

ОПТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И БАЗЫ ДАННЫХ ОПТИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ
ОБ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЕ

УДК 551.510.42

**Крупномасштабные исследования газового
и аэрозольного состава воздуха
над Сибирским регионом**

**П.Н. Антохин¹, В.Г. Аршинова¹, М.Ю. Аршинов¹, Б.Д. Белан¹,
С.Б. Белан¹, Д.К. Давыдов¹, Г.А. Ивлев¹, А.В. Козлов¹,
P. Nédélec², J.-D. Paris³, Т.М. Рассказчикова¹,
Д.Е. Савкин¹, Д.В. Симоненков¹, Т.К. Складнева¹,
Г.Н. Толмачев¹, А.В. Фофонов^{1*}**

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

² *Лаборатория аэрологии*

14, Avenue E. Belin, 31400, Toulouse, France

³ *Лаборатория исследования климата и окружающей среды,
Unite mixte CEA-CNRS, Bat709, CEL' Orne des Merisiers 91191 GIF SUR YVETTE, Paris, France*

Поступила в редакцию 10.10.2013 г.

Приведена новая технология самолетного зондирования атмосферы. В сочетании с современным программным обеспечением она позволяет исследовать крупномасштабные особенности пространственного распределения состава воздуха. С помощью этой технологии исследованы крупномасштабные пространственные распределения аэрозоля, СО, СО₂ и О₃ над Арктическим побережьем и континентальными районами Сибири. Выявлены кардинальные различия в распределении аэрозоля, СО и СО₂ над континентом и побережьем. Это обусловлено различием в мощности источников и стоков примесей в рассмотренных районах.

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

Введение

Согласно [1] глобальный средний климат Земли определяется поступающей от Солнца энергией, свойствами Земли и ее атмосферы, а именно отражением, поглощением и излучением энергии в атмосфере и на поверхности. Хотя изменения в полученной солнечной энергии (вызванные, например, колебаниями в орбите вращения Земли вокруг Солнца) неизбежно влияют на энергетический баланс

Земли, свойства атмосферы и земной поверхности тоже важны, и на них могут влиять климатические обратные связи. Значение климатических обратных связей очевидно из характера прошлых изменений климата, зафиксированных в ядрах льда возрастом до 650 тыс. лет.

В атмосфере и на земной поверхности происходят изменения, которые преобразуют глобальный энергетический баланс Земли и могут поэтому вызывать изменения климата. Среди них – рост концентрации парниковых газов, действие которых увеличивает поглощение атмосферой радиации и повышает содержание аэрозолей (микроскопических частиц или капелек), отражающих и поглощающих поступающее солнечное излучение и изменяющих радиационные свойства облаков. Такие изменения обуславливают радиационное воздействие климатической системы.

Доминирующим фактором в радиационном воздействии на климат в индустриальную эпоху является повышение концентрации различных парниковых газов в атмосфере. Некоторые из основных парниковых газов образуются естественным путем, но

* Павел Николаевич Антохин (arp@iao.ru); Виктория Геннадьевна Аршинова; Аршинов Михаил Юрьевич (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Сергей Борисович Белан; Денис Константинович Давыдов (denic@iao.ru); Георгий Алексеевич Ивлев (ivlev@iao.ru); Артем Владимирович Козлов (artem@iao.ru); Philippe Nédélec; Jean-Daniel Paris; Татьяна Михайловна Рассказчикова (rtm@iao.ru); Денис Евгеньевич Савкин; Денис Валентинович Симоненков (simon@iao.ru); Татьяна Константиновна Складнева (tatyana@iao.ru); Геннадий Николаевич Толмачев (tgn@iao.ru); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

повышение их концентрации в атмосфере за последние 250 лет вызвано в значительной степени деятельностью человека. Некоторые другие парниковые газы полностью являются результатом деятельности человека. Вклад каждого парникового газа в радиационное воздействие за конкретный период времени определяется изменением его концентрации в атмосфере за этот период и эффективной ролью газа в нарушении радиационного баланса. Нынешние концентрации в атмосфере разнообразных парниковых газов, рассмотренных в докладе [1], различаются между собой более чем на 8 порядков величины, а их радиационная эффективность — более чем на 4 порядка, что отражает колоссальное разнообразие их свойств и происхождения.

Текущая концентрация того или иного парникового газа в атмосфере — это конечный результат в истории выбросов данного газа и удаления его из атмосферы. Газы и аэрозоли испускаются в атмосферу в ходе деятельности человека или образуются из прекурсоров, выброшенных в атмосферу. Эти выбросы компенсируются процессами химического и физического удаления. За важным исключением углекислого газа (CO_2), эти процессы ежегодно удаляют конкретную долю количества газа из атмосферы, и величина, обратная скорости этого удаления, дает среднее время жизни этого газа. В некоторых случаях скорость удаления может изменяться в зависимости от концентрации газа или других свойств атмосферы (например, температуры или фоновых химических свойств).

В связи с этим для прогнозирования изменений климата необходимо знать фактическое распределение радиационных составляющих атмосферы и тенденций их изменения. Такие данные для всего земного шара можно получать либо с помощью сети станций, которых нет на территории России, либо в ходе спутникового зондирования, пока уступающего по требуемой точности измерений другим методам [2–7].

Сравнение различных методов показывает, что наиболее точные данные о газовом и аэрозольном составе атмосферы в настоящее время дают исследо-

вания с использованием самолета [5–7]. Основным преимуществом самолетного метода изучения атмосферы по сравнению с другими является то, что самолет-лаборатория (СМЛ) может работать непосредственно в исследуемом объеме, т.е. производить измерения *in situ*. Кроме того, СМЛ позволяет сопровождать изучаемое атмосферное явление на расстоянии в тысячи километров и следить за эволюцией его характеристик. К достоинствам самолетного метода можно отнести комплексность летных экспериментов, так как измерения производятся в системе единого времени по взаимно согласованным программам.

Для восполнения отсутствия данных над территорией России в рамках Российско-французского проекта YAK-AEROSIB были развернуты крупномасштабные самолетные исследования состава воздуха над Сибирским регионом. Начиная с 2006 г. проведено 8 летних кампаний. Основные результаты, полученные в ходе самолетных экспериментов, опубликованы в [8–13]. В настоящей статье остановимся на результатах, полученных в ходе Международного полярного года в рамках проекта POLARCAT и летной кампании YAK-AEROSIB-2008 г., проходившей по другому маршруту в этом же месяце. Для оценки тенденций пространственного изменения концентраций примесей будут привлечены данные и других кампаний проекта YAK-AEROSIB.

