

УДК 551.510.42

Особенности вертикального распределения углекислого газа над югом Западной Сибири в летний период

М.Ю. Аршинов¹, Б.Д. Белан¹, Д.К. Давыдов¹, О.А. Краснов¹,
Sh. Macsutov², T. Machida², M. Sasakawa², A.B. Фофонов^{1*}

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

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

Поступила в редакцию 29.12.2017 г.

По данным самолетного зондирования, выполненного над югом Западной Сибири, рассматривается многолетняя изменчивость концентрации углекислого газа на разных высотах в летний период. Данные мониторинга показывают, что на высоте 7,0 км летние значения концентрации углекислого газа над югом Западной Сибири росли с темпом 1,90 млн⁻¹/год. В пограничном слое увеличения содержания CO₂ в летний период с 1997 по 2004 г. почти не происходило (0,32 млн⁻¹/год). Начиная с 2005 по 2017 г. включительно темп прироста резко возрос и составил 2,55 млн⁻¹/год. Проведенный анализ возможных причин такого многолетнего хода показал, что он не связан с сокращением площади лесных массивов, лесными пожарами или болезнью деревьев. Также нельзя утверждать, что сток диоксида углерода был обусловлен воздействием климатических параметров на лесную растительность. Возможно, накопление углекислого газа в атмосфере к 2004 г. привело к тому, что сибирские леса уже не справляются с поглощением такого его количества.

Ключевые слова: атмосфера, вертикальное распределение, воздух, газ, летний период, углекислый газ; atmosphere, vertical distribution, air, gas, summer period, carbon dioxide.

Введение

Изменение климата и окружающей среды — одна из самых сложных проблем, с которой человечество столкнулось в конце прошлого столетия и с которой должно будет справиться в ближайшие десятилетия. Межправительственная группа экспертов по изменению климата пришла к заключению, что повышение глобальных температур происходит из-за увеличения концентрации парниковых газов в атмосфере, обусловленного дополнительной эмиссией, вызываемой антропогенной деятельностью, превышающей естественные циклы изменчивости содержания углекислого газа (CO₂), метана (CH₄) и закиси азота (N₂O) [1]. Нарушенные глобальные биогеохимические циклы этих парниковых газов — главная движущая сила текущего и будущего изменения климата. Эти изменения вызваны деятельностью человека. Основные источники изменения — сгорание ископаемого топлива и модификация глобальной растительности через изменение в землепользовании, в особенности вырубка лесов.

Уровень содержания парниковых газов в атмосфере определяется балансом их эмиссии и стока. С началом индустриальной эпохи этот баланс был нарушен и их концентрации начали резко расти, особенно во второй половине XX в. [2, 3]. Это приводит к увеличению теплосодержания атмосферы и, соответственно, к росту приземной температуры воздуха [4]. Несмотря на меры по уменьшению антропогенных выбросов, принимаемые мировым сообществом [5, 6], темпы роста концентрации CO₂ не снижаются.

Следует отметить, что на содержание парниковых газов в атмосфере оказывают воздействие не только антропогенные выбросы, но и сама биосфера [7, 8]. Причем вклад биосферы может быть как положительным, так и отрицательным [9, 10]. Это приводит к многолетним колебаниям концентрации парниковых газов в атмосфере [11]. Поэтому для более глубокого понимания движущих сил изменения климата требуется не только полное определение количества выбросов парниковых газов, но и контроль изменения их содержания в атмосфере.

Для достижения этой цели создаются международные сети прецизионных измерений парниковых газов. К настоящему времени введены в эксплуатацию следующие сети глобального атмосферного мониторинга: проект Глобальной службы атмосферы под эгидой Всемирной метеорологиче-

* Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Борис Денисович Белан (bbd@iao.ru); Денис Константинович Давыдов (denis@iao.ru); Олег Александрович Краснов (krasnov@iao.ru); Shamil Macsyutov (shamil@nies.go.jp); Toshinobu Machida (tmachida@nies.go.jp); Motoki Sasakawa (Sasakawa.motoki@nies.go.jp); Александр Владиславович Фофонов (alenfo@iao.ru).

ской организации (WMO Global Atmosphere Watch) и система наблюдений за парниковыми газами NOAA/ESRL, которые выполняют высокоточный мониторинг [12, 13]. На европейском континенте создается своя система высокоточного мониторинга – Международная интегрированная система наблюдений за углеродом (ICOS – Integrated Carbon Observation System) [14].

Развернуты широкомасштабные самолетные исследования пространственного распределения парниковых газов по проектам MOZAIC (ныне IAGOS), CARIBIC, CONTRAIL, YAK-AEROSIB [15–19]. Проводится самолетный мониторинг над отдельными регионами [20–29].

Несмотря на значимость проблемы глобального потепления, на территории России в начале 1990-х гг. отсутствовали станции мониторинга парниковых газов. Поэтому Институтом оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН совместно с Национальным институтом исследования окружающей среды (NIES) в 1997 г. был начат самолетный мониторинг парниковых газов на территории Сибири, а затем развернута сеть постов для непрерывных измерений в ее приземном слое атмосферы [20, 28, 30]. Также в рамках международного сотрудничества между российскими и немецкими научными институтами была создана обсерватория ZOTTO (Zotino Tall Tower Observatory) [31]. В 2011 г. в систему GAW/WDCGG была включена еще одна станция Росгидромета, расположенная в пос. Тикси [32].

Все данные перечисленных выше сетей и станций свидетельствуют о том, что концентрация парниковых газов повышается как в глобальном, так и в региональном масштабах. Согласно результатам многолетнего самолетного зондирования это отражается также и на их высотном распределении.

В настоящей статье рассматриваются особенности изменения концентрации углекислого газа над территорией Западной Сибири в теплый (вегетационный) период по данным, полученным с помощью российско-японской системы мониторинга JR-STATION.

Результаты самолетного и наземного мониторинга

Для измерений использовался самолет-лаборатория Ан-30 «Оптик-Э» [33, 34], а затем Ту-134 «Оптик» [35]. В ходе полетов воздух отбирался в стеклянные колбы на высотах 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,5 и 7,0 км. Для наполнения колб заборным воздухом был установлен безмасляный диафрагменный насос GAST DOA-P108, который обеспечивал давление в них 2 атм. Воздух из колб анализировался в лаборатории Национального института исследования окружающей среды с помощью газохроматографического метода. Диапазоны измерений и погрешности определения концентрации CO_2 составляли 340–450 млн^{-1} , $\pm 0,03 \text{ млн}^{-1}$.

