

АТМОСФЕРНАЯ РАДИАЦИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ПОГОДА И КЛИМАТ

УДК 551. 510.42

Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере

М.Ю. Аршинов¹, Б.Д. Белан¹, Д.К. Давыдов¹, Г.М. Креков¹,
А.В. Фофонов¹, С.В. Бабченко¹, G. Inoue², T. Machida²,
Sh. Maksutov², M. Sasakawa², K. Shimoyama^{2*}

¹Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634021, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1, Россия

²National Institute for Environmental Studies
16-2 Onogawa, 305-8506, Tsukuba, Japan

Поступила в редакцию 3.05.2012 г.

Проведен анализ вертикального распределения парниковых газов по данным измерений авторов и литературным источникам. Полученные результаты сопоставлены с наиболее часто используемыми моделями. Показано, что модели в значительной степени устарели и требуется разработка новых.

Ключевые слова: атмосфера, воздух, вертикальный, оксид углерода, диоксид углерода, метан, озон, закись азота, модель; atmosphere, air, vertical, carbon oxide, carbon dioxide, methane, ozone, nitrous oxide, model.

Введение

В настоящее время самой главной проблемой в области рационального природопользования можно с уверенностью назвать возможные глобальные изменения климата и, как следствие этого, вероятные катастрофические последствия в окружающей среде. При этом, несмотря на заключение Международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) о наличии антропогенного вклада в этот процесс, в научном сообществе существует неоднозначное мнение о глобальном его изменении. Одна большая группа ученых придерживается точки зрения, что наблюдаемые изменения обусловлены естественными многолетними колебаниями. Другая группа, имеющая не меньше сторонников, однозначно связывает зафиксированное МГЭИК увеличение температуры на земном шаре с ростом антропогенного воздействия на окружающую среду.

Разногласия, по-видимому, обусловлены двумя обстоятельствами. Анализ изменений климата и его прогноз осуществляются по все усложняющимся моделям общей циркуляции атмосферы. И какими бы сложными они ни были, скорее всего пока не удастся достичь адекватности описания процессов природной среды в моделях и фактически наблюдаемых. Второе обстоятельство является географически ад-

министративным. Для расчета по моделям необходимы данные измерений о концентрации парниковых газов, в первую очередь углеродсодержащих, и их превращениях в атмосфере. Но на одной восьмой части суши, что представляет собой в настоящее время территория России, не имеется таких данных. В результате, по образному выражению К.Р. Gurney с соавт., территория России является «горячей точкой» в моделях, прогнозирующих климат [1].

К настоящему времени проведено незначительное количество измерительных программ, нацеленных на исследование состава тропосферы над Россией, включая Сибирь [2–10]. Поэтому имеются большие неопределенности в понимании биогеохимии и распределения/эмиссии атмосферных примесей, важных с точки зрения тропосферной химии и глобального изменения климата. Важнейшими примесями, которые требуют дополнительных измерений, являются CO₂ и CH₄ для биогеохимических циклов и CO, O₃ и аэрозоль, включая сажевые частицы, для тропосферного состава. Для классификации источников и стоков малых газовых примесей в районе исследований необходимы сведения о составе устойчивых изотопов CO₂ и CH₄.

Обладея значительной территорией, покрытой лесами, и гигантскими запасами углерода (~ 320 ГтС), Сибирь играет существенную роль в глобальном балансе углерода. При этом, по данным [11], существует возможность управляемого хранения углерода в экосистемах. Однако экосистемы Сибири уязвимы при глобальном изменении климата вследствие нарушения баланса между первичным производством и дыханием при более теплом климате, высвобождением углерода при таянии вечной мерзлоты и увеличением числа лесных пожаров. В настоящее время

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Георгий Михайлович Креков; Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru); Светлана Владимировна Бабченко (bsvetlana@sibmail.com); Gen Inoue; Toshinobu Machida; Шамиль Максюттов; Motoki Sasakawa; Ko Shimoyama.

сибирские леса рассматриваются в качестве стока углекислого газа, хотя и с большой неопределенностью, которая из-за нехватки данных измерений варьирует в пределах 0,1–1 ПгС в год [1, 12–14]. Недостаток наблюдений и неизвестные отклонения моделей переноса трассеров сказываются на точности определения баланса CO_2 («выпрямительный эффект») [15].

Биомы высоких широт оказывают существенное влияние на глобальный баланс метана [16]. Он может регулироваться несколькими процессами: эмиссией с заболоченных территорий; оживлением активности бактерий вследствие таяния вечной мерзлоты [17]; кипением термокарстовых озер [18] и возможной дестабилизацией метаногидратов в прибрежной вечной мерзлоте. Вполне вероятно, что с ростом температуры на планете эти видоизменяющиеся процессы могут ускорять эмиссию метана и тем самым воздействовать на глобальный радиационный баланс, что усилит потепление климата. Однако уровень наших знаний о пространственном распределении вышеупомянутых источников, их мощности и площади, динамики и амплитуды колебаний их интенсивности остается пока крайне низким [19]. Данная проблема также осложняется неопределенностью количественной оценки антропогенных выбросов при добыче и транспортировке природного газа. Кроме того, по мере прогрева северных районов России существует вероятность дополнительной разработки запасов природного газа. В результате и из-за недостатка региональных наблюдений, основываясь на зональных градиентах, можно лишь сделать предположение, что продолжающийся в настоящее время рост глобальной концентрации атмосферного CH_4 был инициирован необычно высокими температурами в высоких широтах в 2007 г. [20].

Кроме того, лесные пожары [21] и контролируемые сельскохозяйственные палы в южной части Сибири, Казахстане и Украине [22] весной и летом могут значительно влиять на химический состав атмосферы над Сибирью и в целом определять баланс CO в Северном полушарии [23, 24]. Их площадь и интенсивность также значительно варьируют год от года. Также эти загрязнения могут переноситься в Арктику [25], где они могут повлиять на изменение радиационного баланса. В частности, осаждение поглощающих свет сажевых аэрозольных частиц на поверхность снега и арктического льда может привести к усилению интенсивности таяния и, соответственно, изменению альбедо в полярных районах.

Таким образом, приведенный краткий обзор работ по проблеме формирования состава воздуха над территорией России, и Сибири в частности, оставляет больше неопределенностей, чем проясняет ситуацию. Это свидетельствует о необходимости проведения экспериментальных измерений на обширной территории, с максимально возможной в настоящее время точностью, с одновременным моделированием процессов генерации, переноса, трансформации и стока примесей и с взаимной верификацией данных измерений и расчетов.

Для реалистичных оценок вариаций радиационного бюджета планеты, в связи с возрастающим объемом поступлений в атмосферу техногенного CO_2 и других активных парниковых газов, требуется ста-

тистически обеспеченный массив экспериментальных данных, характеризующих динамику пространственного и сезонного изменения содержания указанных газовых примесей в глобальном масштабе. Количественный прогноз временных трендов развития и деградации источников и стоков парниковых газов как естественного, так и антропогенного происхождения предъявляет повышенные требования к точности экспериментальных данных, их пространственному и временному обеспечению.

В наибольшей степени этим требованиям удовлетворяют данные сложившихся сетей наземного наблюдения, функционирующих под эгидой Всемирной метеорологической организации (ВМО) [26], Национальной администрации США по океану и атмосфере [27], Росгидромета [28]. Большинство станций мониторинга оснащено современным газоаналитическим оборудованием, изготовленным в США, Великобритании, Франции. Как правило, станции работают в автоматическом режиме, с периодическим (один либо два раза в месяц) посещением операторов. Для корректировки работы приборов за такие промежутки времени применяется автоматическая ежедневная их калибровка поверочными смесями или эталонами микропотока.

В России проблема изучения компонентов углеродного цикла усугубляется почти полным отсутствием наблюдательной сети за парниковыми газами. В России (Росгидромет) есть всего три станции, измеряющие углекислый газ. Причем две расположены на островах, одна является океанической. Таким образом, на территории России практически отсутствует систематический контроль парниковых газов. Естественно, что при отсутствии данных их роль в качестве источников и стоков углерода плохо очерчена в современных глобальных и региональных моделях.

При численном моделировании процессов обычно применяются модели высотного распределения парниковых газов. Наибольшей популярностью до сих пор пользуются модели AFGL-TR-86-0110 за рубежом [29] и статистическая модель В.С. Комарова в России [30], которые безнадежно устарели и требуют переоценки.

В настоящей статье дается анализ динамики вертикального распределения парниковых газов на территории Сибири по экспериментальным данным и рассматривается попытка создания модифицированной модели их вертикального распределения.

1. Измерение парниковых газов в приземном слое воздуха в Западной Сибири

В рамках выполнения проекта Tropospheric Ozone Research программы EUROTRAC в Институте оптики атмосферы СО РАН для мониторинга состава воздуха в 1992 г. был создан стационарный экспериментальный комплекс, получивший название TOR-станция (по названию проекта) [31, 32]. Он находится в Томском академгородке, имеет координаты $56^{\circ}28'41''$ с.ш., $85^{\circ}03'15''$ в.д. на высоте 133 м над ур. м.

С 2006 г. начал работать еще один пост на территории обсерватории «Фоновой», вблизи пос. Киреевск, находящейся в 60 км к западу от города на берегу р. Оби (координаты 56°25'07" с.ш., 84°04'27" в.д. и высота 80 м над ур. м.). В 2007 г. измерения начались на базовом экспериментальном комплексе (БЭК), расположенном на северо-восточной окраине г. Томска (координаты 56°28'49" с.ш., 85°06'08" в.д. и высота 120 м над ур. м.). На обоих полигонах установлены идентичные автоматические комплексы для измерения широкого набора метеорологических и оптических параметров атмосферы. Оба комплекса представляют собой вантовые мачты «Унжа-2», оснащенные соответствующими датчиками на четырех высотных уровнях. Конструктивные особенности комплекса описаны в [31]. Номенклатура измерительных устройств представлена в табл. 1.

Вокруг обсерватории «Фоновой» отсутствуют промышленные предприятия, и получаемые здесь данные будут характеризовать фоновые условия. По-

скольку базовый пост мониторинга размещен на северо-восточной окраине Томска, то, учитывая преобладающий западно-восточный перенос воздуха в регионе, можно говорить о том, что второй периодически будет отягощен антропогенным влиянием, так как воздушная масса после «Фоновой» пройдет через территорию г. Томска, а затем попадет в пункт измерений на БЭКе. Таким образом, получаемые данные позволяют не только контролировать состав воздуха в фоновых условиях, но и выделять вклад крупного мегаполиса в его изменение.

Для более полного определения углеродного цикла в составе измерительного комплекса используется высокоэффективный газоанализатор NMHC-2000 (Франция). Так как часть углерода в атмосфере переходит в аэрозольную форму, то для замыкания атмосферного углеродного баланса необходим контроль дисперсного состава аэрозоля, для чего в состав постов включены лазерные спектрометры аэрозоля фирмы GRIMM (ФРГ).