Районы проведения работ

На рис. 1 приведены схемы маршрутов по проекту YAK-AEROSIB и POLARCAT. Видно, что проект YAK-AEROSIB выполняется двумя маршрутами: северным и южным. Северный проходит через Новосибирск–Енисейск–Мирный–Якутск, южный — через Якутск–Ленск–Братск–Красноярск–Новосибирск. Таким образом, он охватывает основные природные зоны Сибирского региона.

Проект POLARCAT был нацелен на анализ состава воздуха над Арктическим регионом и выполнялся также для двух маршрутов. Северный проходил через Новосибирск–Салехард–Хатангу–Чокурдах–

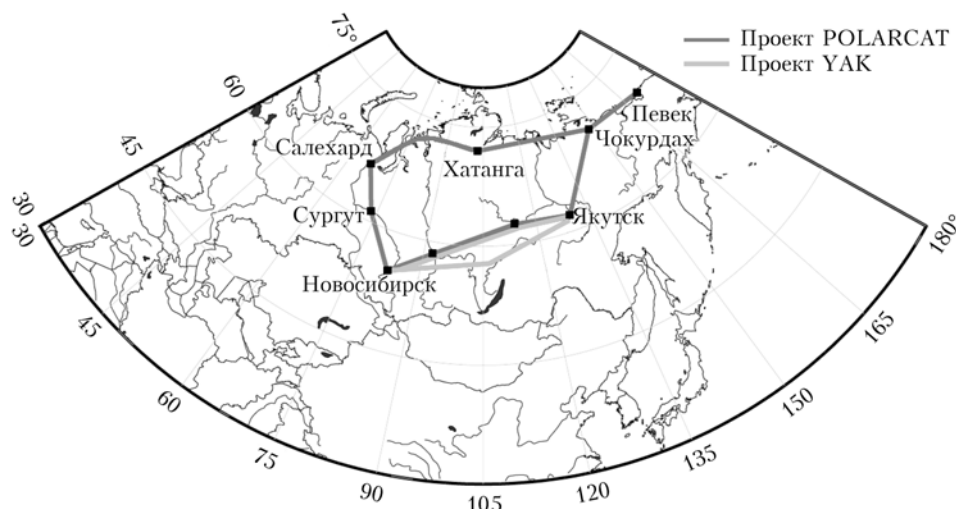


Рис. 1. Схемы маршрутов самолета-лаборатории по проектам YAK-AEROSIB и POLARCAT

Певек, южный — через Чокурдах—Якутск—Мирный—Енисейск—Новосибирск. Южный маршрут выполнялся для сопоставления данных арктической и континентальной территорий Сибири.

Полеты выполнялись вначале на самолете-лаборатории Ан-30 «Оптик-Э» [14–16], а затем на СМЛ Ту-134 «Оптик» [17]. В этих же работах приведены характеристики использованного оборудования.

Технология зондирования и особенности обработки данных

Для реализации целей проектов была разработана особая технология зондирования и обработки данных. В отличие от зарубежных коллег, которые представляют либо горизонтальные, либо вертикальные профили измеряемых величин, мы хотели получить вертикальные разрезы атмосферы над исследуемыми территориями.

Для получения именно вертикального разреза атмосферы по всему маршруту полет выполняли переменнo по высоте от минимально возможной 0,5 км над рельефом и 0,1 км в зоне аэропорта до 8,5 км на трассе. В результате на каждом маршруте получались профили, разнесенные по горизонтали (в зависимости от высоты) на 50–250 км. Такой профиль маршрута позволяет оценивать градиенты измеряемых параметров с шагом 50–500 км. Причем градиенты могут быть вычислены для разных высот, начиная от пограничного слоя и заканчивая свободной тропосферой. В качестве примера на рис. 2 приведен профиль маршрута на участке Новосибирск—Мирный—Якутск.

Основная часть измерений проводится в течение всего полета в непрерывном режиме. В то же время часть измерений не является оперативной, например химический состав аэрозоля, который определяется в аналитических лабораториях. Для такого анализа необходимо его концентрирование (в нашем случае на фильтре) до заданной величины, определяемой порогом обнаружения применяемого метода. Для этой цели предусмотрены горизонтальные участки полета, обозначенные на рис. 2 горизонтальными линиями. Получаемый результат — химический состав аэрозоля будет относиться к середине горизонтального участка на данной высоте.

Для построения вертикальных разрезов атмосферы применяется геостатистический сеточный Kriging-метод, основанный на анализе вариограмм [18]. Все собранные в полете данные разбиваются на 1-минутные участки и усредняются для привязки измерений к пространственным точкам (рис. 3).

Таким образом, получается как бы одномоментная картина распределения измеряемых величин по высоте над районом зондирования. Далее, для каждого атмосферного параметра методом Point Kriging

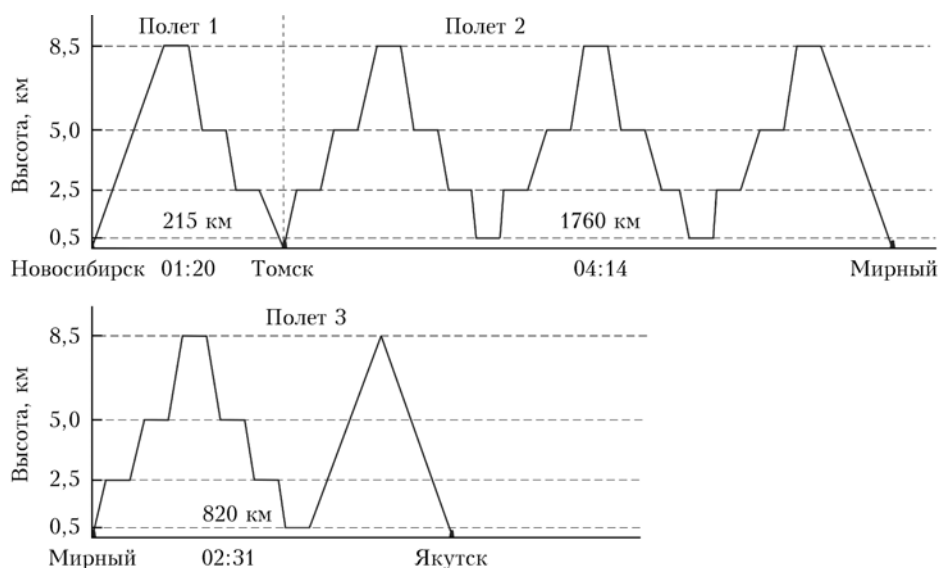


Рис. 2. Профиль полета по маршруту Новосибирск—Мирный—Якутск

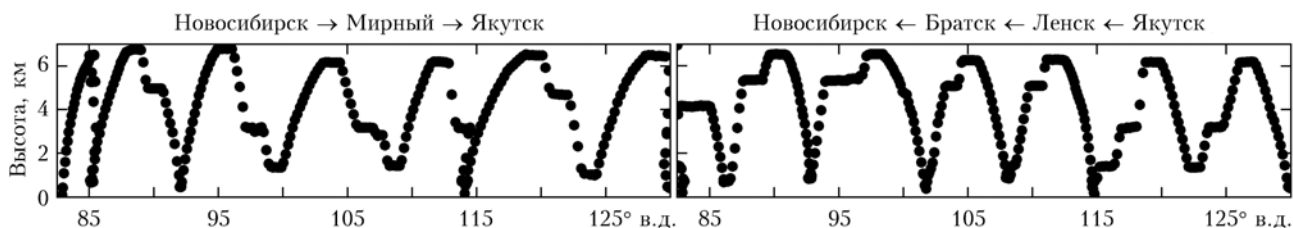


Рис. 3. Набор точек 1-минутного усреднения величин для построения высотных разрезов в ходе измерительной кампании УАК-5: 21–29.07.2008 г.