Отбор проб воздуха осуществляется ежемесячно (в третьей декаде месяца) в послеполюденное время в условиях безоблачной или малооблачной погоды начиная с июля 1997 г. по настоящее время. Место проведения зондирования постоянно и находится юго-западнее Новосибирска, для исключения влияния города. Полеты проводятся над массивом Караканского бора, который расположен вдоль правого берега Новосибирского водохранилища [25].

На сегодня накоплен более чем 20-летний ряд непрерывных наблюдений. Даже с имеющимися неудачными полетами он превышает 200 вертикальных профилей распределения CO_2 , CH_4 и N_2O .

На рис. 1 приведены данные о многолетних изменениях концентрации углекислого газа над указанным районом на трех высотах – 0,5; 3,0 и 7,0 км. Эти высоты были выбраны исходя из предположения, что уровень 0,5 км отражает действие местных источников, концентрация на высоте 3,0 км определяется взаимодействием региональных факторов, уровень 7,0 км соответствует глобальному фону.

Из рис. 1 видно, что концентрация CO_2 в период с 1997 по 2015 г. на всех высотах возрастает. Однако имеется особенность в ее росте на высоте 0,5 км в летний период. С 1997 по 2004 г. значения летних минимумов на этом уровне изменялись несущественно. С 2005 г. начался их рост, даже более интенсивный, чем на высотах 3,0 и 7,0 км.

Для анализа того, в каком слое произошла перестройка распределения концентрации в многолетнем ходе, обратимся к рис. 2, на котором приведены вертикальные профили концентрации CO_2 во время летних минимумов до и после 2004 г.

Из рис. 2 следует, что в летний период наибольшие различия в вертикальном распределении концентрации в основном наблюдаются в пограничном слое атмосферы 1,5–2,5 км. Видно, что в период с 1997 по 2004 г. концентрация углекислого газа в свободной атмосфере ($>2,0$ км) выросла в среднем на 15 млн^{-1} . В то время как на высоте 0,5 км она практически не изменилась. С 2005 г. она начала быстро возрастать и разница между значениями, наблюдаемыми в нижней и верхней тропосфере, начала уменьшаться.

Для дальнейшего анализа весь массив значений летнего минимума за 1997–2016 гг. был разбит на два: 1997–2004 гг. и 2004–2016 гг. Для сопоставления показан также весь массив данных для уровня 7,0 км (рис. 3). Здесь же приведены линейные тренды (пунктирные линии) для каждого из массивов.

Данные аппроксимации показывают, что на высоте 7,0 км летние значения концентрации углекислого газа над югом Западной Сибири росли с темпом 1,90 $\text{млн}^{-1}/\text{год}$. В пограничном слое увеличения содержания CO_2 в летний период с 1997 по 2004 г. почти не происходило (0,32 $\text{млн}^{-1}/\text{год}$). Начиная с 2005 г. темп прироста резко возрос и составил 2,55 $\text{млн}^{-1}/\text{год}$.

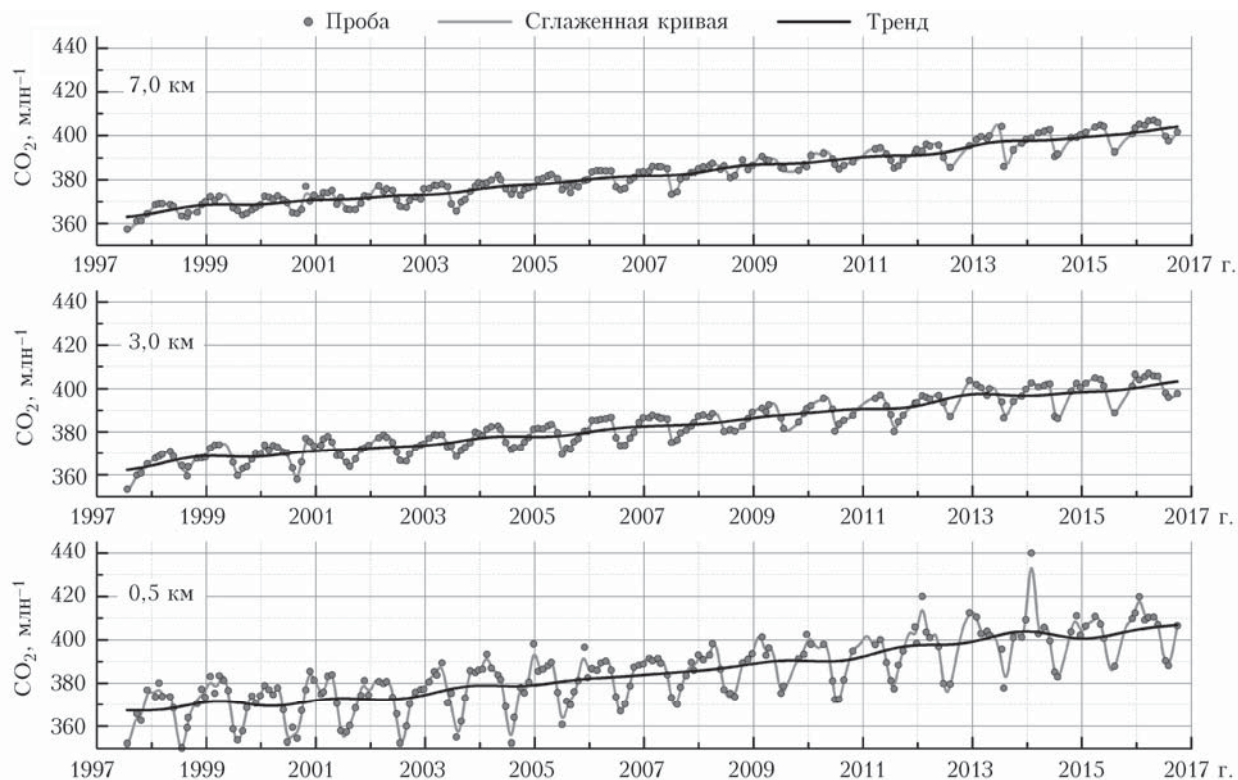


Рис. 1. Концентрация углекислого газа на высотах 0,5; 3,0 и 7,0 км над юго-западной частью Западной Сибири