Таблица 1

Измерительные посты на БЭКе и обсерватории «Фоновой»

Прибор	Параметр	Диапазон, погрешность	Примечание
<i>Базовый экспериментальный комплекс</i>			
Метеокомплекс ИОА СО РАН	Температура	-50...+50 °С, ± 0,2 °С	4 уровня
	Относительная влажность	10...100%, ± 5%	4 уровня
	Скорость ветра	0,5...60 м/с, ± 5%	4 уровня
	Направление	0...360°, ± 10°	4 уровня
Monitor Europe Model 9850B	SO ₂	0...20 млн ⁻¹ , 0,5 млрд ⁻¹ , или ± 1%	2 уровня
T-API Model 200E	NO	0...20 млн ⁻¹ , ± 0,5%	2 уровня
	NO ₂	0...20 млн ⁻¹ , ± 0,5%	
3-02П	O ₃	0...1000 мкг/м ³ , ± 15%	2 уровня
СВ-320	H ₂ S	0...200 мкг/м ³ , ± 15%	2 уровня
Н-320	NH ₃	0...1000 мкг/м ³ , ± 15%	2 уровня
LI-COR LI-820	CO ₂	0...2000 млн ⁻¹ , < 3%; или 0,2 млн ⁻¹ при ежеквартальной калибровке с использованием ПГС	2 уровня
К-100	CO	0...400 мкг/м ³ , ± 20%	2 уровня
NMHC-2000	CH ₄ и ΣСН	0...50 млн ⁻¹ и 0...5 млн ⁻¹ 0,1 млн ⁻¹	2 уровня
Лазерный спектрометр аэрозоля GRIMM модель 1108	Счетная концентрация, распределение по размерам	0...300 см ⁻³ , ± 5%; 0,3–20 мкм, 15 каналов	1 уровень
Диффузионный спектрометр аэрозоля ДСА (ИХКиГ СО РАН)	То же	0...150000 см ⁻³ , ± 10%; 3–200 нм, 20 каналов	1 уровень
<i>«Фоновая»</i>			
Метеокомплекс ИОА СО РАН	Температура	-50...+50 °С, ± 0,2 °С	4 уровня
	Относительная влажность	10...100%, ± 5%	4 уровня
	Скорость ветра	0,5...60 м/с, ± 5%	4 уровня
	Направление	0...360°, ± 10°	4 уровня
С-310	SO ₂	0...2000 мкг/м ³ , ± 25%	2 уровня
P-310A	NO	0...1000 мкг/м ³ , ± 25%	2 уровня
	NO ₂	0...1000 мкг/м ³ , ± 25%	
3-02П	O ₃	0...1000 мкг/м ³ , ± 15%	2 уровня
LI-COR LI-840	CO ₂	0...2000 млн ⁻¹ , < 1%; или 0,15 млн ⁻¹ при ежеквартальной калибровке с использованием ПГС	2 уровня
LGR FGGA Model 907-0010	CO ₂	20–10000 млн ⁻¹ , 200 млрд ⁻¹	1 уровень
	CH ₄	0,005–50 млн ⁻¹ , 1 млрд ⁻¹	
	H ₂ O	150–70000 млн ⁻¹ , 100 млн ⁻¹	
К-100	CO	0...400 мкг/м ³ , ± 20%	2 уровня
Лазерный спектрометр аэрозоля GRIMM модель 1108	Счетная концентрация, распределение по размерам	0...3000 см ⁻³ , ± 5%; 0,3–20 мкм, 15 каналов	1 уровень

Пробы атмосферного воздуха для газоанализаторов отбираются с двух высот, помимо этого ежедневно проводится их калибровка. Разработана и внедрена общая схема газораспределительных каналов, построенная также с учетом особенностей калибровки каждого прибора. Состав газоанализаторов на первом этапе в комплексах разный, однако разработанная газораспределительная схема позволяет не только дополнить комплекс на обсерватории «Фоновой», сделав его идентичным комплексу на БЭЖе, но и при необходимости добавлять новые газоанализаторы.

В рамках совместного российско-японского проекта ИОА СО РАН с 2004 г. выполняет работы по созданию сети мониторинга концентрации углекислого газа и метана на территории Западной Сибири [33, 34]. Измерительная сеть состоит из 8 наблюдательных пунктов, расположенных от зоны северной тайги до лесостепи на южных границах России и функционирующих в автономном режиме.

В табл. 2 представлены наименования и координаты пунктов измерений. В дальнейшем наименования пунктов будут нанесены на соответствующих картах.

Таблица 2

Координаты пунктов измерений

Ноябрьск	63°26' с.ш., 75°47' в.д.
Игрим	63°11' с.ш., 64°25' в.д.
Демьянское	59°47' с.ш., 70°52' в.д.
Карасево	58°15' с.ш., 82°25' в.д.
Березоречка	56°09' с.ш., 84°20' в.д.
Ваганово	54°30' с.ш., 62°19' в.д.
Азово	54°44' с.ш., 73°02' в.д.
Саввушка	51°20' с.ш., 82°08' в.д.

Все посты оборудованы однотипными приборами LiCor модель 820. Измерения концентрации CO₂ проводятся ежедневно, с момента введения поста в эксплуатацию и по настоящее время. Каждое измерение сопровождается калибровкой приборов по референтному газу, отобранному на этом же посту. Дважды в сутки (в 5:00 и 17:00 местного времени) применяется калибровка поверочными смесями, концентрация одной из которых ниже, а второй выше, чем в атмосферном воздухе. Это позволяет измерять концентрацию CO₂ с погрешностью, не превышающей 0,5 млн⁻¹. Отбор проб воздуха для прибора осуществляется на двух высотах.

Обобщение полученных на этой сети данных о пространственно-временной изменчивости концен-

трации парниковых газов на территории Западной Сибири выполнено ранее в [35]. Здесь же остановимся на анализе тенденции их изменения в последующие годы [36].

В качестве примера проводимых исследований на рис. 1 изображен многолетний ход концентраций углекислого газа и метана на измерительном пункте Карасево, находящемся в районе Среднего Приобья и располагающем наиболее полными рядами данных.

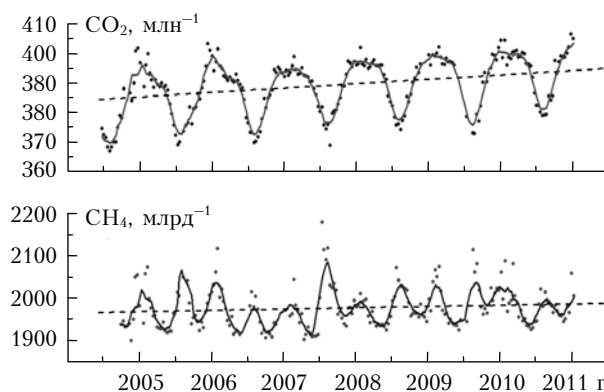


Рис. 1. Межгодовой ход концентраций углекислого газа и метана в наблюдательном пункте Карасево (58°15' с.ш., 82°25' в.д.)

Характер изменений для CO₂ показывает ярко выраженный положительный тренд от года к году, с редкими случаями стагнации или небольшого снижения наблюдаемых концентраций для отдельных сезонов.

Неоднозначны тенденции в межгодовом поведении метана — рост летнего или зимнего максимумов может сопровождаться глубоким падением в неизбежно следующем за ними минимуме. Можно только отметить взаимосвязь измеряемых концентраций CH₄ с погодными условиями в конкретный период наблюдений. Так, устойчивые морозы, сопровождаемые низкими температурными инверсиями, способствуют интенсивному накоплению метана в приземной атмосфере.

Усредненные данные многолетних измерений концентраций углекислого газа для всех пунктов сети мониторинга приводятся в табл. 3.

Наблюдаемый ежегодный прирост приземного содержания CO₂ в различных районах Западной Сибири составлял от 1 до 2,5 млн⁻¹. Исключением

Таблица 3

Среднегодовые концентрации углекислого газа в пунктах сети мониторинга на территории Западной Сибири, млн⁻¹

Пункт (координаты)	Год						
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Березоречка (56°09' с.ш., 84°20' в.д.)	384,6	386,0	387,1	388,2	390,7	392,1	394,2
Карасево (58°15' с.ш., 82°25' в.д.)		385,9	386,9	388,4	390,6	391,9	394,3
Игрим (63°11' с.ш., 64°25' в.д.)		387,0	388,9	389,9	391,9	394,3	396,8
Ноябрьск (63°26' с.ш., 75°47' в.д.)			387,6	388,5	390,2	392,0	395,0
Демьянское (59°47' с.ш., 70°52' в.д.)			387,1	389,1	390,8	391,4	394,8
Саввушка (51°20' с.ш., 82°08' в.д.)				387,2	388,9	391,0	393,6
Азово (54°44' с.ш., 73°02' в.д.)					390,1	392,1	395,0
Ваганово (54°30' с.ш., 62°19' в.д.)						390,8	393,9

из правила стал 2010 г., когда на западе территории увеличение составило до 3 млн⁻¹ и более, а в других частях зафиксированы локальные максимумы прироста концентраций. Подобную аномалию следует связать с поступлением в Западно-Сибирский регион воздушных масс из европейской части России, обогащенных продуктами горения из-за сложившейся там летом этого года пожароопасной обстановки.

Также следует отметить повышенные уровни содержания СО₂ в наблюдательных пунктах Игрим и Азово, находящихся под мощным антропогенным воздействием крупных поселков, где дополнительный прирост концентраций определяется количеством сжигаемого в хозяйственных нуждах топлива. Напротив, низкие значения ежегодно фиксируются в Саввушке, что объясняется расположением этого пункта сети в экологически чистых предгорьях Алтая с развитой сельскохозяйственной инфраструктурой. В период созревания урожая здесь наблюдается наиболее интенсивный сток углерода из атмосферы на подстилающую поверхность.

2. Результаты самолетных измерений распределения парниковых газов

К настоящему времени наиболее представительный массив данных накоплен в результате многолетнего (1997–2007 гг.) самолетного зондирования вертикального и сезонного распределения основных парниковых газов (СО₂, СН₄ и N₂O) над обширным регионом Западной Сибири. На их основе появляется возможность провести оценку среднемесячных профилей распределения этих компонентов с высотой и оценить тенденцию многолетнего изменения концентрации газов на разных высотах. Для проведения измерений использовался самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» [37], описание современного аппаратного комплекса дано в [38]. Для измерения СО₂ в реальном масштабе времени используется анализатор LI-6262, для калибровки которого применяются эталонные поверочные смеси высокой (390 млн⁻¹) и низкой (340 млн⁻¹) концентрации. Цикл измерения и калибровки составляет 960 с, из них измерение 900 с, калибровка смесью с низкой и высокой концентрацией – 30 с. Характеристика основных измерительных комплексов приведена в табл. 4.

Параллельно отобранные в колбы пробы затем обрабатываются в Национальном институте исследования окружающей среды (Цукуба, Япония), где определяются концентрации различных газовых компонентов (табл. 5) с повышенной точностью.

Таблица 5

Диапазон концентраций и погрешности определения газов в отобранных пробах

Газ	Диапазон	Погрешность
СО ₂	340–450 млн ⁻¹	± 0,03 млн ⁻¹
СН ₄	1500–2500 млрд ⁻¹	± 1,7 млрд ⁻¹
N ₂ O	250–450 млрд ⁻¹	± 0,3 млрд ⁻¹
СО	50–350 млрд ⁻¹	± 0,3 млрд ⁻¹
H ₂	400–700 млрд ⁻¹	± 3,1 млрд ⁻¹

В рутинном режиме забор проб и измерение газового состава воздуха производится ежемесячно (в 20-х числах, в ясных условиях) начиная с июля 1997 г. и по настоящее время. Маршруты работ находятся над бореальными лесами и болотами с начальными координатами 54°35' с.ш., 82°40' в.д. (юго-западнее Новосибирска). В связи с тем что у планера Ан-30 закончился временной ресурс, зондирование парниковых газов с 2011 г. продолжается на самолете-лаборатории Ту-134 «Оптик» [39].

Поскольку результаты ранее проведенного мониторинга опубликованы в [40], здесь приведем обработанные данные, дополненные теми, которые получены в ходе выполнения последующих полетов.