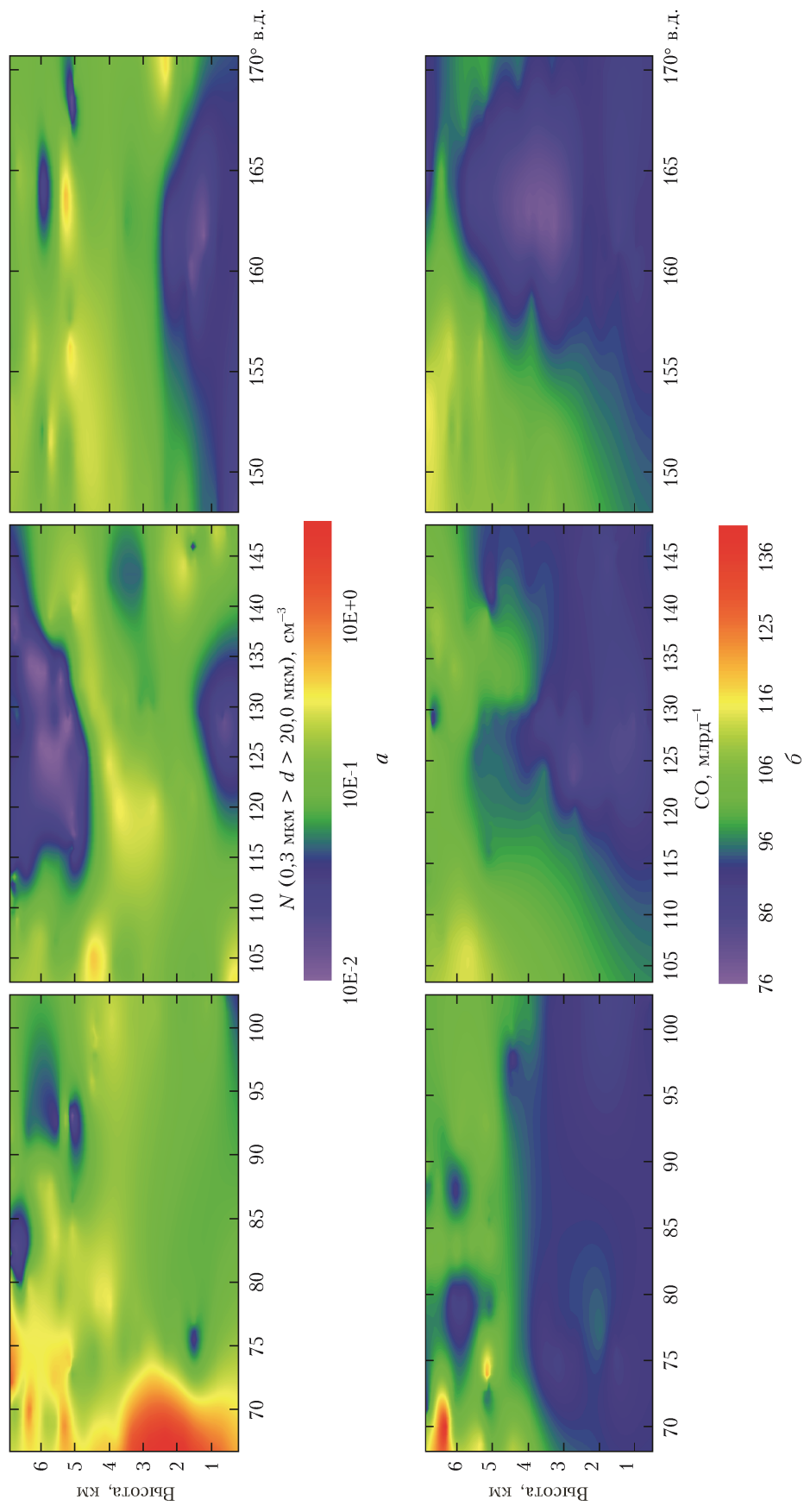


Рис. 4. Вертикальные разрезы атмосферы по маршруту Салехард–Хаганга–Чокурдах–Певек в ходе измерительной кампании POLARCAT: 7–10.07.2008 г.