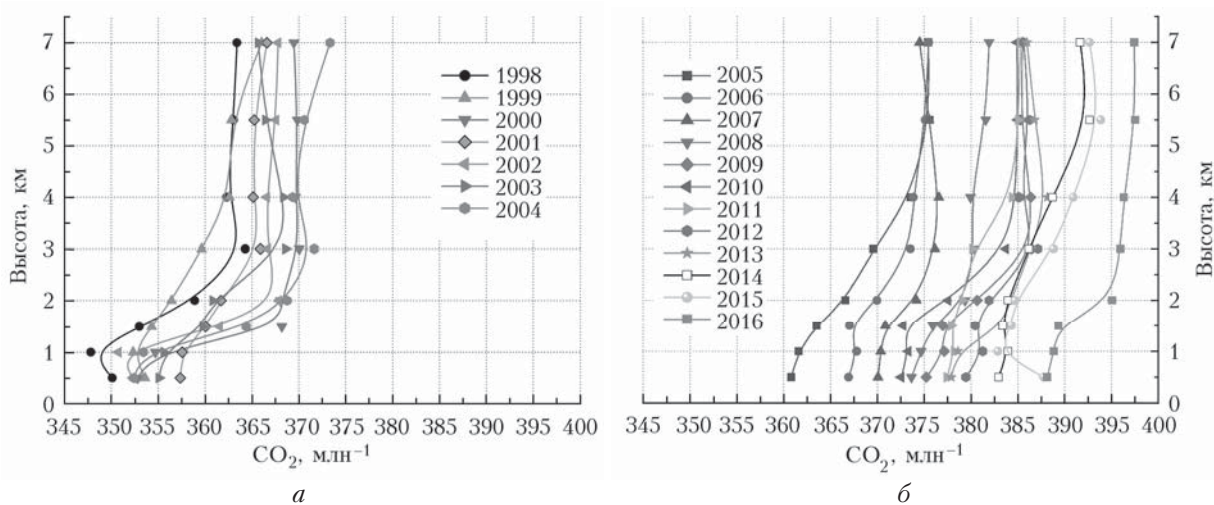


Рис. 2. Вертикальное распределение концентрации углекислого газа над югом Западной Сибири во время летних минимумов

На рис. 4 показано, как уменьшались градиенты концентрации углекислого газа между пограничным слоем и свободной атмосферой над этим районом в летний период. Видно, что, несмотря на многолетние колебания, наблюдается однозначная тенденция уменьшения разницы концентраций CO_2 со временем. Наибольшей она была в 2004 г., наименьшей — в 2007 и 2015 гг.

Измерения получены над одним и тем же районом Западной Сибири. Возникает вопрос: имеются ли подобные изменения концентрации углекислого газа над другими регионами земного шара?

По данным работ [22, 23, 25, 26], особенностей изменения содержания CO_2 в летний период в районах исследования не зафиксировано. При этом в [22] период измерений охватывал 1992–2012 гг., в [23] — 1998–2008 гг., в [25] — 2003–2013 гг., в [26] — 2000–2010 гг., т.е. периоды наблюдений пересекались с нашим циклом самолетного зондирования.

Анализ результатов многолетнего самолетного зондирования, приведенных в [24, 29], хотя авторы и не заостряют на этом внимание, показывает, что имеются регионы с выделенной нами особенностью

изменения концентрации углекислого газа в пограничном слое атмосферы в летний период. Так, летом в Белостоке [24] в период с 2002 по 2007 г. почти постоянный ход изменения концентрации наблюдался в слое 300–2500. Затем в летний период 2008–2011 гг. заметен более интенсивный рост концентрации CO_2 . Обобщенные в [29] данные самолетного зондирования для Северной Америки также обнаруживают, что концентрация CO_2 в летний период с 2004 по 2009 г. почти не изменялась, а затем наметился резкий рост с 2010 по 2014 г. Следовательно, по крайней мере в двух районах, имеются особенности многолетнего изменения концентрации CO_2 в летний период.

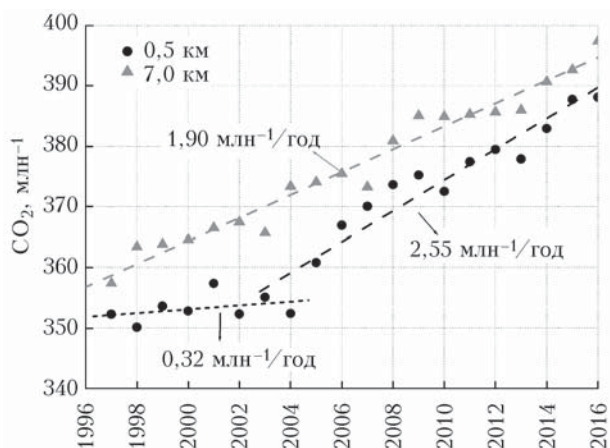


Рис. 3. Многолетний ход летних минимумов концентрации углекислого газа над юго-западной частью Западной Сибири

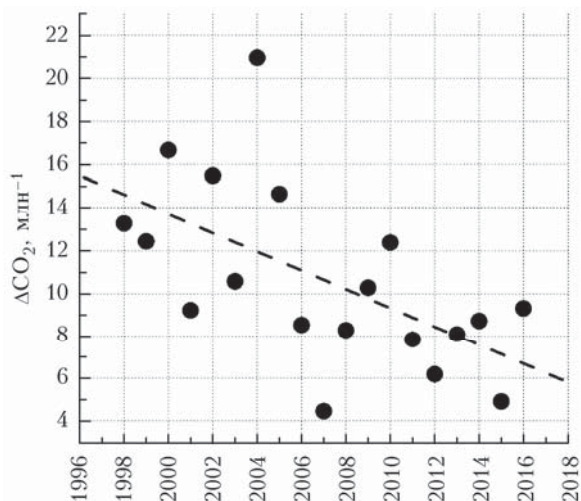


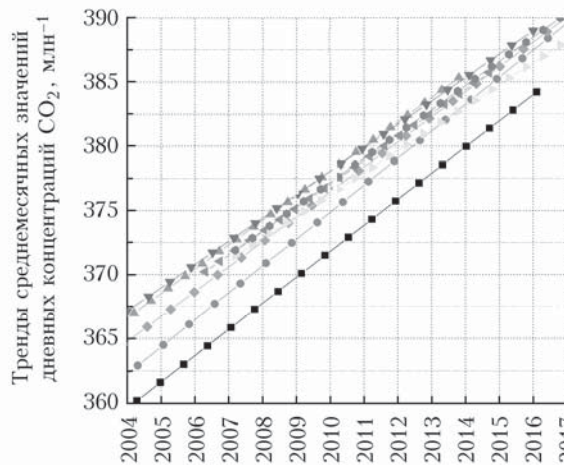
Рис. 4. Многолетний ход разницы концентраций между высотами 7,0 и 0,5 км над юго-западной частью Западной Сибири во время летних минимумов 1997–2016 гг.