Из рис. 2 (цв. вклейка) видно, что концентрация диоксида углерода продолжает повышаться на всех уровнях над контролируемым регионом. Темп повышения остается прежним (1,9 млн⁻¹/год). Однако обращает на себя внимание настораживающий факт, что начиная с 2005 г. летние минимумы концентрации СО₂ начали заметно повышаться. Если с 1997 по 2004 г. они находились в диапазоне концентраций 346–355 млн⁻¹, то в 2009 г. достигли 375 млн⁻¹. Таким образом, темп прироста превысил 4 млн⁻¹/год. Возможно, это свидетельствует о том, что сибирские леса подошли к уровню насыщения в ассимиляции углерода [41]. В подобном случае рост концентрации диоксида углерода только усилится.

В отличие от СО₂ концентрация метана за рассматриваемый период практически не изменилась (рис. 3, цв. вклейка).

Таблица 4

Комплекс приборов для газового и аэрозольного анализа

Соединение (прибор)	Метод	Пределы обнаружения	Частота измерений, с
О ₃ (ОПТЭК 3.02П)	хемилюминесценция	1–500 мкг/м ³	1
О ₃ (TEI Model 49C)	УФ-поглощение	1 млрд ⁻¹	1
СО ₂ (LI-COR LI-6262)	ИК-поглощение	0,1 млн ⁻¹	1
СО (T-API Model 300E)	ИК-поглощение	1 млрд ⁻¹	1
NO _x (T-API Model 200E)	хемилюминесценция	1 млрд ⁻¹	1
SO ₂ (T-API Model 100E)	флуоресценция	1 млрд ⁻¹	1
Счетное распределение аэрозоля по размерам (GRIMM Model 1.108)	оптический спектрометр	0,3–20 мкм	6
Счетное распределение аэрозоля по размерам (ДСА)	диффузионная батарея + конденсационный счетчик	3–200 нм, 20 каналов	80 (весь диапазон)

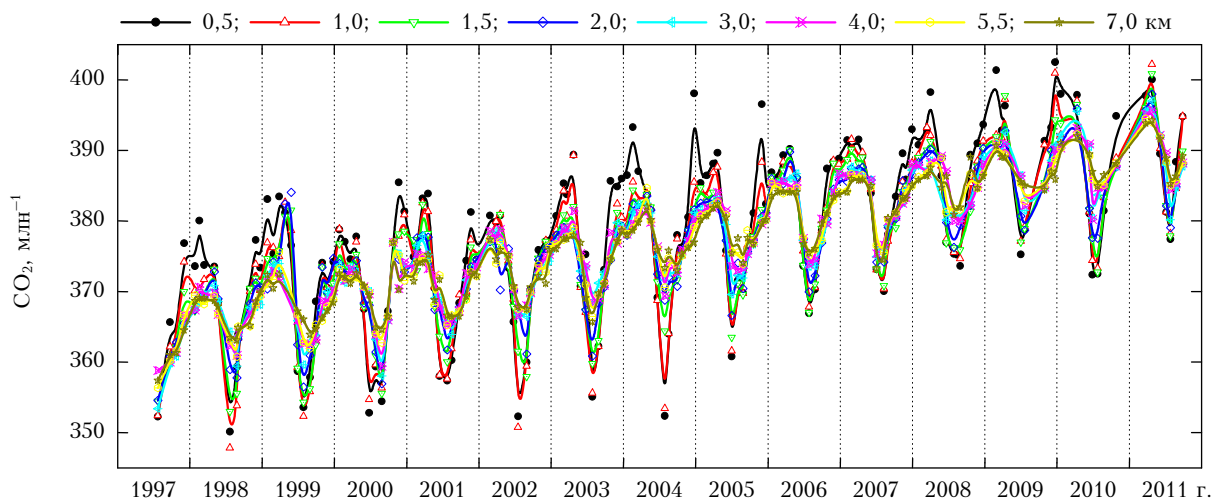


Рис. 2. Изменение концентрации диоксида углерода на разных высотах над югом Западной Сибири

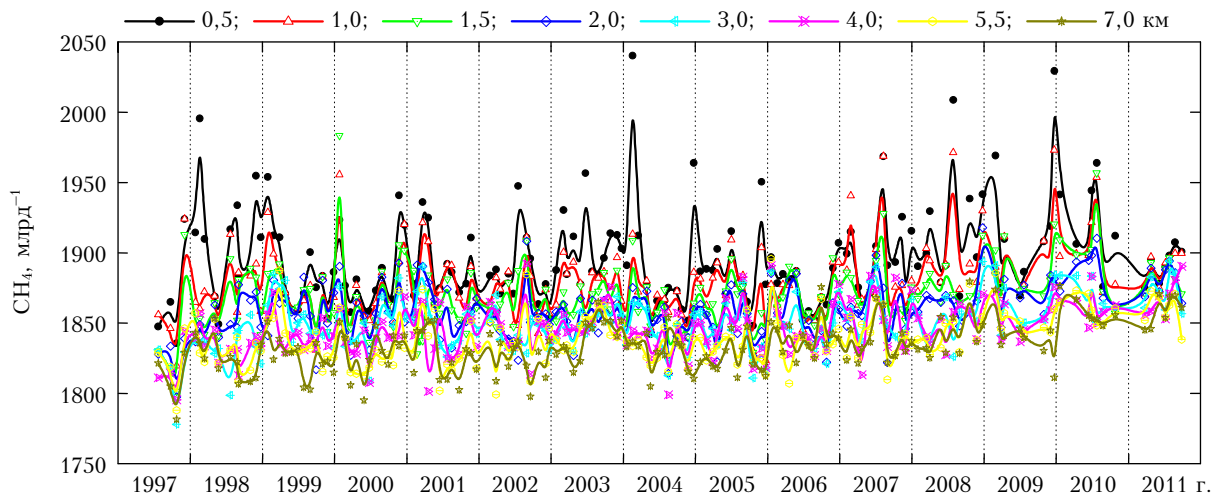


Рис. 3. Изменение концентрации метана на разных высотах над югом Западной Сибири

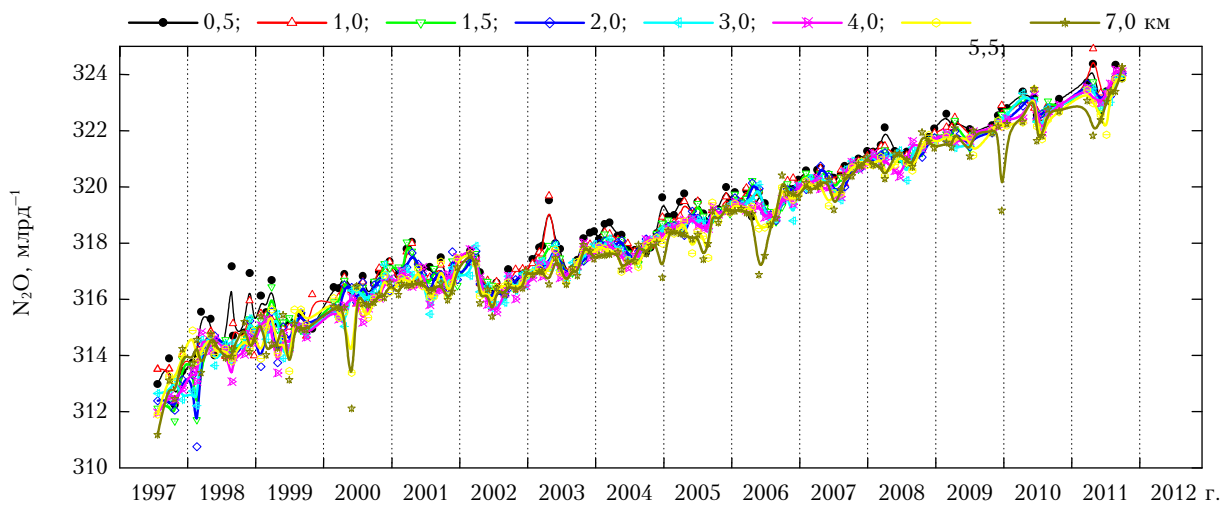


Рис. 4. Изменение концентрации закиси азота на разных высотах над югом Западной Сибири

Статистическая обработка не позволяет выделить значимого тренда, хотя флуктуации концентрации в отдельные годы бывают значительными.

Третьим парниковым газом является закись азота. Как видно из рис. 4 (цв. вклейка), ее концентрация также продолжает возрастать на всех высотах. Темп прироста составляет $0,73 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$.

По данным всех измерений (> 120 случаев) построены средние многолетние профили вертикального распределения концентрации CO_2 , CH_4 , N_2O и O_3 над территорией Западной Сибири (рис. 5). Горизонтальными отрезками отмечены среднеквадратические отклонения концентраций ($\pm 1 \text{ СКО}$).

Справа и слева показаны абсолютные максимумы и минимумы концентраций на каждой высоте, определенные по всей выборке. На наш взгляд, приведенные на рис. 5 данные будут полезны как при выборе сценариев моделирования по региональным моделям, так и в других климатических приложениях.

Приведенные результаты показывают, что имеется многолетний тренд концентрации CO_2 и N_2O во всей толще атмосферы над Западной Сибирью с темпом $1,98 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ и $0,73 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$ соответственно. Для CH_4 и O_3 такой однозначности не установлено. Территория региона выступает мощней-

шим источником и стоком для углекислого газа, которые по действию разделены во времени. С сентября по апрель Западная Сибирь выступает донором CO_2 , с мая по август его ассимилирует. Для метана она является постоянным донором, меняющим свою интенсивность в течение года. Малая изменчивость концентрации N_2O на всех высотах свидетельствует об отсутствии на территории региона значимых источников и стоков этого компонента воздуха. Наибольшая изменчивость всех трех парниковых газов наблюдается в пограничном слое, она в 2–3 раза выше, чем в свободной атмосфере.

В завершение анализа на рис. 6–9 (цв. вклейки) приведены обобщенные результаты, иллюстрирующие многолетнюю 2D-изменчивость концентрации основных парниковых газов, исключая H_2O , над территорией Западной Сибири.

Представленные на рис. 6 результаты, характеризующие динамику высотного распределения концентрации CO_2 , в целом не противоречат данным, накопленным на сети ВМО [42]. Наблюдается стабильное, в последние годы почти экспоненциальное, возрастание концентрации CO_2 на всех высотах.