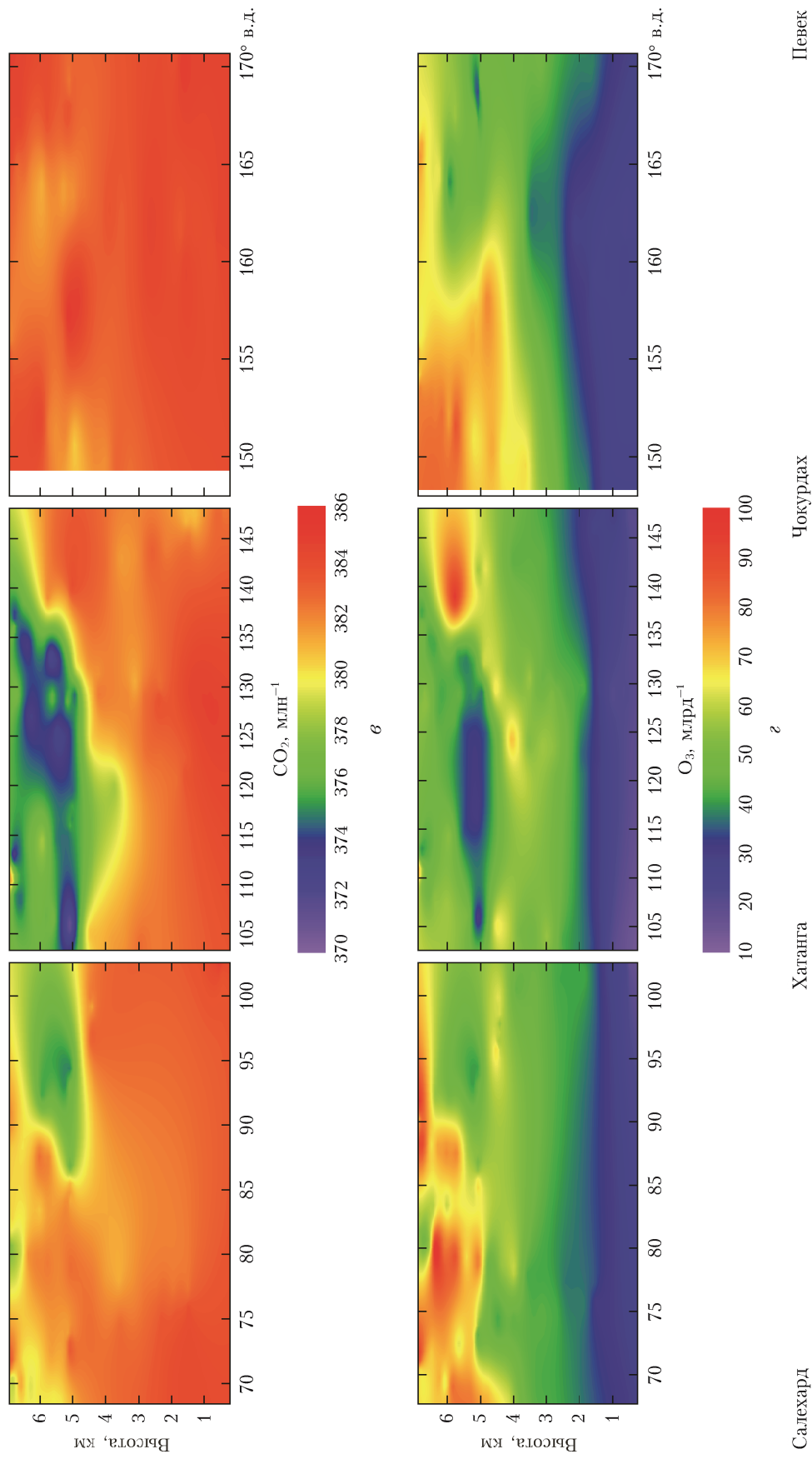


Рис. 4. Окончание

проводится процедура восстановления пространственного распределения при условиях линейности вариограмм ($Slope = 1$) с легкой горизонтальной анизотропией ($Ratio = 2$; $Angle = 0$).

Далее в анализе будут использоваться вертикальные разрезы, построенные по вышеописанной технологии.

Распределение газовых и аэрозольных примесей вдоль Арктического побережья Сибири

Зондирование вдоль Арктического побережья Сибири было выполнено 7–12 июля 2008 г. в рамках Международного проекта POLARCAT. На рис. 4 (цв. вклейка) приведены вертикальные разрезы: a – счетной концентрации аэрозоля N с размером частиц $d = 0,3 \div 20,0$ мкм, b – оксида (CO) и c – диоксида углерода (CO_2), z – озона (O_3). Разрез от Салехарда до Хатанги построен по данным, полученным 7 июля 2008 г. Зондирование на участке от Хатанги до Чоккурдах проводилось 8 июля 2008 г. Подошедшие фронтальные разделы сдвинули измерения на маршруте Чоккурдах–Певек на 10 июля 2008 г.

Из рис. 4 видно, что общая концентрация аэрозоля в указанном диапазоне размеров достигала нескольких частиц в 1 см^{-3} только над западными районами рассматриваемой территории. Это очевидно отражает перенос в регион с европейской территории России (ЕТР). По мере удаления от ЕТР концентрация частиц уменьшается до $0,1\text{ см}^{-3}$. Также видно, что перенос осуществляется в основном в средней тропосфере. В результате над восточными районами счетная концентрация в пограничном слое становится на порядок ниже, чем в средней тропосфере. Эти данные хорошо согласуются с полученными ранее, еще в 80-х гг. XX в. [19], а также с особенностями переноса примесей на территорию Сибири [12, 20].

Концентрация оксида углерода в атмосфере, как и многих других газов, определяется процессами их поступления, трансформации в воздухе и стока по различным механизмам. Все источники поступления CO в атмосферу можно разделить на две большие группы: природные и антропогенные [21, 22]. К природным относятся: эмиссия почвой, растительностью, водной поверхностью океана и ряд менее значимых. Основные антропогенные – это сжигание топлива всех видов, выжигание растительности и т.п. [22].

По данным Международной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) общее поступление CO в атмосферу в настоящее время оценивается в 2800 Тг в год [23]. Из них 1550 Тг выбрасываются непосредственно в атмосферу, 800 Тг образуются при окислении метана и 270 Тг – при окислении других углеводородов. Из рис. 4 следует, что на анализируемой территории не имеется сколько-нибудь заметных источников оксида углерода.

Концентрация CO в приземном и пограничном слоях в 1,5–1,2 раза ниже, чем в средней тропосфе-

ре. Поскольку в этих районах нет сколько-нибудь значимых промышленных объектов [24], кроме ГМК «Норильский никель», а природные источники имеют малую мощность, то концентрация оксида углерода над Арктическим побережьем Сибири приближается к минимальным глобальным значениям $70\text{--}80\text{ мкг/м}^3$ [25–27].

Концентрация CO_2 в атмосфере, помимо многолетнего тренда, подвержена сезонным циклам. На его глобальное содержание накладываются короткие временные флуктуации, отражающие присутствие региональных источников и стоков [28–31]. Анализ пространственного распределения позволяет выявить эту составляющую и оценить вклад отдельных территорий в углеродный цикл. Данные, представленные на рис. 4, показывают, что для северных районов источники и стоки диоксида углерода сбалансированы или уравновешены. На всем рассматриваемом участке от Салехарда до Певека концентрация CO_2 от приземного слоя вплоть до средней тропосферы практически не изменяется и лежит в пределах $386\text{--}388\text{ млн}^{-1}$. Это значительно отличается от данных измерений в других районах Сибирского региона [8–12, 32–37]. При этом следует подчеркнуть, что измерения выполнялись в летнее время, когда биота очень сильно усваивает углекислый газ [36, 38, 39], в районах, где отсутствует промышленная деятельность.

Основными источниками озона в тропосфере являются его перенос из стратосферы и фотохимическая генерация из газов-предшественников [40, 41]. Стоками O_3 , как показано в [42], являются сухое осаждение на подстилающую поверхность и взаимодействие с газовыми и аэрозольными примесями воздуха. Заметным может быть сток озона и на облачных частицах [43, 44]. Рис. 4 показывает, что над Арктическим побережьем Сибири преобладающим является поступление озона из стратосферы. Видно, что в пограничном слое, куда поступают газы-предшественники и развиваются основные процессы фотохимической генерации озона [45], его концентрация составляет $10\text{--}30\text{ млрд}^{-1}$, в то время как в верхней тропосфере она может достигать величины 100 млрд^{-1} . Это говорит о том, что источник озона находится вверху, т.е. в стратосфере. Такое распределение озона неплохо согласуется с данными [13] и не совпадает с результатами мониторинга над южными районами Западной Сибири [45].

