos. Chem. Phys.* 2013. V. 13, iss. 10. P. 5277–5298. DOI: 10.5194/acp-13-5277-2013.
61. URL: https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends_ch4 (last access: 28.04.2019).
62. Prather M.J., Hsu J., DeLuca N.M., Jackman C.H., Oman L.D., Douglass A.R., Fleming E.L., Strahan S.E., Steenrod S.D., Søvdø O.A., Isaksen I.S.A., Froidevaux L., Funke B. Measuring and modeling the lifetime of nitrous oxide including its variability // *J. Geophys. Res.* 2015. V. 120, iss. 11. P. 5693–5705. DOI: 10.1002/2015JD023267.
63. Assonov S.S., Brenninkmeijer C.A.M., Schuck T., Umezawa T. N₂O as a tracer of mixing stratospheric and tropospheric air based on CARIBIC data with applications for CO₂ // *Atmos. Environ.* 2013. V. 79. P. 769–779. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.035.
64. Ishijima K., Patra P.K., Takigawa M., Machida T., Matsueda H., Sawa Y., Steele L.P., Krummel P.B., Langenfelds R.L., Aoki S., Nakazawa T. Stratospheric influence on the seasonal cycle of nitrous oxide in the troposphere as deduced from aircraft observations and model simulations // *J. Geophys. Res.* 2010. V. 115, iss. D20. D20308. DOI: 10.1029/2009JD013322.
65. WMO Greenhouse Gas Bulletin N 13. 2017. 6 p.

O.Yu. Antokhina, P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, N.V. Dudorova, G.A. Iolev, A.V. Kozlov, O.A. Krasnov, Sh.Sh. Maksutov, T. Machida, M.V. Panchenko, D.A. Pestunov, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, M. Sasakawa, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadnaya, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Dynamics of the greenhouse gas concentrations in Western Siberia.**

According to long-term measurements of concentrations of greenhouse gases in the surface air layer and the free atmosphere trends of changes in their concentrations in Siberia are estimated. It is established that change of concentration of CO₂ in a ground layer of air changes across the territory of Siberia from 2.13 to 2.45 ppm/year, concentration of a methane increases with a speed from 5.7 to 16.3 ppb/year. Increase in concentration of greenhouse gases in the free atmosphere happens for CO₂ to speed of 2.09 ppm/year in a layer from 0.5 to 7.0 km. A methane increases on average in a layer of 0.5–7.0 km with the rate of 5.1 ppb/year. Concentration of nitrous oxide grows at all heights on average with a trend of 0.78 ppb/year. In comparison with global average rates, the established trends exceed them on CO₂ and CH₄, and appear less for N₂O.