Для оценки масштаба зафиксированного явления обратимся к данным наземного мониторинга углекислого газа, выполняющегося на территории Западной Сибири в рамках проекта JR-STATION [20, 28, 30]. Указанная сеть постов охватывает площадь около 2 млн км². На рис. 5 приведены

среднемесячные значения дневных (с 13:00 до 17:00 по местному времени) концентраций углекислого газа и их тренды, наблюдавшиеся в различные годы в июле на сети JR-STATION.



а



б

Рис. 5. Среднемесячные значения дневных концентраций (13:00–17:00 по местному времени) CO_2 в приземном слое воздуха на территории Западной Сибири в июле (а) и линейные тренды их изменения (б)

Дневные данные выбирались потому, что именно в это время суток интенсивность фотосинтеза находится в максимуме, а нижние слои тропосферы хорошо перемешаны. Кроме того, это позволяет избавиться от влияния ночного дыхания, которое может вносить дополнительную неопределенность при оценке и сопоставлении трендов содержания CO_2 над большой территорией, так как мощность дыхания сильно зависит от температуры, типа экосистемы и стратификации атмосферы, определяющей толщину слоя, а значит, и локальный объем, в котором накапливается выделяемый ночью углекислый газ.

Из рис. 5, а видно, что наиболее низкие летние концентрации CO_2 , особенно в первые годы, наблюдались на станциях, расположенных в зоне южной

и средней тайги (Березоречка, Карасево и Демьянское). Летние минимумы содержания CO_2 , наблюдаемые в степных зонах (Саввушка, Азово и Ваганово), варьируют между значениями, характерными для средней тайги, и значениями, полученными на более северных станциях (Игрим и Ноябрьск).

Более подробный анализ данных, представленных на рис. 5, а, позволил также выявить наметившуюся с 2007 г. общую тенденцию к уменьшению отмеченных выше различий. Это сказалось и на линейных трендах июльских дневных значений (рис. 5, б): $\geq 2,0 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ на станциях, расположенных в лесах южной и средней тайги; $1,7\text{--}1,9 \text{ млн}^{-1}/\text{год}$ – в степных районах и в зоне северной тайги.

Таким образом, согласно результатам анализа самолетных и приземных данных наблюдений, можно сделать вывод, что за последнее десятилетие произошли изменения в эффективности поглощения углекислого газа именно в лесных экосистемах зон южной и средней тайги Западной Сибири.

Обсуждение полученных результатов

Согласно [1] концентрация диоксида углерода в конкретном регионе определяется балансом естественных источников и стоков, адвекцией из соседних территорий и антропогенными выбросами. По данным [8], основными процессами, определяющими вывод CO_2 из атмосферы, являются поглощение океанами и ассимиляция растительностью. Поскольку район измерений расположен внутри континента и удален от океана на тысячи километров, то можно не анализировать роль этого фактора в изменении концентрации углекислого газа в пограничном и приземном слоях воздуха в силу его незначительности. В подтверждение приведем результаты сопоставления вертикального распределения этого газа для Арктики и континентального района [36].

При оценке баланса углерода для континентальных районов в основном учитываются вегета-

ционная активность экосистем и антропогенная деятельность [37–41]. В районе наших работ нет антропогенных источников диоксида углерода и подстилающая поверхность представляет собой бореальный лес.

Поток углерода между атмосферой и наземными экосистемами (положительным считается направление вниз, т.е. из атмосферы) определяется балансом между интенсивностью фотосинтеза Fp , дыханием растений Fv , поступлением из почвы или стоком на ее поверхность Fs и интенсивностью выделения при пожарах Ff [42]:

$$F = Fp - Fv \pm Fs - Ff.$$

В [43] показано, что на значительной части территории Западной Сибири Fs в летнее время имеет положительное значение, т.е. наблюдается сток CO_2 на подстилающую поверхность. Поэтому анализ причин роста концентрации CO_2 проведем на основе возможного изменения ассимилирующих способностей лесных массивов. При этом основное внимание будем обращать на ключевые даты – 2004 и 2005 гг., на стыке которых начался интенсивный рост концентрации в летний период.

Отсутствие антропогенных выбросов в месте измерений не является гарантией того, что они не наблюдались в другом месте и могли поступать в ходе адвективного переноса. Данные, обобщенные в [44, 45], говорят о том, что заметного изменения количества выбросов на территории России в 2004–2015 гг. не происходило. В качестве подтверждения приведем данные из [46] об антропогенных выбросах на территории РФ.

Из рис. 6 следует, что за рассматриваемый период (1997–2011 гг.) значительных изменений в выбросах парниковых газов на территории России не произошло. Таким образом, антропогенную компоненту промышленных выбросов как возможную причину зафиксированного роста CO_2 можно отвергнуть.