Характерно, что возрастание концентрации CO_2 начинается с пограничного слоя атмосферы, затем

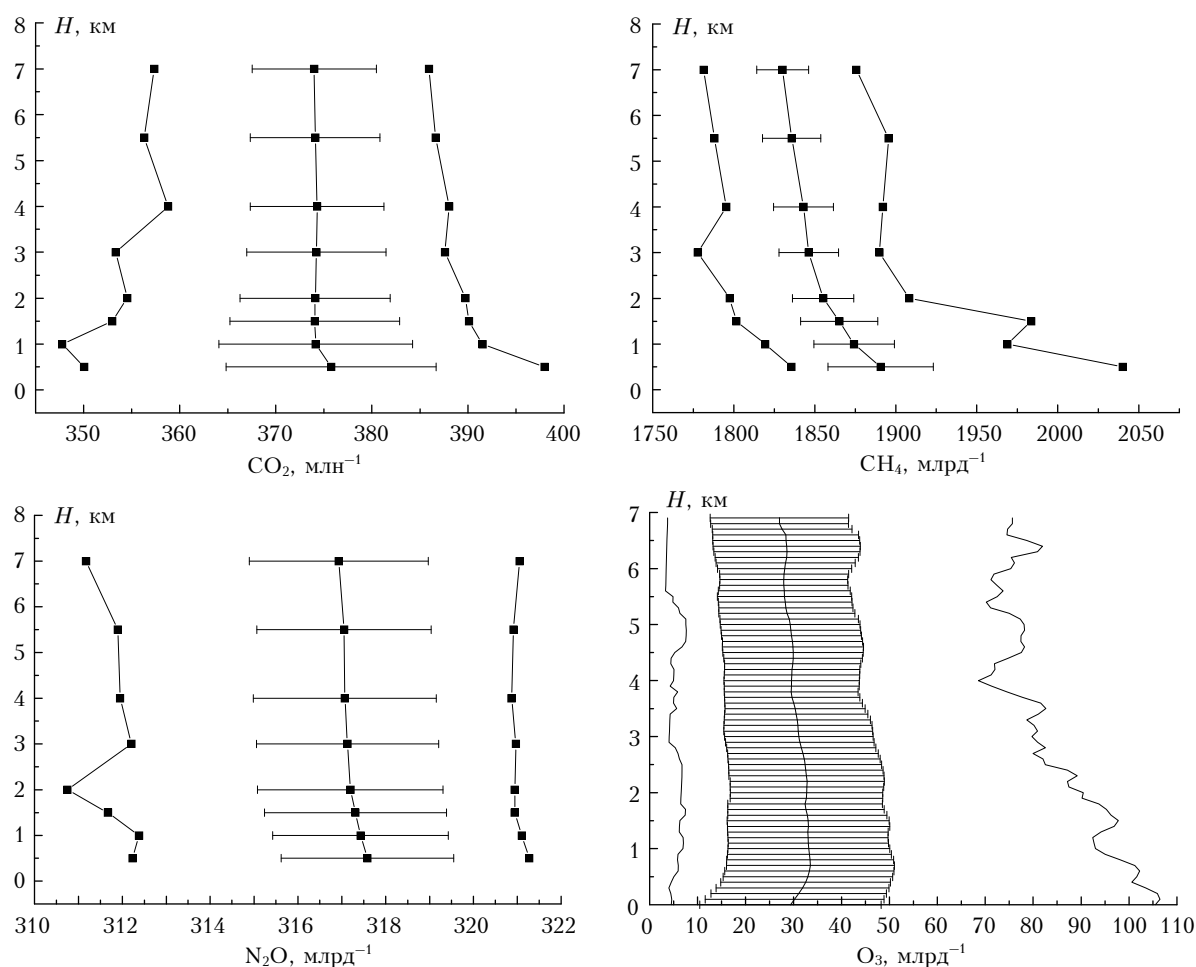


Рис. 5. Средние многолетние вертикальные распределения и среднеквадратические отклонения концентраций CO_2 , CH_4 , N_2O и O_3 над Западной Сибирью; абсолютные минимумы и максимумы концентраций на разных высотах

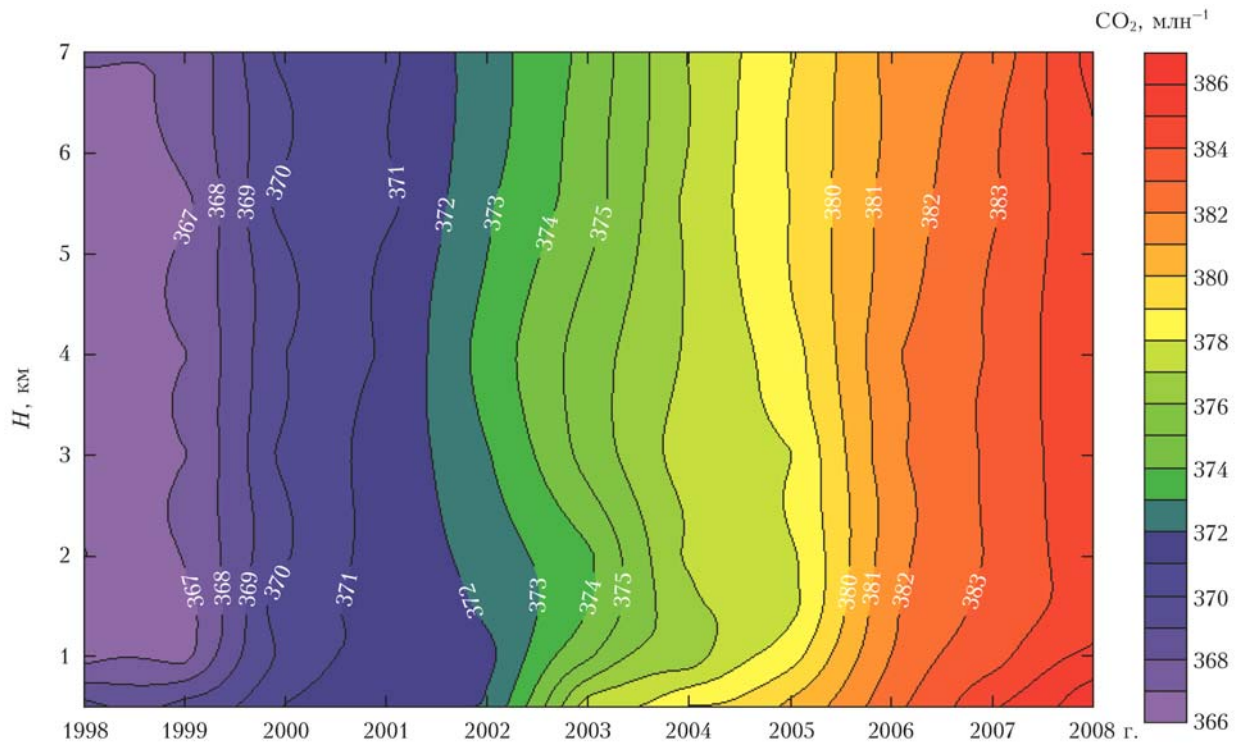


Рис. 6. Многолетняя изменчивость концентрации углекислого газа над югом Западной Сибири

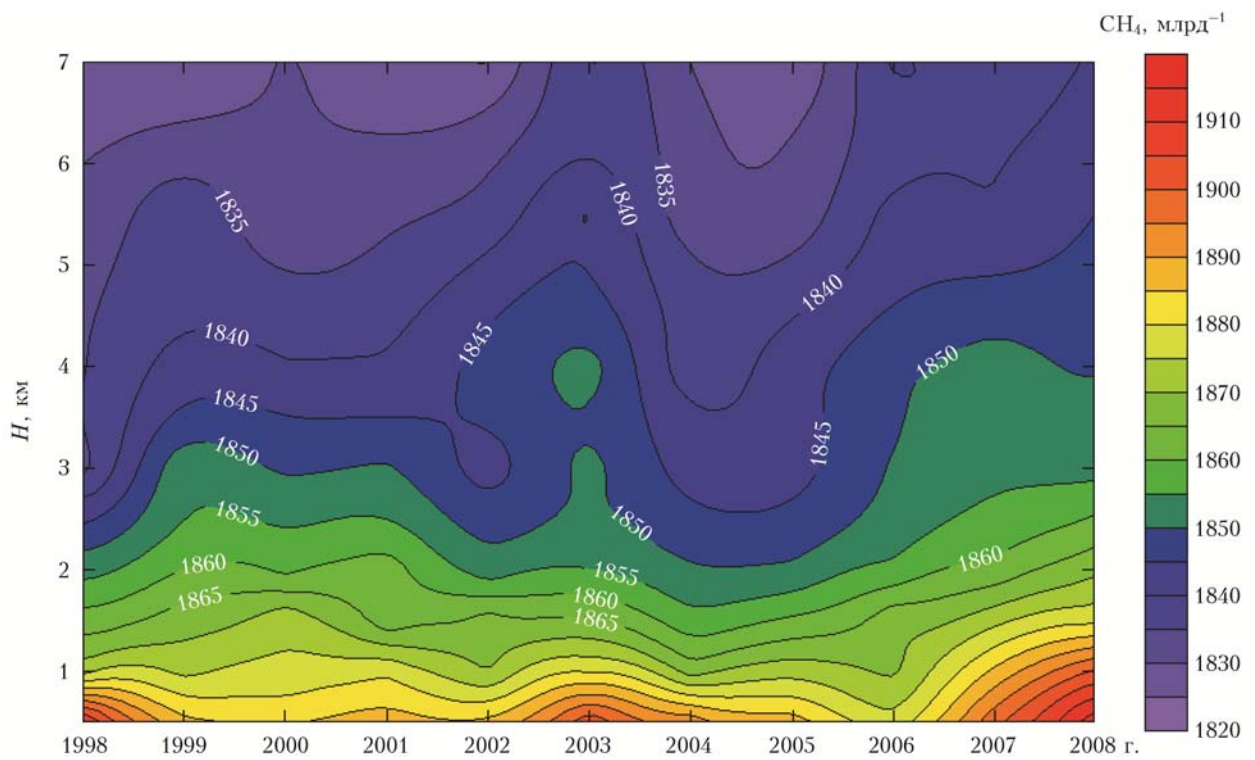


Рис. 7. Многолетняя изменчивость концентрации метана над регионом Западной Сибири

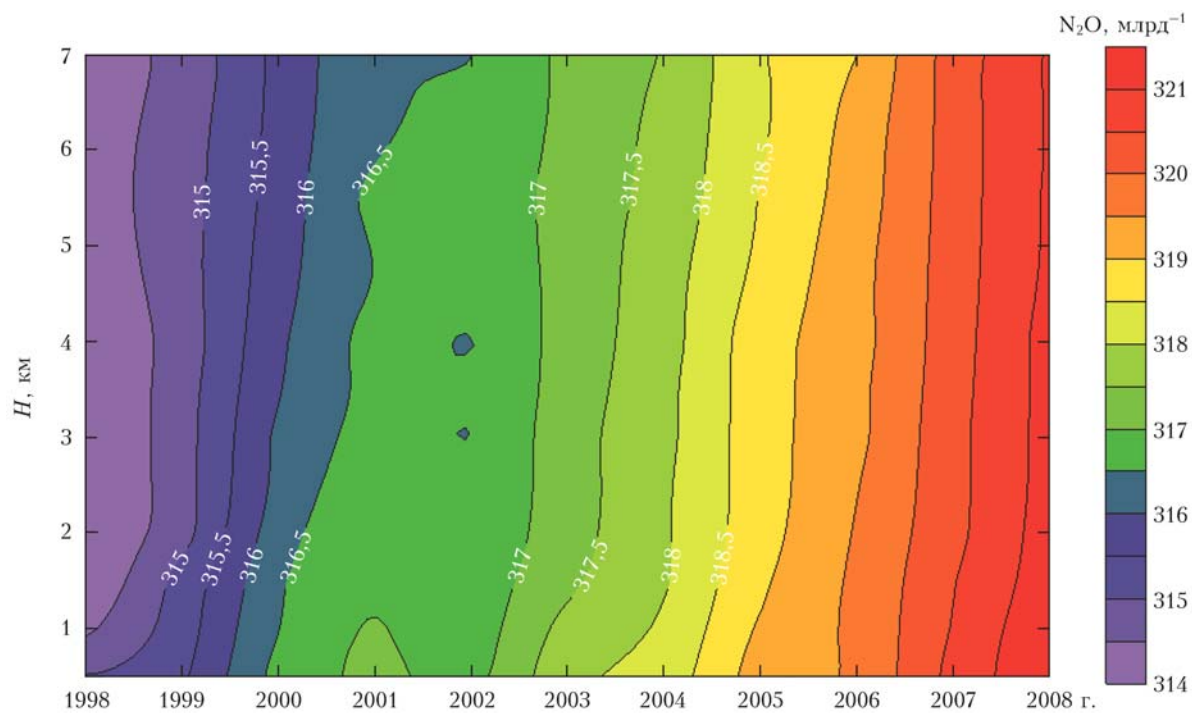


Рис. 8. Многолетняя изменчивость концентрации закиси азота над регионом Западной Сибири