Распределение газовых и аэрозольных примесей над континентальной частью Сибири

Как распределяются примеси воздуха над континентальной частью Сибири, рассмотрим по данным проекта YAK-AEROSIB, полученным в 5-й летней кампании, которая проводилась по маршруту, приведенному на рис. 1, в период 21–29 июля 2008 г., т.е. через 2 нед после проекта POLARCAT. Можно предполагать, что за такой короткий период больших

изменений в природной среде не произошло, что позволит провести сравнение с распределением примесей над Арктической частью Сибири. Профиль маршрута полета приведен на рис. 5 (цв. вклейка), данные измерений на рис. 6 (цв. вклейка). Напомним, что в этом проекте выполняются два маршрута: северный и южный.

Сопоставление рис. 4 и 6 показывает, что в пространственном распределении примесей имеются заметные различия, которые обусловлены наличием источников или стоков газов и аэрозоля над удаленными от океана континентальными районами.

Так, в распределении аэрозоля над континентальными районами Сибири (рис. 6) счетная концентрация частиц почти на порядок выше, чем над арктическими (см. рис. 4). Заметными оказываются и различия по высоте. Видно, что над континентом имеется интенсивная генерация частиц в пограничном слое атмосферы, особенно вдоль южного маршрута.

Весьма кардинально отличаются и распределения оксида углерода. Над арктическими районами (см. рис. 4) концентрация этого газа минимальна в пограничном слое атмосферы, что свидетельствует о преимущественном стоке на подстилающую поверхность или окислении его поступающим озоном до диоксида. Над континентальными же районами его концентрация в пограничном слое резко возрастает и достигает над южным маршрутом 160 мкг/м^3 . Данный факт говорит о наличии вблизи поверхности источника этого газа.

Также заметно изменяется и распределение диоксида углерода над рассматриваемыми территориями. В летний период идет активное поглощение CO_2 растительностью [46]. Это хорошо видно по резкому уменьшению его концентрации в пограничном слое атмосферы (см. рис. 6), особенно на южной части северного маршрута, в то время как над Арктическим побережьем во всей толще тропосферы наблюдался нейтральный ход (см. рис. 4). Вертикальный градиент достигает значения $10 \text{ млн}^{-1}/\text{км}$. Это является подтверждением того, что лесные регионы Сибири являются стоком углекислого газа из атмосферы [31].

Наименьшие изменения в характере распределения обнаруживаются для озона. Если сопоставлять континентальные (см. рис. 6) и арктические (см. рис. 4) районы, то видно, что основным источником для них будет перенос озона из стратосферы.

Таким образом, проведенное сравнение выявляет заметные различия между арктическими и континентальными районами Сибири для ряда компонент воздуха.

Тенденции в пространственном распределении примесей

Разработанная технология построения вертикальных разрезов позволяет «вычитать» один разрез из другого и тем самым проводить сравнение, как изменяется распределение примесей над рассматриваемой территории со временем.

Наиболее логично сравнивать пространственные распределения примесей по ранним и самым поздним полетам, чтобы получить большие различия. При этом следует придерживаться стратегии сравнения одинаковых сезонов проведения УАК-компаний, так как у большинства примесей имеется ярко выраженный годовой ход.

На рис. 7 (цв. вклейка) приведена разность концентраций углекислого газа, измеренных в кампаниях УАК-1 (апрель 2006) и УАК-6 (апрель 2010). Этот выбор обусловлен тем, что у CO_2 намечился более быстрый рост концентрации в пограничном слое по сравнению с глобальным трендом начиная с 2005 г. [34].

Из рис. 7 видно, что в пограничном слое почти по всей территории Сибири наблюдается прирост концентрации CO_2 , превышающий изменение содержания углекислого газа в верхней тропосфере. Особенно это сильно проявляется над юго-западными районами Сибири, где скорость роста достигает $3,5 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$. Если рассматривать верхнюю тропосферу как отражение глобального фона, а пограничный слой как отражение соотношения местных источников и стоков, то можно прийти к выводу, что на территории Сибири либо мощность источников увеличилась, либо уменьшилась интенсивность стоков.

В 2012 г. на территории Сибири в летнее время наблюдались интенсивные лесные пожары. Какой вклад они вносят в изменение концентрации оксида углерода, можно видеть из рис. 8 (цв. вклейка), где приведена разность концентраций этого газа, измеренных в кампаниях УАК-2 (сентябрь 2006) и УАК-7 (июль–август 2012 г.).

Видно, что вблизи очагов пожаров, при пересечении шлейфов, концентрация оксида углерода может превышать фоновые значения на 1400 млрд^{-1} . Причем по мере удаления от источника концентрация CO уменьшается незначительно. Так, при пересечении дымового шлейфа на высоте 3–4 км концентрация достигает $1000\text{--}1200 \text{ млрд}^{-1}$.

Заключение

Разработана и опробована в течение ряда лет новая технология самолетного зондирования атмосферы, позволяющая вместе с современным программным обеспечением исследовать крупномасштабные особенности пространственного распределения состава воздуха.

Ее реализация для арктических и континентальных районов Сибири показала существенные региональные различия в пространственном распределении счетной концентрации аэрозоля, озона, оксида и диоксида углерода, качественно оценить действие источников и стоков примесей воздуха над указанными районами.

Использование технологии для разных отрезков времени позволяет определять тенденции изменения пространственного распределения газовых и аэрозольных примесей над исследуемым регионом.

Исследования проведены в рамках Международной Ассоциированной Лаборатории «МАЛ ЯК-

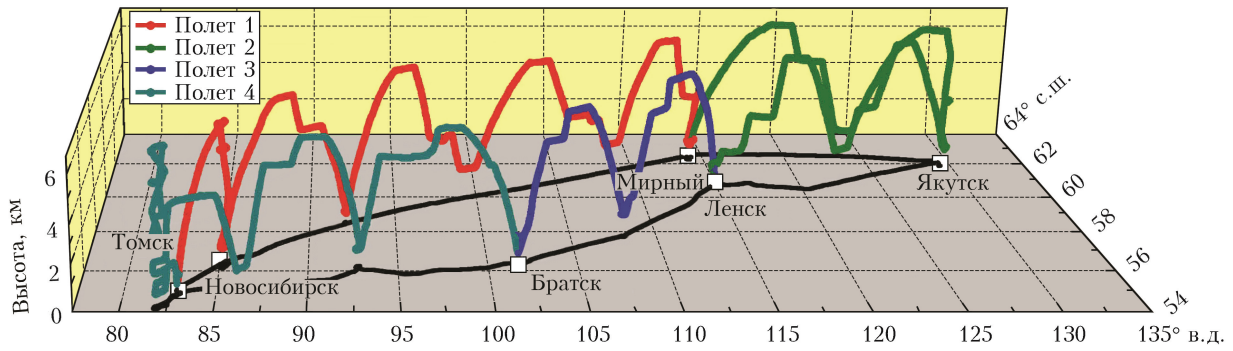


Рис. 5. Схема полетов СМЛ Ан-30 «Оптик-Э» в ходе измерительной кампании YAK-5: 21–29.07.2008 г.