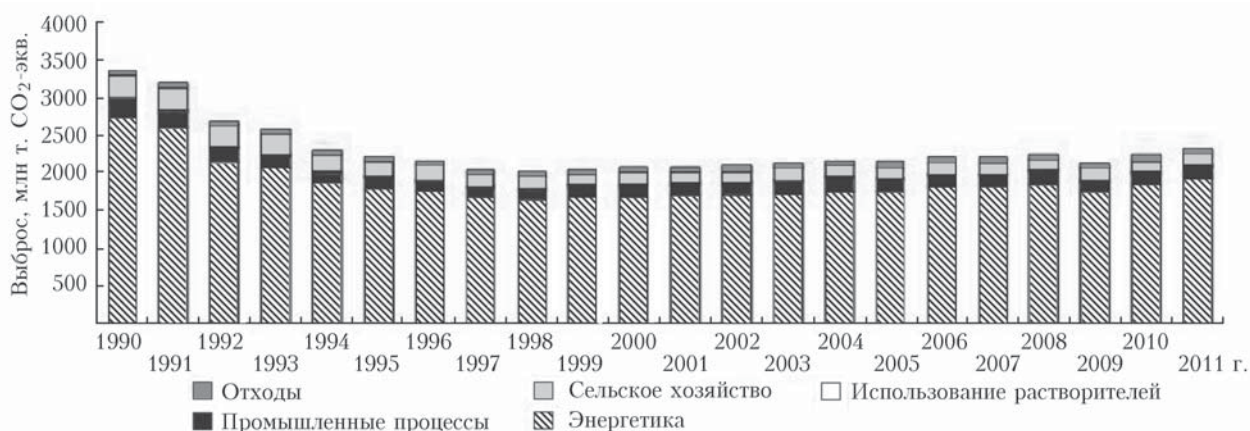


Рис. 6. Антропогенный выброс парниковых газов в РФ без учета сектора «Землепользование, изменения в землепользовании и лесное хозяйство»

В работах [47–49] обсуждается возможность воздействия экстремальных явлений на изменение концентрации диоксида углерода в атмосфере. Из перечисленных в [47] явлений на рассматриваемой территории наблюдаются в основном лесные пожары. По данным официального портала [50], построен график (рис. 7) площади лесных пожаров на территории России и Сибирского федерального округа (СФО).

Из рис. 7 видно, что в 2003 и 2012 гг. на территории региона наблюдались обширные лесные пожары. При этом рост концентрации CO_2 хорошо отразился только в 2012 г. (см. рис. 5) и оказался малозаметным в вышележащих слоях (см. рис. 3). Вряд ли это явление могло значительно повлиять на многолетний ход, анализируемый в данной работе.

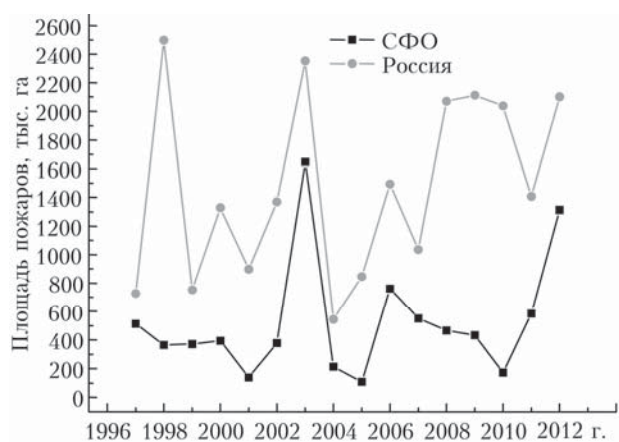


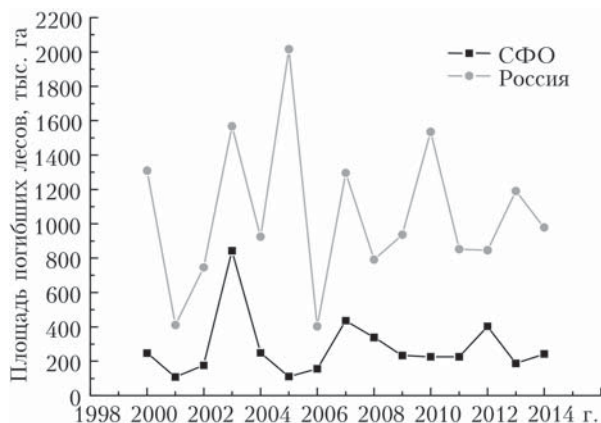
Рис. 7. Площадь лесных пожаров на территории России и СФО

Одними из факторов, которые могут привести к увеличению концентрации CO_2 в регионе, являются изменение характера землепользования или вырубка и восстановление лесов [51–56]. На рис. 8, построенном по данным портала [50], приведены сведения о гибели лесов и их восстановлении на территории России и СФО.

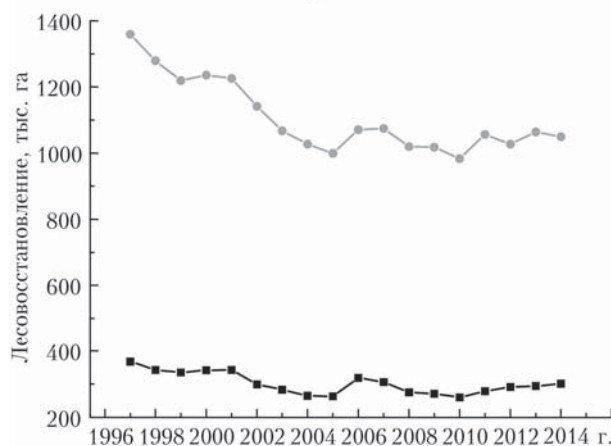
Из рис. 8, *а* видно, что на территории России наблюдаются периоды со значительной (> 1000 га) гибелью лесов, которые происходили в 2000, 2003, 2005, 2007, 2010 и 2013 гг. На территории СФО, в котором находится район измерений, всплесков гибели лесов значительно меньше: 2003, 2007 и 2012 гг. При этом значительные площади в России (> 1 млн га) и СФО (> 300 тыс. га) ежегодно планомерно восстанавливались естественным или искусственным путем (рис. 8, *б*).

Если мы обратимся к данным о разности площадей восстановленных и погибших лесов (рис. 9), то увидим, что в целом по России она имеет периодический характер, а в СФО, как правило, восстановление превышает гибель.

Приведенные данные хорошо согласуются с результатами работ [57–59], в которых показано, что площадь лесов России с 2000 по 2010 г. увеличилась на 19,8%. Это увеличение произошло в основном за счет роста в азиатской части России (18,9%).



а



б

Рис. 8. Площадь погибших (*а*) и восстановленных (*б*) лесов на территории России и СФО

Таким образом, изменение условий землепользования также не указывает на причину однозначного увеличения концентрации CO_2 начиная с 2005 г.