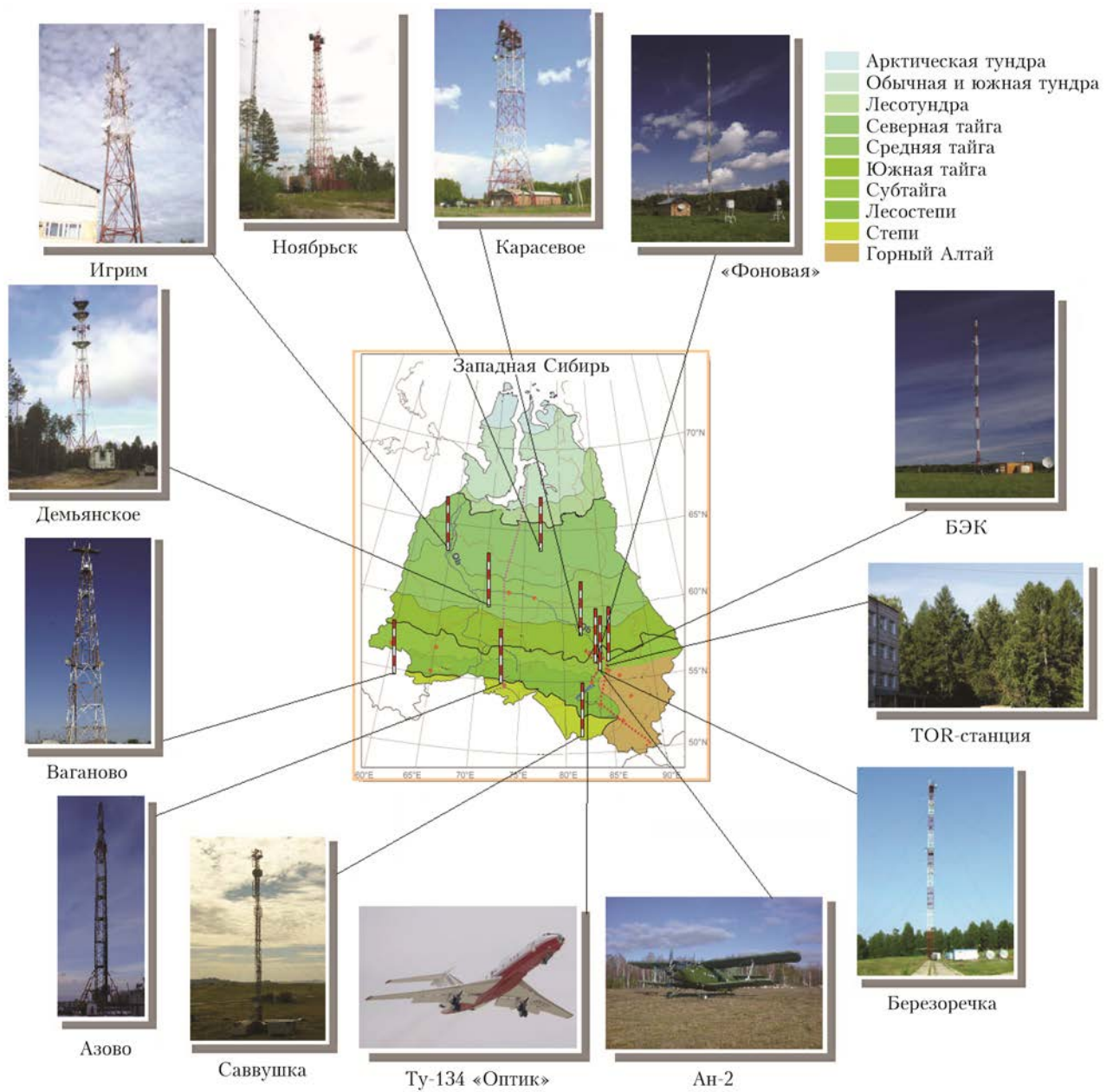


Рис. 1. Схема расположения наземных постов и мобильных комплексов

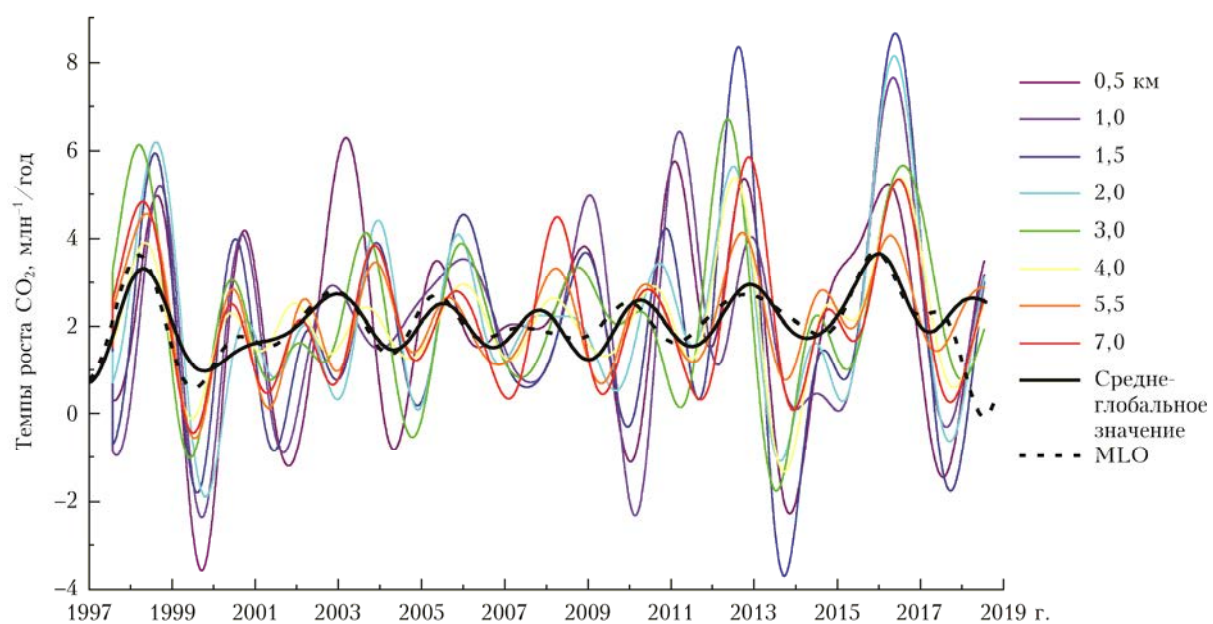


Рис. 3. Темпы роста концентрации CO₂ на разных высотах в тропосфере над юго-западной частью Западной Сибири