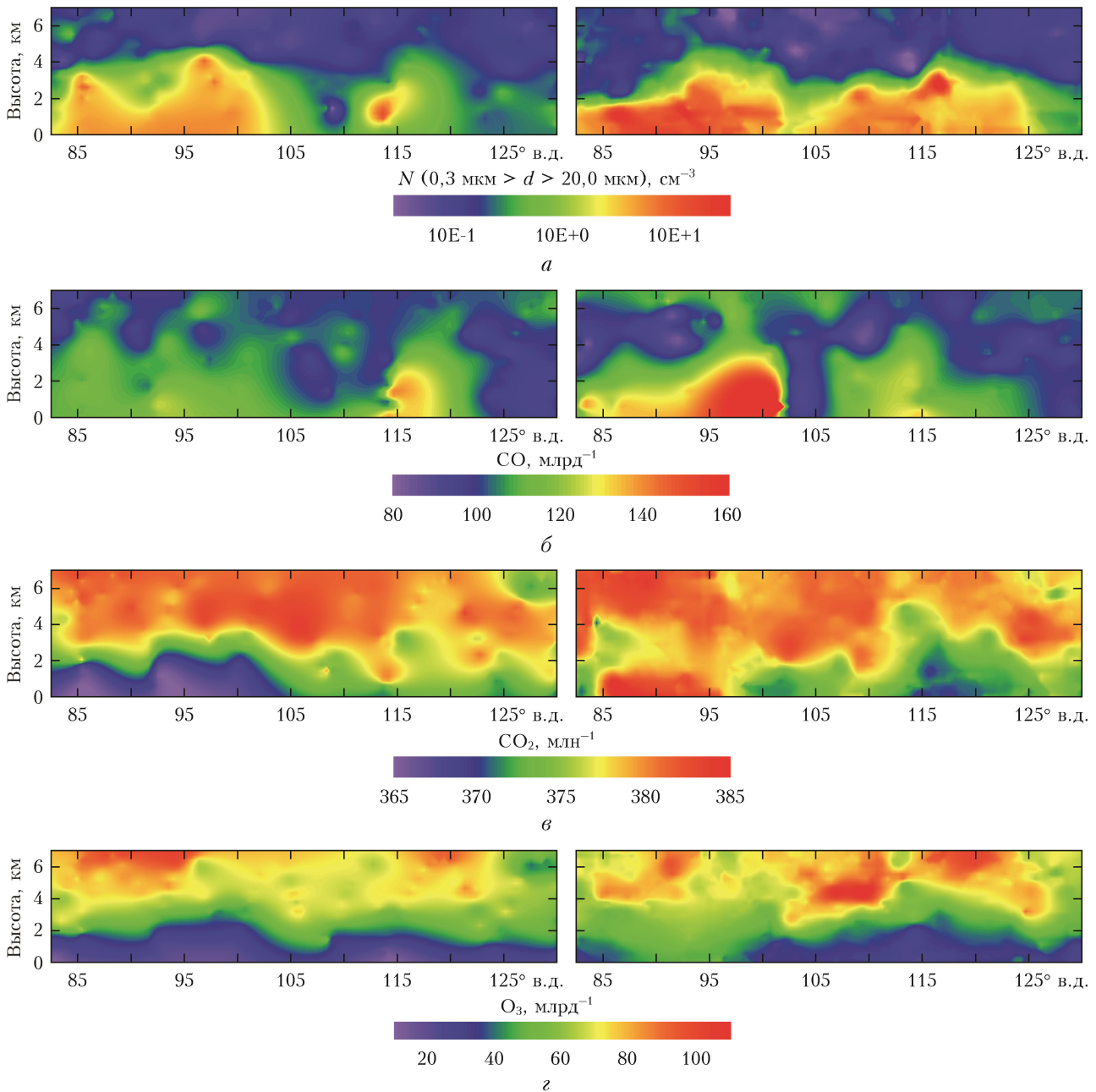


Рис. 6. Вертикальные разрезы атмосферы по маршруту Новосибирск–Мирный–Якутск–Ленск–Братск–Новосибирск в ходе измерительной кампании YAK-5: 21–29.07.2008 г.

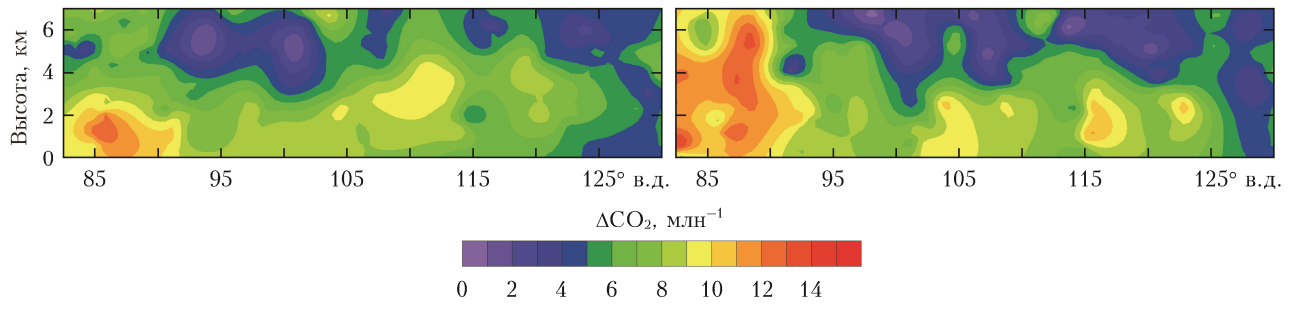


Рис. 7. Разностный вертикальный разрез распределения концентрации углекислого газа по маршрутам Новосибирск–Мирный–Якутск и Якутск–Братск–Новосибирск