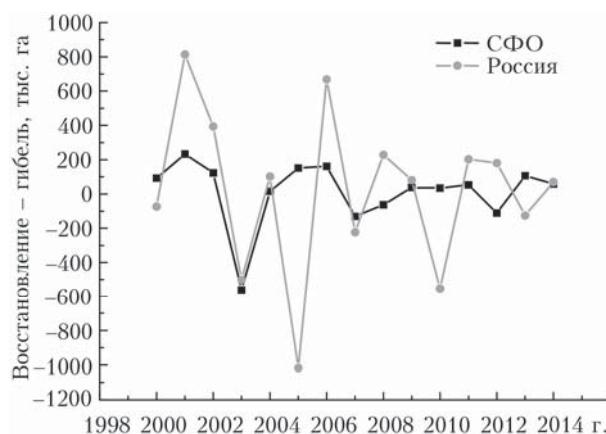


Рис. 9. Разность площадей восстановленных и погибших лесов на территории России и СФО

В цикле статей [60–65] уменьшение ассимиляции диоксида углерода деревьями связывается с их болезнями. Для оценки состояния растительности все чаще используются дистанционные спутниковые

методы, позволяющие делать оценки процессов для крупных площадей [66–69]. Воспользуемся данными спутника MODIS, чтобы оценить состояние леса в районе проведения работ (рис. 10).

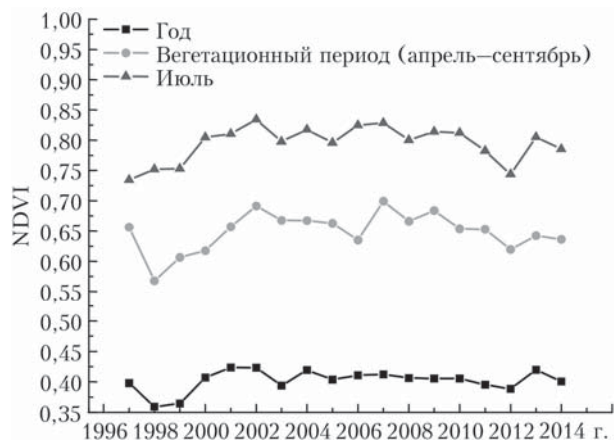


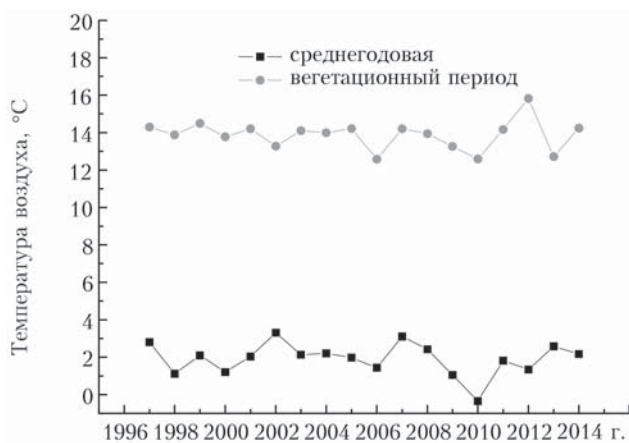
Рис. 10. Значение нормализованного дифференциального вегетационного индекса (NDVI) в районе проведения измерений: среднегодового (год), среднего за вегетационный период (апрель–август) и среднемесячного в июле

Данные рис. 10 показывают, что величина NDVI, характеризующая состояние растительности в районе работ, за период с 2004 по 2014 г. практически не изменялась как в среднем за год, так и за вегетационный период, включая июль – месяц с наименьшими концентрациями CO_2 и наибольшей вегетационной активностью. Следовательно, болезни лесов в рассматриваемом районе не проявлялись. Поэтому данный фактор не мог привести к росту содержания углекислого газа в летний период.

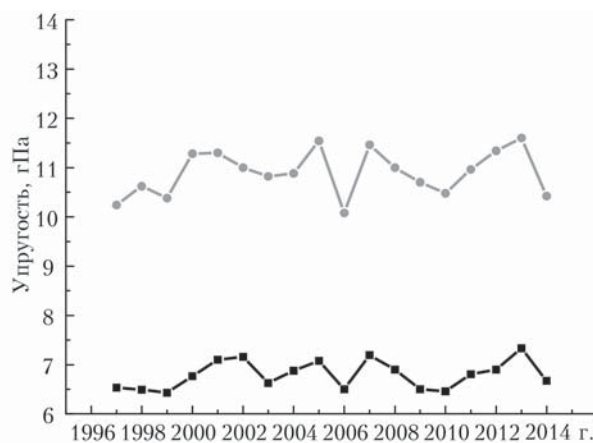
Одним из возможных факторов, который может оказать влияние на характер поглощения CO_2 растительностью, является изменение климатических параметров в месте произрастания леса [70–74]. К таким параметрам относятся температура и влажность воздуха [75–77], солнечная радиация [78, 79], засухи [80–82] и ряд других, менее значимых.

Для оценки влияния метеовеличин воспользуемся данными архива [83] по станции Огурцово как одной из наиболее близко расположенных к району полетов (рис. 11).

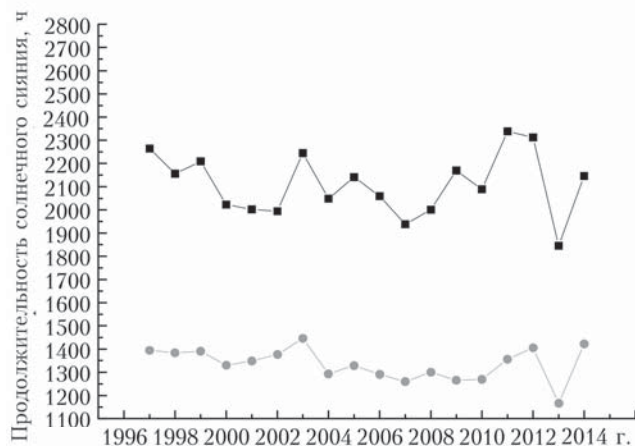
Из рис. 11 видно, что ни одна из климатически значимых величин не имеет в период с 2004 по 2014 г. однонаправленного изменения, будь это