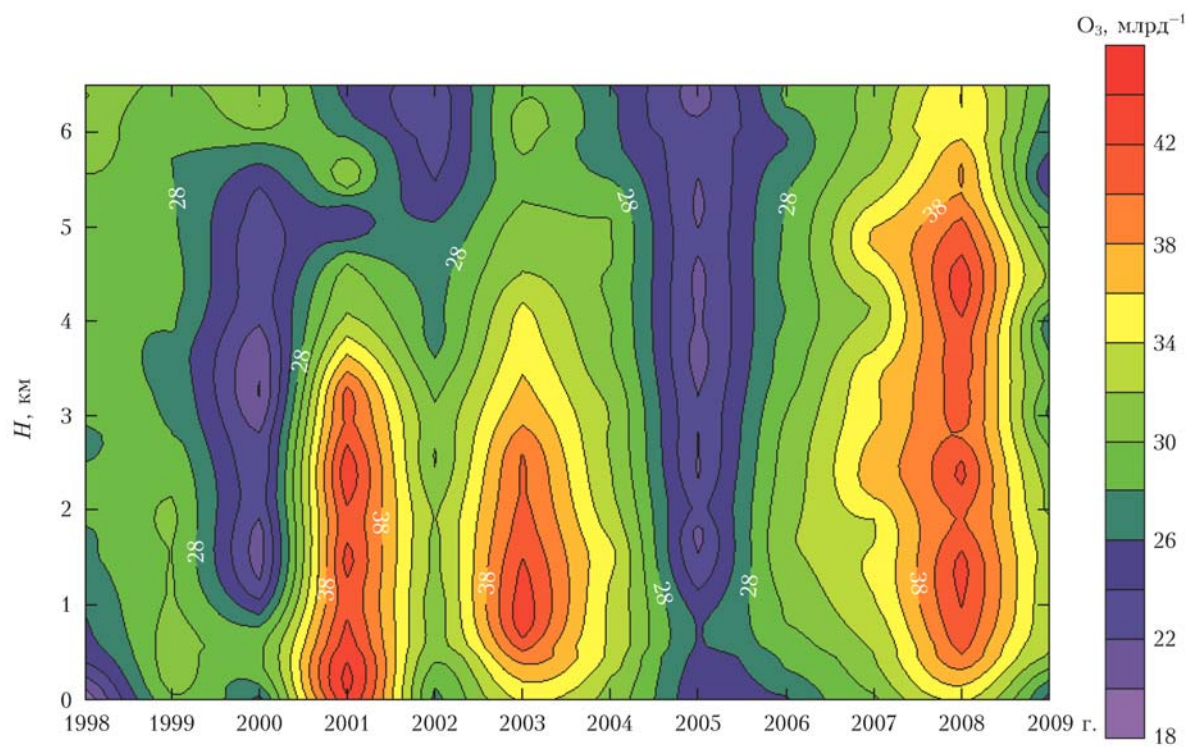


Рис. 9. Многолетняя изменчивость концентрации озона над регионом Западной Сибири

в масштабах 1–2 лет практически равномерно распределяется по всей толще тропосферы. Важно отметить, что увеличение мощности поверхностных источников CO_2 происходит в районах, далеких от центров индустриальной активности. При этом темп роста составляет 21 млн^{-1} за 11 лет при средней скорости $1,9 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$.

Для метана по данным рис. 7 подобные количественные показатели получить затруднительно, ввиду очевидного отсутствия регулярного временного тренда. Есть вопросы и на глобальной сети. Так, по данным [19, 20], в 2005–2006 гг. наблюдалось уменьшение CH_4 на $1 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$, а в среднем на $2,4 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$ за последние 10 лет.

Закись азота, согласно рис. 8, увеличивала свою концентрацию на всех высотах со скоростью $0,73 \text{ млрд}^{-1}/\text{год}$, что несколько меньше, чем в [43].

Еще более стохастический характер носит пространственно-временное распределение тропосферного озона (рис. 9), что делает практически невозможным построение достоверных прогностических оценок в рамках одного региона.

В целом, из анализа полученных данных следует вывод о том, что вертикальное распределение концентрации CO_2 и N_2O в тропосфере носит достаточно регулярный, близкий к нейтральному по высоте характер. В последнее время происходит систематический нарастающий по скорости хоть и с разным темпом рост, причем по всей анализируемой толще атмосферы: среднегодовые профили концентрации не пересекаются.

3. Сопоставление данных измерений с модельными

На рис. 10 показано сопоставление высотных профилей концентрации CO_2 , CH_4 и N_2O в тропосфере, осредненных за период 2002–2007 гг. по данным наших самолетных измерений, со стандартными моделями [29] и [30].

Из этого сопоставления видно, насколько применяемые модели отклоняются от средних концентраций, фиксируемых в настоящее время. Это означает, что они явно устарели и требуют переоценки.

Очевидно, что использование этих «стандартных» моделей в качестве опорных при решении обратной задачи восстановления высотных профилей малых газовых компонентов из данных дистанционного спектроскопического зондирования может привести к существенному смещению результатов.

4. Вертикальное распределение парниковых газов в верхней атмосфере

В целях углубления нашего понимания процессов глобального углеродного цикла, влияния парниковых газов на климат и масштабов техногенного загрязнения атмосферы, к настоящему времени накоплен обширный массив данных, характеризующих

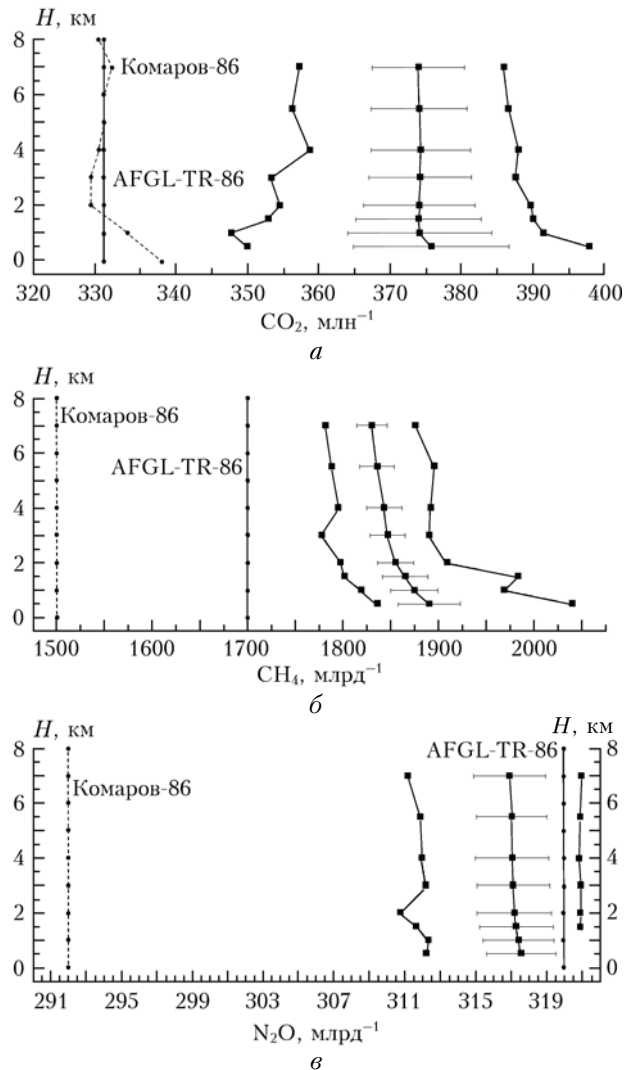


Рис. 10. Сопоставление высотных профилей концентрации CO_2 (а), CH_4 (б), N_2O (в) в тропосфере, полученных по данным наших самолетных измерений, и модельных оценок [29] и [30]

динамику высотного и широтного распределения CO_2 , CH_4 , N_2O и других малых газовых компонентов атмосферы. Однако подавляющее количество этих данных собирается на глобальной сети наземных постов и станций наблюдения [44], включая системы корабельного базирования [45].

В последнее время расширяется объем самолетных измерений, охватывающих среднюю и верхнюю тропосферу [2–8, 46, 47]. С другой стороны, сохраняется дефицит систематических контактных измерений концентрации, временного тренда и сезонных вариаций приоритетных парниковых газов в области тропопаузы и в стратосфере. Причина состоит в том, что этот диапазон высот доступен только для аэростатных измерений, требующих громоздкого стационарного обеспечения, что объясняет их ограниченный характер.

Долговременный ряд систематических аэростатных наблюдений концентрации CO_2 и других активных парниковых газов в диапазоне высот 9–35 км

получен в рамках Объединенной национальной программы Японии.

Опубликованные результаты наблюдений [48] за период 1985–2000 гг. показывают, что существует положительная корреляция концентрации CO_2 в стратосфере и пограничном слое атмосферы. То есть техногенное увеличение содержания CO_2 в приземном слое через определенный промежуток времени распространяется не только на нижнюю тропосферу, как следует из временного тренда вертикальных профилей CO_2 , но и активно проявляется во всей толще атмосферы. Подобное заключение относительно других парниковых газов, в первую очередь CH_4 и N_2O , следующее из известных данных спектрофотометрического спутникового зондирования [49, 50], требует тщательного обоснования ввиду пониженной точности пассивных спутниковых измерений в нижней стратосфере.

Понимание актуальности этой проблемы стимулировало реализацию новых международных проектов, основанных на комплексном подходе к мониторингу парниковых и техногенных газов в средней атмосфере, с использованием средств самолетного, аэростатного и орбитального зондирования [51–55]. Среди них определяющее место занимают проекты, опирающиеся на использование уникальных возможностей аэростатного комплекса SPIRALE [французский акроним для TDLAS (Tunable Diode Laser Spectroscopy)] [56]. Комплекс был разработан для контактных высокоточных измерений высотных профилей малых газовых составляющих в стратосфере.

Первые тестовые испытания были проведены в 2003 г., в настоящее время SPIRALE активно ис-

пользуется для валидации и калибровки данных действующих орбитальных систем, в первую очередь ACE-FTS, MIPAS и GOSAT [49, 55]. Технология измерений SPIRALE опирается на принципы TDLAS с использованием открытой многоходовой ячейки Хэрриотта с отражателем, расположенным в 3,5 м ниже gondoly аэростата. Использование одновременно шести перестраиваемых диодных лазеров (TDL), функционирующих в разных оптимально выбранных микроокнах прозрачности в области $1230\text{--}1320\text{ см}^{-1}$, позволяет синхронно снимать профиль концентрации представительного набора малых газовых составляющих (O_3 , CO , CO_2 , CH_4 , N_2O , NO_2 , NO , HNO_3 , HCl , HOCl , COF_2 и H_2O_2) на уровне, достигающем нескольких десятков ppt, с ошибкой 3–5% [56].

Переходим далее к обзору опубликованных данных, характеризующих современное состояние атмосферы в плане содержания, высотного и широтного распределения парниковых газов техногенного происхождения. На рис. 11 представлены результаты многолетних контактных аэростатных измерений концентрации CO_2 в верхней тропосфере и стратосфере [48, 57] в сопоставлении с данными спутникового зондирования [53, 58].

Низкая точность измерения концентрации CO_2 средствами пассивного спутникового зондирования при зондировании в надир объясняется тем, что в отличие от других парниковых газов отношение смеси $X_{\text{CO}_2}(H)$ слабо изменяется с высотой H , что понижает информативность подобных методов.