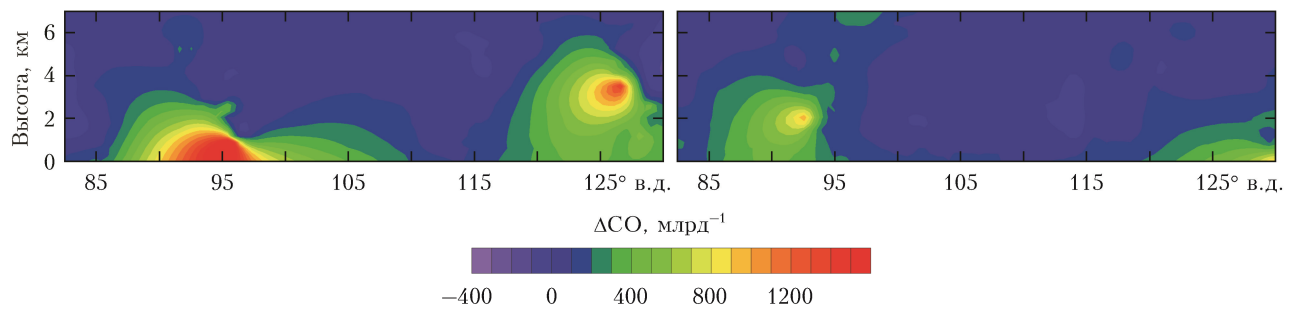


Рис. 8. Разностный вертикальный разрез распределения концентрации оксида углерода по маршрутам Новосибирск–Мирный–Якутск и Якутск–Братск–Новосибирск

АЭРОСИБ» при поддержке Национального центра научных исследований Франции.

Работа поддержана программами Президиума РАН № 4 и ОНЗ РАН № 5, междисциплинарными интеграционными проектами СО РАН № 35, 70 и 131, грантами РФФИ № 11-05-00470, 11-05-00516, 11-05-93116 и 11-05-93118, госконтрактами Минобрнауки № 14.515.11.0030 и 8325.

1. Доклад, принятый Рабочей группой I Межправительственной группы экспертов по изменению климата, но не утвержденный в деталях. ВМО. 2013 / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Bernsten, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood, D. Wratt. 2007: Technical Summary // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.). United Kingdom, Cambridge: Cambridge University Press and USA, New York, NY (С. Соломон, Д. Чин, М. Мэннинг, Р.Б. Элли, Т. Бернтсен, Н.Л. БиндOFF, Чен Женлин, А. Чидтайсон, Дж.М. Грегори, Г.С. Хегерл, М. Хейманн, В. Хьюитсон, Б.Дж. Хоскинс, Ф. Джоос, Ж. Жузель, Б. Катцов, У. Ломан, Т. Мацуно, М. Моллина, Н. Николс, Дж. Оверпек, Г. Рага, В. Рамасвами, Дж. Рен, М. Рустикуччи, Р. Сомервилл, Т.Ф. Стоккер, П. Уэтон, Р.А. Вуд, Д. Рэйт, 2007: «Техническое резюме», в докладе «Изменение климата, 2007 г.: физическая научная основа. Материал Рабочей группы I к Четвертому докладу Межправительственной группы экспертов по изменению климата об оценках» / С. Соломон, Д. Чин, М. Мэннинг, Чен Женлин, М. Маркис, К.Б. Аверит, М. Тигнор, Х.Л. Миллер (ред.)).
2. Аршинов М.Ю., Афониин С.В., Белан Б.Д., Белов В.В., Гриднев Ю.В., Давыдов Д.К., Machida T., Nédélec Ph., Paris J.-D., Фофанов А.В. Сравнение спутниковых и самолетных измерений газового состава в тропосфере над Югом Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 9. С. 773–782.
3. Кухарский А.В., Успенский А.Б. Мониторинг содержания диоксида углерода в тропосфере над бореальными экосистемами Сибири // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 4. С. 204–211.
4. Klonecki A., Pommier M., Clerbaux C., Ancellet G., Cammas J.-P., Coheur P.-F., Cozic A., Diskin G.S., Hadji-Lazaro J., Hauglustaine D.A., Hurtmans D., Khattatov B., Lamarque J.-F., Law K.S., Nédélec P., Paris J.-D., Podolske J.R., Prunet P., Schlager H., Szopa S., Turquety S. Assimilation of IASI satellite CO fields into a global chemistry transport model for validation against aircraft measurements // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 10. P. 4493–4512.
5. Pommier M., Clerbaux C., Law K.S., Ancellet G., Bernath P., Coheur P.-F., Hadji-Lazaro J., Hurtmans D., Nédélec P., Paris J.-D., Ravetta F., Ryerson T.B., Schlager H., Weinheimer A.J. Analysis of IASI tropospheric O₃ data over the Arctic during POLARCAT campaigns in 2008 // Atmos. Chem. Phys. 2012. V. 12, N 16. P. 7371–7389.
6. de Laat T.J., Dijkstra R., Schrijver H., Nédélec P., Aben I. Validation of six years of SCIAMACHY carbon

monoxide observations using MOZAIC CO profile measurements // Atmos. Measur. Technol. 2012. V. 5, N 9. P. 2133–2142.

7. De Wachter E., Barret B., Le Flochmœn E., Pavellin E., Matricardi M., Clerbaux C., Hadji-Lazaro J., George M., Hurtmans D., Coheur P.-F., Nédélec P., Cammas J.P. Retrieval of MetOp-A/IASI CO profiles and validation with MOZAIC data // Atmos. Measur. Technol. 2012. V. 5, N 11. P. 2843–2857.
8. 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.
9. Paris J.-D., Stohl A., Nédélec Ph., Arshinov M.Yu., 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.
10. 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.
11. 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.
12. Paris J.-D., Ciais Ph., Nédélec Ph., Stohl A., Belan B.D., Arshinov M.Yu., Carouge C., Golytsyn 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.
13. Berchet A., Paris J.-D., Ancellet G., Law K.S., Stohl A., Nédélec P., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Ciais P. Tropospheric ozone over Siberia in spring 2010: remote influences and stratospheric intrusion // Tellus B. 2013. V. 65, 19688, URL: <http://dx.doi.org/10.3402/tellusb.v65i0.19688>
14. 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., Сакелин С.М., Тертугова С.А., Тумаков А.Г., Шаманаев В.С., Шербаатов А.И. Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» для экологических исследований // Оптика атмосф. и океана. 1992. Т. 5, № 10. С. 1012–1021.
15. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Симоненков Д.В., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В., Шаманаев В.С., Шмаргунов В.П. Самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э»: 20 лет исследования окружающей среды // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 10. С. 950–957.
16. Antokhin P.N., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Zhidovkin E.V., Ilev 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., Shamaev V.S., Shmargunov V.P. Optik-É AN-30 aircraft laboratory: 20 years of environmental research // Atmos. and Ocean. Technol. 2012. V. 29, N 11. P. 64–75.
17. Анохин Г.Г., Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Барсуков В.Е., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Козлов В.С., Морозов М.В., Панченко М.В., Пеннер И.Э., Пестунов Д.А., Сигов Г.П.,