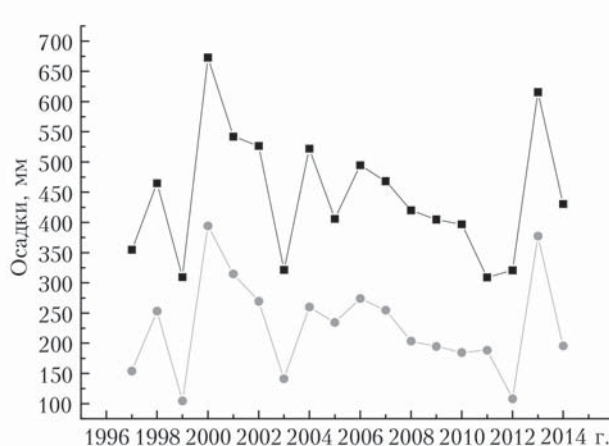
а



б



в



г

Рис. 11. Изменение среднегодовых и средних за вегетационный период метеовеличин в районе полетов: температура воздуха (а); упругость водяного пара (б); продолжительность солнечного сияния (в); осадки (г)

средние за вегетационный период или среднегодовые значения. На рис. 11, *г* можно выделить 2011 и 2012 гг. с аномально низкими осадками, что, по-видимому, и спровоцировало интенсивные лесные пожары летом 2012 г. Этот период сопровождался увеличением продолжительности солнечного сияния в районе проведения полетов. Уже в 2013 г. значения указанных величин вернулись к среднемуголетним.

Таким образом, ход метеорологических величин с 1997 по 2014 г. не позволяет однозначно связать изменение концентрации CO₂ с климатическим воздействием на основной поглотитель диоксида углерода – сибирские лесные массивы.

Заключение

В ходе многолетних самолетных зондирований обнаружена особенность изменения концентрации CO₂ на разных высотах в летний период. На высоте 7,0 км концентрация углекислого газа росла над югом Западной Сибири с темпом 1,90 млн⁻¹/год. В пограничном слое увеличения содержания в период с 1997 по 2004 г. почти не происходило (0,32 млн⁻¹/год). Начиная с 2005 г. темп прироста резко возрос и составил 2,55 млн⁻¹/год. При этом на территории Западной Сибири в целом происходит сток углекислого газа из атмосферы [84].

Проведенный анализ возможных причин такого многолетнего хода показал, что он не связан с сокращением площади лесных массивов, лесными пожарами или болезнью деревьев. Также нельзя утверждать, что сток CO₂ был обусловлен воздействием климатических параметров на лесную растительность.

Возможно, накопление углекислого газа в атмосфере к 2004 г. привело к тому, что сибирские леса перестали справляться с поглощением такого его количества. Уменьшение стока углерода из атмосферы зафиксировано и для района р. Амазонки [85]. Авторы связывают этот процесс с гибелью старых деревьев, что в нашем случае маловероятно. Скорее всего, в связи с заменой растительности на другой вид или на более молодые деревья они меньше поглощают CO₂ [86–91].

Ряд авторов указывают на важность учета влияния типа и состояния почвы на жизнедеятельность растительности [92–94]. В частности, авторы [95–98] обращают внимание на роль почвенных грибов в функционировании растительности. Согласно [99, 100] почвенные грибы не только оказывают влияние на состояние деревьев, но и воздействуют на их способность поглощать углекислый газ. Вместе с этим авторы [101] предостерегают от быстрых выводов, указывая, что процессы воздействия почв на растительность только начинают исследоваться. Необходимо учитывать и обратные связи.

Однако из-за трудной доступности и огромной протяженности территории проверить эти гипотезы не представляется реальным в ближайшее время.

Работа выполнена при поддержке госконтракта Минобрнауки № 14.613.21.0082 (идентификационный номер RFMEFI61317X0082) и Фонда глобаль-

ных исследований окружающей среды для Национальных институтов Министерства окружающей среды Японии.

1. URL: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/> (last access: 20.10.2017).
2. Ballantyne A.P., Alden C.B., Miller J.B., Tans P.P., White J.W.C. Increase in observed net carbon dioxide uptake by land and oceans during the past 50 years // *Nature*. 2012. V. 488, N 7409. P. 70–72.
3. Seneviratne S.I., Donat M.G., Pitman A.J., Knutti R., Wilby R.L. Allowable CO₂ emissions based on regional and impact-related climate targets // *Nature*. 2016. V. 529, N 7587. P. 477–483.
4. Feldman D.R., Collins W.D., Gero P.J., Torn M.S., Mlawer E.J., Shippert T.R. Observational determination of surface radiative forcing by CO₂ from 2000 to 2010 // *Nature*. 2015. V. 519, N 7543. P. 339–343.
5. Boucher O., Bellassen V., Benveniste H., Ciais P., Criqui P., Guivarch C., Treut H., Mathy S., Seferian R. In The wake of Paris Agreement, scientists must embrace new directions for climate change research // *PNAS*. 2016. V. 113, N 27. P. 7287–7290.
6. Hov O., Terblanche D., Carmichael G., Jones S., Ruti P.M., Tarasova O. Five priorities for weather and climate research // *Nature*. V. 552, N 7684. P. 168–170.
7. Tian H., Lu C., Ciais P., Michalak A.M., Canadell J.G., Saikawa E., Huntzinger D.N., Gurney K.R., Sitch S., Zhang B., Yang J., Bousquet P., Bruhwiler L., Chen G., Dlugokencky E., Friedlingstein P., Melillo J., Pan S., Poulter B., Prinn R., Saunio M., Schwalm C.R., Wofsy S.C. The terrestrial biosphere as a net source of greenhouse gases to the atmosphere // *Nature*. 2016. V. 531, N 7593. P. 225–228.
8. Ballantyne A.P., Andres R., Houghton R., Stocker B.D., Wanninkhof R., Anderegg W., Cooper L.A., DeGrandpre M., Tans P.P., Miller J.B., Alden C., White J.W.C. Audit of the global carbon budget: Estimate errors and their impact on uptake uncertainty // *Biogeosciences*. 2015. V. 12, N 8. P. 2565–2584.
9. Forkel M., Carvalhais N., Rödenbeck C., Keeling R., Heimann M., Thonicke K., Zaehle S., Reichstein M. Enhanced seasonal CO₂ exchange caused by amplified plant productivity in northern ecosystems // *Science*. 2016. V. 351, N 6274. P. 696–699.
10. Wenzel S., Cox P.M., Eyring V., Friedlingstein P. Projected land photosynthesis constrained by changes in the seasonal cycle of atmospheric CO₂ // *Nature*. 2016. V. 538, N 7626. P. 499–501.
11. Fu Z., Dong J., Zhou Y., Stoy P.C., Niu S. Long term trend and interannual variability of land carbon uptake—the attribution and processes // *Environ. Res. Lett.* 2017. V. 12, N 1. 10 p.
12. GAW Report No 206. Workshop Proceedings of the 6th WMO/IAEA Meeting on Carbon Dioxide, Other Greenhouse Gases, and Related Measurement Techniques (GGMT-2011), Wellington. New Zealand, 25–28 October 2011. 2012. 67 p.
13. Andrews A.E., Kofler J.D., Trudeau M.E., Williams J.C., Neff D.H., Masarie K.A., Chao D.Y., Kitzis D.R., Novelli P.C., Zhao C.L., Dlugokencky E.J., Lang P.M., Crotwell M.J., Fischer M.L., Parker M.J., Lee J.T., Baumann D.D., Desai A.R., Stanier C.O., De Wekker S.F.J., Wolfe D.E., Munger J.W., Tans P.P. CO₂, CO, and CH₄ measurements from tall towers in the NOAA Earth System Research Laboratory's Global Greenhouse Gas Reference Net-