При лимбовом спутниковом зондировании атмосферы по восходящему или заходящему солнцу результаты восстановления концентрации CO_2 в верхней тропосфере и стратосфере [49, 55] носят более

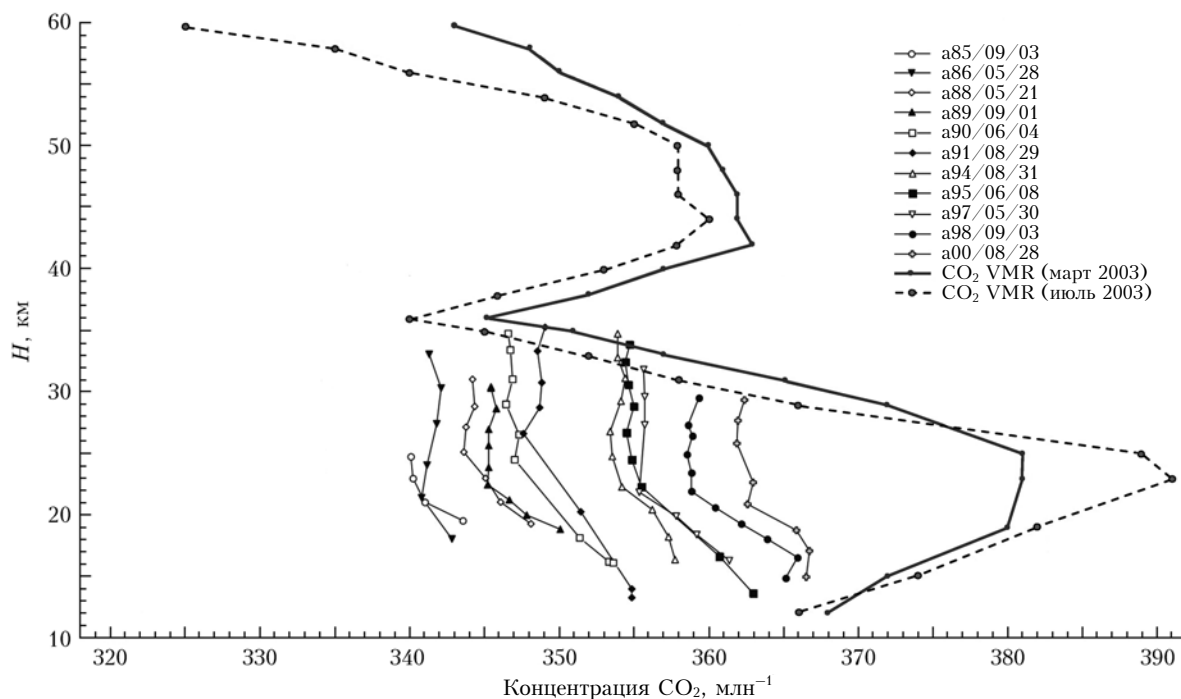


Рис. 11. Высотное распределение концентрации CO_2 в верхней тропосфере и стратосфере по данным аэростатного [48, 57] и спутникового [53, 58] зондирования

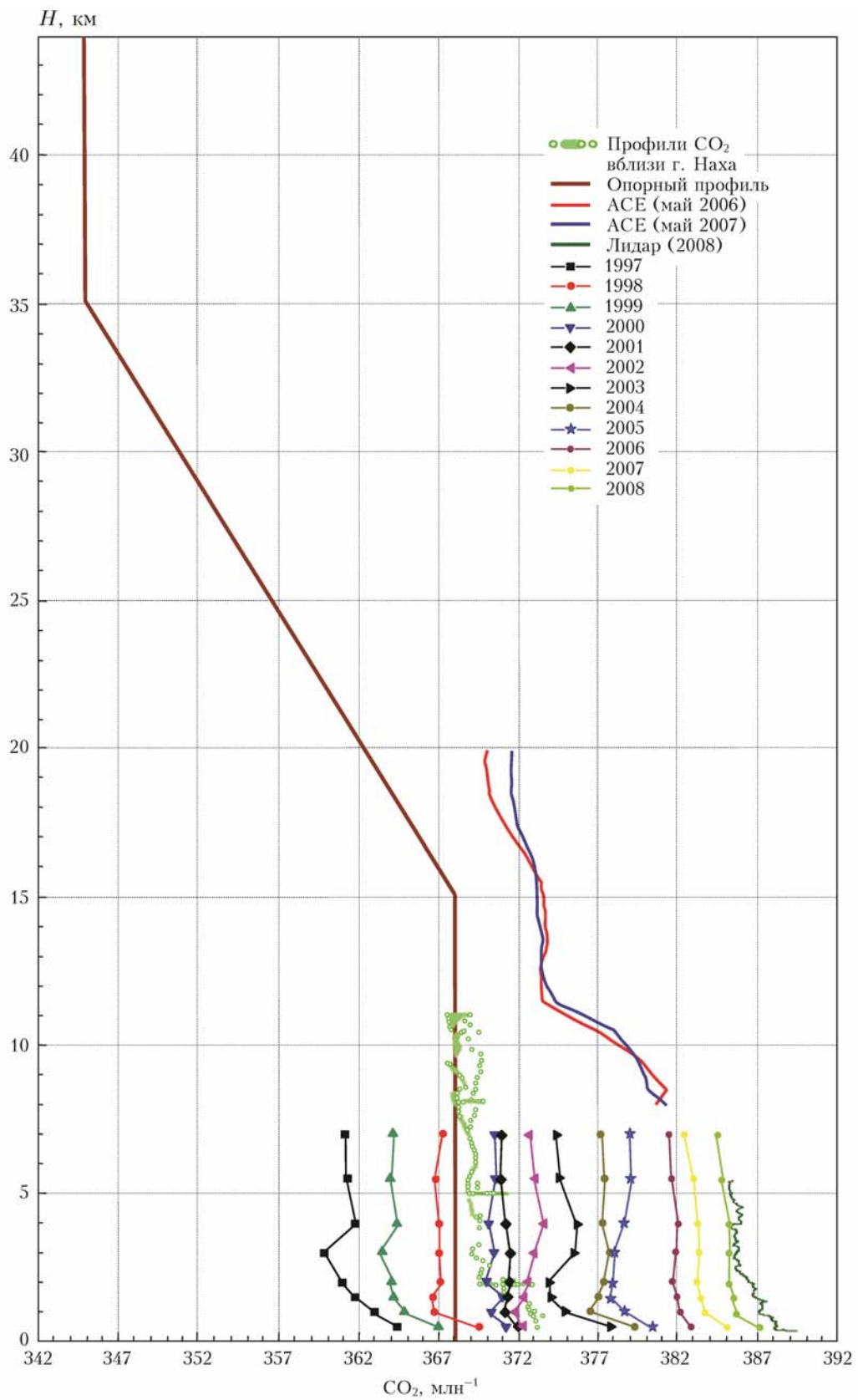


Рис. 12. Компиляция известных результатов измерения высотного распределения концентрации CO_2 в атмосфере по данным самолетного [40, 60] (серия профилей в нижней части рисунка), лимбового спутникового (АСЕ-FTS, 2007, 2008 гг.) и лазерного [61] зондирования. Здесь же приведен оценочный опорный профиль, использованный в [59]

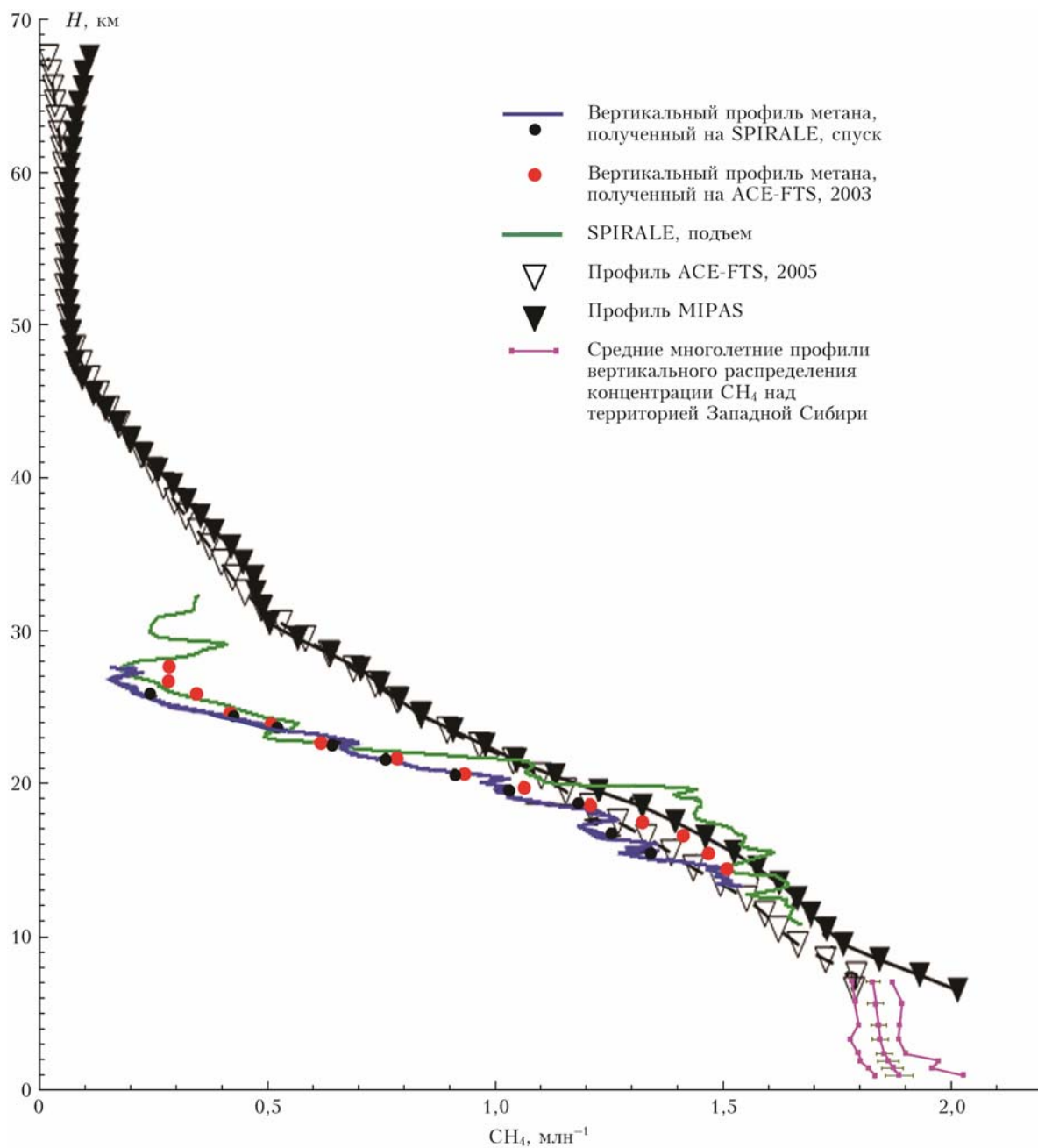


Рис. 13. Компиляция известных результатов измерения высотного распределения концентрации CH_4 в средней атмосфере по данным аэростатного (серия профилей в нижней части рисунка) и спутникового (ACE-FTS, 2003, 2005 гг.) зондирования. В области тропосферы приведены для стыковки данные самолетных измерений