- Симоненков Д.В., Синицын Д.С., Толмачев Г.Н., Филиппов 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.
18. *Deutsch C.V., Journal A.G.* GSLIB – Geostatistical Software Library and User's Guide. N.Y.: Oxford University Press, 1992. 338 p.
 19. Белан Б.Д., Зуев В.Е., Панченко М.В. Основные результаты самолётного зондирования аэрозоля в ИОА СО РАН (1981–1991 гг.) // Оптика атмосф. и океана. 1995. Т. 8, № 1–2. С. 131–156.
 20. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Рассказчикова Т.М., Фофанов А.В. Блокирующая роль Уральских гор в трансграничном переносе примесей из Европы в Азию // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 11. С. 937–941.
 21. *Cicerone R.J.* How has the atmospheric concentration of CO changed? // In the Changing Atmosphere. John Wiley and Sons Ltd., 1988. P. 49–61.
 22. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 5. Газы – предшественники озона // Оптика атмосф. и океана. 2009. Т. 22, № 3. С. 230–268.
 23. *The Global Tropospheric Carbon Monoxide Observations System, Quality Assurance and Applications.* WMO GAW. 2006. N 166. 36 p.
 24. Артюхов В.В., Мартынов А.С. Системная методология оценки устойчивости природно-антропогенных комплексов. М., 2013. 472 с. URL: <http://www.sci.aha.ru>
 25. *Delmas R.Y., Legrand M.* Trends recorded in Greenland in relation with northern hemisphere anthropogenic pollution // IGACTiv Newslett. 1998. N 14. P. 19–22.
 26. *Assonov S.S., Breninkmeijer C.A.M., Jöckel P., Mulvaney R., Bernard S., Chappellaz J.* Evidence for CO increase in the SH during the 20th century based on firn air samples from Berkner Island, Antarctica // Atmos. Chem. Phys. 2007. V. 7, N 2. P. 295–308.
 27. Кароль И.Л. Современное состояние проблемы малых примесей в атмосфере и оценка их влияния на изменение глобального климата // Изменения климата и их последствия. СПб.: Наука, 2002. С. 36–44.
 28. *Lagergren F., Lindroth A., Dellwik E., Ibrtom A., Lankreijer H., Launtainen S., Molder M., Kolari P., Pilegaard K., Vesalo T.* Biophysical controls on CO₂ fluxes of three Northern forests based on long-term eddy covariance data // Tellus B. 2008. V. 60, N 2. P. 143–152.
 29. *Selberg A., Enkeli D., Matakova M., Tenno T.* Manometric study of CO₂ and H₂S emission from aqueous solutions and wastewater // Atmos. Environ. 2007. V. 41, N 39. P. 8995–9001.
 30. *Kowalski A.S., Serrano-Ortiz P.* On the relationship between the eddy covariance, the turbulent flux, and surface exchange for a trace gas such as CO₂ // Boundary-Layer Meteorol. 2007. V. 124, N 2. P. 129–141.
 31. *Nilsson S., Shvidenko A., Jonas M., McCallum I., Thomson A., Balzter H.* Uncertainties of a Regional Terrestrial Biota Full Carbon Account: A Systems Analysis // Water Air Soil Pollut: Focus. 2007. V. 7, N 4–5. P. 425–441.
 32. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуё Г., Краснов О.А., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофанов А.В., Шимоляма 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.
 33. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуё 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.
 34. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Креков Г.М., Фофанов А.В., Бабченко С.В., Inoue G., Machida T., Maksutov Sh., Sasakawa M., Shimoyama K. Динамика вертикального распределения парниковых газов в атмосфере // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 12. С. 1051–1061.
 35. 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., Inoue G., Machida T., Максюттов Ш., Shimoyama K., 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.
 36. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 2. Гидрологическое лето // Оптика атмосф. и океана. 2011. Т. 24, № 9. С. 737–742.
 37. Домышева В.М., Сакирко М.В., Пестунов Д.А., Панченко М.В. Сезонный ход процесса газообмена CO₂ в системе «атмосфера–вода» в литорали Южного Байкала. 3. Осень // Оптика атмосф. и океана. 2012. Т. 25, № 9. С. 826–832.
 38. Антохин П.Н., Аршинов М.Ю., Аршинова В.Г., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Рассказчикова Т.М., Фофанов А.В., Machida T. Особенности изменения концентрации CO₂ в разные сезоны года при прохождении атмосферных фронтов по территории Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 1. С. 24–31.
 39. Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Краснов О.А., Праслова О.В., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Суточная динамика вертикального распределения озона в пограничном слое атмосферы в районе Томска // Оптика атмосф. и океана. 2013. Т. 26, № 8. С. 663–672.
 40. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 3. Содержание озона в тропосфере. Механизмы и факторы, его определяющие // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 7. С. 600–618.
 41. Белан Б.Д., Складнева Т.К. Тропосферный озон. 4. Фотохимическое образование тропосферного озона: роль солнечной радиации // Оптика атмосф. и океана. 2008. Т. 21, № 10. С. 858–868.
 42. Белан Б.Д. Озон в тропосфере. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2010. 488 с.
 43. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Масштаб деструкции тропосферного озона в облаках // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 1. С. 43–46.
 44. Белан Б.Д. Тропосферный озон. 7. Стоки озона в тропосфере // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 2. С. 108–127.
 45. Белан Б.Д., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Вертикальное распределение озона в тропосфере над югом Западной Сибири // Оптика атмосф. и океана. 2010. Т. 23, № 9. С. 777–783.
 46. Ершов Ю.И. Органическое вещество биосферы и почвы. Новосибирск: Наука, 2004. 104 с.

P.N. Antokhin, V.G. Arshinova, M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, S.B. Belan, D.K. Davydov, G.A. Ivlev, A.V. Kozlov, Ph. Nédélec, J.-D. Paris, T.M. Rasskazchikova, D.E. Savkin, D.V. Simonenkov, T.K. Sklyadneva, G.N. Tolmachev, A.V. Fofonov. **Large-scale studies of gaseous and aerosol composition of air over Siberia.**

In the work, a new technology of aircraft sounding of the atmosphere is described. In combination with modern software, it allows investigation of large-scale features of spatial distribution of air composition. By means of this technology large-scale spatial distributions of aerosol, CO, CO₂, and O₃ over the Arctic coast and the continental areas of Siberia are investigated. Cardinal distinctions in distribution of aerosol, CO, and CO₂ over the continent and the coast are revealed. This is caused by distinction in the power of sources and sink of impurity in the areas considered.