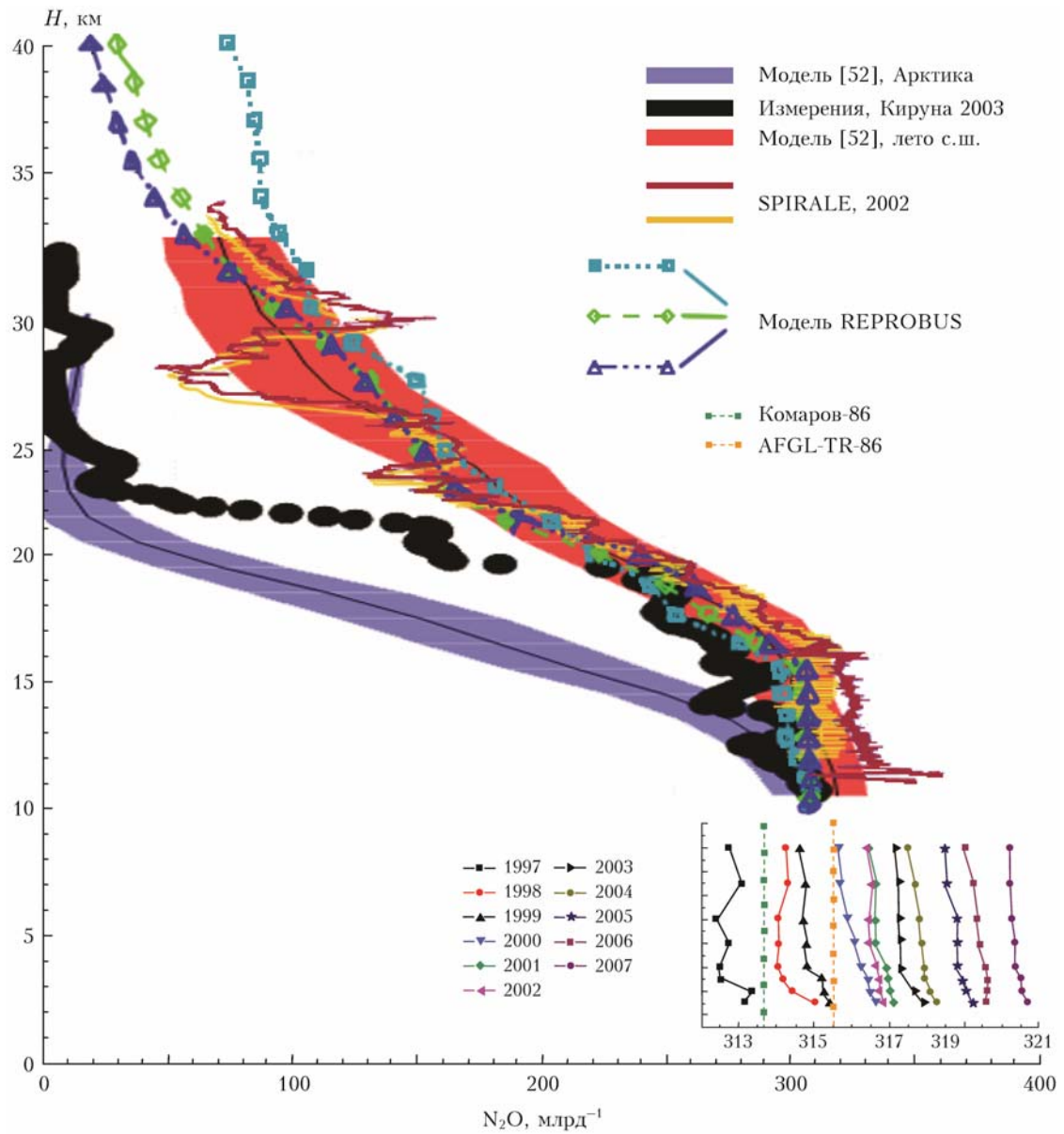


Рис. 14. Сравнение результатов измерения высотного распределения концентрации N_2O в атмосфере по данным аэростатного и самолетного (серия профилей в нижней части рисунка) с прогностическими данными известных модельных оценок [59, 60]

адекватный характер, что качественно подтверждается тем, что они хорошо продолжают высотную тенденцию данных наших самолетных измерений (рис. 12, цв. вклейка).

Результаты сопоставления высотных профилей CO₂ в атмосфере получены всеми известными средствами зондирования. Здесь же приведен оценочный опорный профиль, использованный в работе [59], он более качественно отражает картину вертикального распределения CO₂ в атмосфере, чем устаревшие модельные профили, показанные на рис. 10.

На рис. 13 (цв. вклейка) приведены результаты наиболее успешных и представительных измерений вертикальных профилей метана в средней атмосфере, проведенных в двух циклах полета спутников ACE-FTS и MIPAS [49, 52], в сопоставлении с данными аэростатного комплекса SPIRALE [55, 56] в режиме спуска и подъема. В области тропосферы эти данные подпираются среднестатистическими данными наших самолетных измерений [40]. Метан — наиболее успешно измеряемый парниковый газ. Приведенные данные мониторинга, полученные в близкие временные отрезки, находятся в хорошем не только качественном, но и количественном соответствии.

На рис. 14 (цв. вклейка) представлены результаты подобного сравнительного анализа для закиси азота.

Обращает на себя внимание тот факт, что N₂O как газ преимущественно техногенного происхождения обладает наиболее выраженным широтным ходом. В регионах Арктики, как следует из приведенных данных, концентрация N₂O стремительно убывает с высотой. Для сопоставления приведены результаты химико-климатического прогноза по модели LMDz-REPROBUS [62], модели Engell [63]. В тропосфере показаны упомянутые выше статистические модели Комаров-86 и AFGL-TR-86, в данном случае их нейтральный высотный ход неплохо отражает действительность, поскольку временной тренд нарастания концентрации N₂O незначителен, что не противоречит и нашим самолетным измерениям.

Приведенные выше данные позволяют сделать вывод о необходимости уточнения оценочной модели вертикального распределения концентрации малых газовых примесей. К сожалению, статистическая обработка данных о вертикальном распределении парниковых газов в атмосфере (см. рис. 11–14) для создания такой модели, выполненная одним из соавторов, не была завершена.

Работа выполнена при поддержке программы Президиума РАН № 4, программы ОНЗ РАН № 5, междисциплинарных интеграционных проектов СО РАН № 35, 70 и 131, грантов РФФИ № 11-05-00470, 11-05-00516, 11-05-93116 и 11-05-93118, госконтрактов Минобрнауки № 02.740.11.0674, 14.740.11.0204 и 11.519.11.5009, Фонда глобальных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

1. Gurney K.R., Rachel M., Law R.M., Denning A.S., Rayner P.J., Baker D., Bousquet Ph., Bruhwiler L., Chen Y.-H., Ciais Ph., Fan S., Fung I.Y., Gloor M., Heimann M., Hi-

guchi K., John J., Maki T., Maksyutov Sh., Masarie K., Peylin Ph., Prather M., Pak B.C., Randerson J., Sarmiento J., Taguchi S., Takahashi T., Yuen Ch.-W. Towards robust regional estimates of CO₂ sources and sinks using atmospheric transport models // Nature (Gr. Brit.). 2002. V. 415, N 6872. P. 626–630.

2. Crutzen P.J., Elansky N.F., Hahn M., Golitsyn G.S., Brenninkmeijer C.A.M., Scharffe D.H., Belikov I.B., Maiss M., Bergamaschi P., Rocmann R., Grisenko A.M., Sevostyanov M. Trace Gas Measurements between Moscow and Vladivostok Using the TransSiberian Railroad // J. Atmos. Chem. 1998. V. 29, N 2. P. 179–194.
3. Ramonet M., Ciais P., Nepomniachii I., Sidorov K., Neubert R.E.M., Langendorfer U., Picard D., Kazan V., Biraud S., Gusti M., Kolle O., Schulze E.-D., Lloyd J. Three years of aircraft-based trace gas measurements over the Fyodorovskoye southern taiga forest, 300 km northwest of Moscow // Tellus. B. 2002. V. 54, N 5. P. 713–734.
4. Paris J.-D., Ciais P., Nédélec P., Ramonet M., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Golytsin G.S., Granberg I., Athier G., Boumard F., Cousin J.-M., Cayez G., Stohl A. The YAK-AEROSIB transcontinental aircraft campaigns: new insights on the transport of CO₂, CO, and O₃ across Siberia and in the Northern Hemisphere // Tellus. B. 2008. V 60, N 4. P. 551–568.
5. Paris J.-D., Arshinov M.Yu., Ciais P., Belan B.D., Nédélec P. Large-scale aircraft observations of ultra-fine and fine particle concentrations in the remote Siberian troposphere: New particle formation studies // Atmos. Environ. 2009. V. 43, N 6. P. 1302–1309.
6. Paris J.-D., Stohl A., Nédélec Ph., Arshinov M., Panchenko M.V., Shmargunov V.P., Law K.S., Belan B.D., Ciais Ph. Wildfire smoke in the Siberian Arctic in summer: source characterization and plume evolution from airborne measurements // Atmos. Chem. Phys. 2009. V. 9, N 23. P. 9315–9327.
7. Paris J.-D., Stohl A., Ciais P., Nédélec P., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Ramonet M. Source-receptor relationships for airborne measurements of CO₂, CO, and O₃ above Siberia: a cluster-based approach // Atmos. Chem. Phys. 2010. V. 10, N 4. P. 1671–1687.
8. 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. Amer. Meteorol. Soc. 2010. V. 91, N 5. P. 1–17.
9. Kozlova E.A., Manning A.C., Kisilyakhov Y., Seifert T., Heimann M. Seasonal, synoptic, and diurnal-scale variability of biogeochemical trace gases and O₂ from a 300-m tall tower in central Siberia // Global Biogeochem. Cyc. 2008. V. 22, GB4020, doi: 10.1029/2008GB003209.
10. Sasakawa M., Shimoyama K., Machida T., Tsuda N., Suto H., Arshinov M., Davidov D., Fofonov A., Krasnov O., Saeki T., Koyama Y., Maksyutov S. Continuous Measurement of Methane Concentration using 9-Tower Network over Siberia // Tellus. B. 2010. V. 62, N 5. P. 403–416.
11. Kurganova I.N., Kudeyarov V.N., Lopes de Gerenyu V.O. Updated estimate of carbon balance on Russian territory // Tellus. B. 2010. V. 62, N 5. P. 497–505.
12. Houghton R.A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000 // Tellus. B. 2003. V. 55. P. 378–390.
13. Rodenbeck C., Houweling S., Gloor M., Heimann M. CO₂ flux history 1982–2001 inferred from atmospheric data using a global inversion of atmospheric transport

- // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2003. V. 3, N 3. P. 2575–2659.
14. *Shvidenko A., Nilsson S.* A synthesis of the impact of russian forests on the global carbon budget for 1961–1998 // *Tellus. B.* 2003. V. 55. P. 391–415.
 15. *Denning A.S., Takahashi T., Friedlingstein P.* Can a strong atmospheric CO₂ rectifier effect be reconciled with a «reasonable» carbon budget? : KEYNOTE PERSPECTIVE // *Tellus. B.* 1999. V. 51, N 2. P. 249–253.
 16. *Bousquet P., Ciais P., Miller J.B., Dlugokencky E.J., Hauglustaine D.A., Prigent C., Van der Werf G.R., Peylin P., Brunke E.-G., Carouge C., Langenfelds R.L., Lathière J., Papa F., Ramonet M., Schmidt M., Steele L.P., Tyler S.C., White J.* Contribution of anthropogenic and natural sources to atmospheric methane variability // *Nature (Gr. Brit.).* 2006. V. 443, N 7110. P. 439–443.
 17. *Zimov S.A., Schuur E.A.G., Chapin III F.S.* Permafrost and the Global Carbon Budget // *Science.* 2006. V. 312, N 5780. P. 1612–1613.
 18. *Walter K.M., Zimov S.A., Chanton J.P., Verbyla D., Chapin III F.S.* Methane bubbling from Siberian thaw lakes as a positive feedback to climate warming // *Nature (Gr. Brit.).* 2006. V. 443, N 7107. P. 71–75.
 19. *Bloom A.A., Palmer P.I., Fraser A., Reay D.S., Frankenberg Ch.* Large-Scale Controls of Methanogenesis Inferred from Methane and Gravity Spaceborne Data // *Science.* 2010. V. 327, N 5963. P. 322–325.
 20. *Dlugokencky E.J., Bruhwiler L., White J.W.C., Emons L.K., Novelli P.C., Montzka S.A., Masarie K.A., Lang P.M., Crotwell A.M., Miller J.B., Gatti L.V.* Observational constraints on recent increases in the atmospheric CH₄ burden // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L18803.
 21. *Van der Werf G.R., Randerson J.T., Giglio L., Collatz G.J., Kasibhatla P.S., Arellano A.F.* Interannual variability in global biomass burning emissions from 1997 to 2004 // *Atmos. Chem. Phys.* 2006. V. 6, N 11. P. 3423–3441.
 22. *Korontzi S., McCarty J., Loboda T., Kumar S., Justice C.* Global distribution of agricultural fires in croplands from 3 years of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data // *Global Biogeochem. Cycles.* 2006. V. 20. GB2021, doi: 10.1029/2005GB002529.
 23. *Nédélec P., Thouret V., Brioude J., Sauvage B., Cammas J., Stohl A.* Extreme CO concentrations in the upper troposphere over northeast Asia in June 2003 from the in situ MOZAIC aircraft data // *Geophys. Res. Lett.* 2005. V. 32, N 14. L14807.
 24. *Wotawa G., Novelli P.C., Trainer M., Granier C.* Interannual variability of summertime CO concentrations in the Northern Hemisphere explained by boreal forest fires in North America and Russia // *Geophys. Res. Lett.* 2001. V. 28, N 24. P. 4575–4578.
 25. *Warneke C., Bahreini R., Brioude J., Brock C.A., de Gouw J.A., Fahey D.W., Froyd K.D., Holloway J.S., Middlebrook A., Miller L., Montzka S., Murphy D.M., Peischl J., Ryerson T.B., Schwarz J.P., Spackman J.R., Veres P.* Biomass burning in Siberia and Kazakhstan as an important source for haze over the Alaskan Arctic in April 2008 // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. L02813.
 26. *Global Greenhouse Gas Monitoring Network.* URL: <http://gaw.kishou.go.jp>.
 27. *Global Monitoring Network.* URL: <http://www.cmdl.noaa.gov>
 28. *Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации.* Т. 1. Изменения климата. М.: Росгидромет, 2008. 246 с.
 29. *Anderson G.P., Chetwynd J.H., Clough S.A., Shettle E.P., Kneizys F.X.* AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0–120 km) AFGL-TR-86-0110 // *Environ. Res. Papers.* 1986. N 954. 42 p.
 30. *Комаров В.С.* Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 264 с.
 31. *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.
 32. *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 мониторинга малых газовых составляющих атмосферного воздуха // *Метеорол. и гидрол.* 1999. № 3. С. 110–118.
 33. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуи Г., Краснов О.А., Мачида Т., Максюттов Ш., Недзлэк Ф., Рамонет М., Сиас 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.
 34. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В.* Организация мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу компонент над территорией Сибири и некоторые его результаты. 2. Аэрозольный состав // *Оптика атмосф. и океана.* 2006. Т. 19, № 12. С. 1062–1067.
 35. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуи Г., Краснов О.А., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофанов А.В., Шимомяма К.* Пространственная и временная изменчивость концентрации CO₂ и CH₄ в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 2. С. 183–192.
 36. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Краснов О.А., Фофанов А.В., Иноуе Г., Мачида Т., Максюттов Ш., Сасакава М., Шимоюата К.* Тренды концентраций парниковых газов в Западной Сибири // *Материалы IX Сибирского совещания по климатоэкологическому мониторингу.* Томск, 3–6 октября 2011 г. С. 85–87.
 37. *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., Тумаков А.Г., Шаманов 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.
 38. *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., Shatanov V.S., Shmargunov V.P.* Optik-É AN-30 aircraft laboratory: 20 years of environmental research // *J. Atmos. and Ocean. Technol.* 2012. V. 29, N 1. P. 64–75.
 39. *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., Сигов Г.П., Симоненков Д.В., Синецын Д.С., Толмачев Г.Н., Филитов Д.В., Фофанов А.В., Чернов Д.Г., Шаманов В.С., Шмаргунов В.П.* Самолет-лаборатория Ту-134 «Оптик» // *Оптика атмосф. и океана.* 2011. Т. 24, № 9. С. 805–816.
 40. *Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуи Г., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофанов А.В.* Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 5. С. 457–464.
 41. *Ершов Ю.И.* Органическое вещество биосферы и почвы. Новосибирск: Наука, 2004. 104 с.

42. WMO Greenhouse Gas Bulletin. 2007. N 3. 4 p.
43. Steele L.P., Dlugokencky E.J., Lang P.M., Tans P.P., Martin R.C., Masarie K.A. Showing down of the global accumulation of atmospheric methane during the 1980 // Nature (Gr. Brit.). 1992. V. 358, N 6384. P. 313–316.
44. Conway T.J., Tans P.P., Waterman L.S., Thoning K.W., Kitzis D.R., Massarie K.A., Zhang N. Evidence for interannual variability of the carbon cycle from the National Oceanic and Atmospheric Administration // Climate Monitoring and Diagnostics Laboratory global air sampling network // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N 11. P. 22 831–22 855.
45. Warneke T., de Beek R., Buchwitz M., Notholt J., Schulz A., Velasco V., Schrems O. Shipborne solar absorption measurements of CO₂, CH₄, N₂O, and CO and comparison the SCIAMACHY WFM-DOAS retrievals // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5, N 8. P. 2029–2034.
46. Gurk Ch., Fischer H., Hoor P., Lawrence M.G., Lelieveld J., Wernli H. Airborne in-situ measurements of vertical, seasonal and latitudinal distributions of carbon dioxide over Europe // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, N 21. P. 6395–6403.
47. Levin I., Ciais P., Langenfelds R., Schmidt M., Ramonet M., Sidorov K. Three years of trace gas observations over the Euro-Siberian domain derived from aircraft sampling—a concerted action // Tellus. B. 2002. V. 54, N 5. P. 696–712.
48. Aoki S., Nakazawa T., Machida T., Sugawara S., Morimoto S. Carbon dioxide variations in the stratosphere over Japan, Scandinavia and Antarctica // Tellus. B. 2003. V. 55, N 2. P. 178–186.
49. De Mazière M., Vigouroux C., Bernath P.F., Baron P., Blumenstock T., Boone C., Brogniez C., Catoire V., Coffey M., Duchatelet P., Griffith D., Hannigan J., Kasai Y., Kramer I., Jones N., Mahieu E., Manney G.L. Validation of ACE-FTS v2.2 methane profiles from the upper troposphere to lower mesosphere // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. V. 7, N 12. P. 17975–18014.
50. Payan S., Camy-Peyret C., Oelhaf H., Wetze G., Maucher G., Keim C., Pirre N., Huret N., Enge A., Volk M.C., Kuellmann H., Kuttippurath J., Cortesi U., Bianchini G., Mencaraglia F., Raspollini P., Redaelli G. Validation and data characteristics of methane and nitrous oxide profiles observed by MIPAS and processed with Version 4.61 algorithm // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. V. 7, N 12. P. 18043–18111.
51. Camy-Peyret C., Dufour G., Payan S., Oelhaf H., Wetzel G., Stiller G. Validation of mipas N₂O profiles by stratospheric balloon, aircraft and ground based measurements // Proc. of the Second Workshop on the Atmospheric Chemistry Validation of ENVISAT (ACVE-2) ESA-ESRIN, Frascati, Italy. 3–7 May 2004. (ESA SP-562, August 2004) EMI02CC1.
52. URL: http://envisat.esa.int/pub/ESA_DOC/envisat_val_1202/proceedings/ACV/balloon/04_moreau.pdf — spirale data
53. Fix A., Ehret G., Flentje H., Poberaj G., Gottwald M., Finkenzeller H., Bremer H., Bruns M., Burrows J.P., Kleinböhl A., Küllmann H., Richter A., Wang P., Heue K.-P., Platt U. SCIAMACHY validation by aircraft remote sensing: design, execution, and first measurement results of the SCIA-VALUE mission // Atmos. Chem. Phys. 2005. V. 5, N 5. P. 1273–1290.
54. Clerbaux C., George M., Turquety S. CO measurements from the ACE-FTS satellite instrument: data analysis and validation using ground-based, airborne and spaceborne observations // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. V. 7, N 10. P. 15277–15340.
55. Mahieu E., Duchatelet P., Demoulin P., Walker K.A. Validation of ACE-FTS v2.2 measurements of HCl, HF, CCl₃F and CCl₂F₂ using space-, balloon- and ground-based instrument observations // Atmos. Chem. Phys. 2008. V. 8, N 20. P. 6199–6221.
56. Moreau G., Robert C., Catoire V., Chartier M., Camy-Peyret C., Huret N., Pirre M., Pomathiod L., Chalumeau G. SPIRALE: a multispecies in situ balloon-borne instrument 30 with six tunable diode laser spectrometers // Appl. Opt. 2005. V. 44, N 28. P. 5972–5989.
57. Nakazawa T., Aoki S., Kawamura K. Variation of stratospheric trace gases measured using a balloon-borne cryogenic sampler // Adv. Space Res. 2002. V. 30, N 5. P. 1349–1357.
58. URL: <http://ara.lmd.polytechnique.fr/index.php?page=carbon-cycle>
59. Gribanov K.G., Imasu R., Zakharov V.I. Neural networks for CO₂ profile retrieval from data of GOSAT/TANSO-FTS // Atmos. Ocean. Opt. 2009. V. 22, N 9. P. 890–897.
60. Sawa Y., Matsueda H., Makino Y. Aircraft Observation of CO₂, CO, O₃ and H₂ over the North Pacific during the PACE-7 Campaign // Tellus. B. 2004. V. 56, N 1. P. 2–20.
61. Abshire J.B., Riris H., Allan G.R. Pulsed airborne lidar measurements of atmospheric CO₂ column absorption // Revised Manuscript Submitted to Tellus B. July 22, 2010. doi: 10.1111/j.16000889.2010.00502.
62. Jourdain L., Bekki S., Lott F., Lefever F. The coupled chemistry-climate model LMDz-REPROBUS: description and evaluation of a transient simulation of the period 1980–1999 // Ann. Geophys. 2008. V. 26, N 6. P. 1391–1413.
63. Engel A., Mobius T., Haase H.-P., Bonisch H., Wetter T., Schmidt U., Levin I. Observation of mesospheric air inside the arctic stratospheric polar vortex in early 2003 // Atmos. Chem. Phys. 2006. V. 6, N 1. P. 267–282.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, G.M. Krekov, A.V. Fofonov, S.V. Babchenko, G. Inoue, T. Machida, Sh. Maksutov, M. Sasakawa, K. Shimoyama. **The dynamics in vertical distribution of greenhouse gases in the atmosphere.**

The analysis of vertical distribution of greenhouse gases is carried out according to measurements of authors and to references. Comparison of the received results with most frequently used models is carried out. It is shown, that models are substantially outdated and require a new development.