- work: Instrumentation, uncertainty analysis, and recommendations for future high-accuracy greenhouse gas monitoring efforts // *Atmos. Meas. Tech.* 2014. V. 7, N 2. P. 647–687. DOI:10.5194/amt-7-647-2014.
14. URL: <http://www.icos-infrastructure.eu/node/15/> (last access: 20.10.2017).
 15. Marenco A., Thouret V., Nedelec P. Measurements of ozone and water vapor by Airbus in-service aircraft: The MOZAIC airborne program, an overview // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103, N D12. P. 25631–25642.
 16. Cammas J.-P., Volz-Thomas A. The MOZAIC Program (1994–2007) // *IGACTivities Newslett.* 2007. N 37. P. 10–17.
 17. Brenninkmeijer C.A.M., Crutzen P., Boumard F., Dauer T., Dix B., Ebinghaus R., Filippi D., Fischer H., Franke H., Frieß U., Heintzenberg J., Helleis F., Hermann M., Kock H.H., Koepfel C., Lelieveld J., Leuenberger M., Martinsson B.G., Miemczyk S., Moret H.P., Nguyen H.N., Nyfeler P., Oram D., O'Sullivan D., Penkett S., Platt U., Puppek M., Ramonet M., Randa B., Reichelt M., Rhee T.S., Rohwer J., Rosenfeld K., Scharffe D., Schlager H., Schumann U., Slemr F., Sprung D., Stock P., Thaler R., Valentini F., van Velthoven P., Waibel A., Wandl A., Waschtschek K., Wiedensohler A., Xueref-Remy I., Zahn A., Zech U., Ziereis H. Civil Aircraft for the regular investigation of the atmosphere based on an instrumented container: The new CARIBIC system // *Atmos. Chem. Phys.* 2007. V. 7, N 18. P. 4953–4976.
 18. Machida T., Matsueda H., Sawa Y. A new JAL project: CONTRAIL Comprehensive Observation Network for Trace gases by AirLiner // *IGACTivities Newslett.* 2007. N 37. P. 23–30.
 19. 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 cross Siberia and in the Northern Hemisphere // *Tellus B.* 2008. V. 60, N 4. P. 551–568.
 20. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Иноуё Г., Максюттов Ш., Мачида Т., Фофонов А.В. Вертикальное распределение парниковых газов над Западной Сибирью по данным многолетних измерений // *Оптика атмосф. и океана.* 2009. Т. 22, № 5. С. 457–464; Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Inouye G., Maksyutov T., Fofonov A.V. Vertical distribution of greenhouse gases Western Siberia by the long-term measurement data // *Atmos. Ocean. Opt.* 2009. V. 22, N 3. P. 316–324.
 21. Graven H.D., Keeling R.F., Piper S.C., Patra P.K., Stephens B.B., Wofsy S.C., Welp L.R., Sweeney C., Tans P.P., Kelley J.J., Daube B.C., Kort E.A., Santoni G.W., Bent J.D. Enhanced seasonal exchange of CO₂ by northern ecosystems since 1960 // *Science.* 2013. V. 341, N 6150. P. 1085–1089.
 22. Gavrilo N.M., Tans P., Guenther D., Sweeney C. Multiyear average characteristics of CO₂ variations in the free atmosphere over Colorado (40°N, 104°W) // *Atmos. Environ.* 2013. V. 72. P. 159–164.
 23. Van der Laan S., van der Laan-Luijkx I.T., Rodenbeck C., Varlagin A., Shironya I., Neubert R.E.M., Ramonet M., Meijer H.A.J. Atmospheric CO₂, d(O₂/N₂), APO and oxidative ratios from aircraft flask samples over Fyodorovskoye, Western Russia // *Atmos. Environ.* 2014. V. 97. P. 174–181.
 24. Chen H., Winderlich J., Gerbig C., Katrynski K., Jordan A., Heimann M. Validation of routine continuous airborne CO₂ observations near the Bialystok Tall Tower // *Atmos. Meas. Tech.* 2012. V. 5, N 4. P. 873–889.
 25. Biraud S.C., Torn M.S., Smith J.R., Sweeney C., Riley W.J., Tans P.P. A multi-year record of airborne CO₂ observations in the US Southern Great Plains // *Atmos. Meas. Tech.* 2013. V. 6, N 3. P. 751–763.
 26. Gatti L.V., Miller J.B., D'Amelio M.T.S., Martinewski I.A., Basso L.S., Gloor M.E., Wofsy S., Tans P. Vertical profiles of CO₂ above eastern Amazonia suggest a net carbon flux to the atmosphere and balanced biosphere between 2000 and 2009 // *Tellus B.* 2010. V. 62, N 5. P. 581–594.
 27. Shirai T., Machida T., Matsueda H., Sawa Y., Niwa Y., Maksyutov Sh., Higuchi K. Relative contribution of transport/surface flux to the seasonal vertical synoptic CO₂ variability in the troposphere over Narita // *Tellus B.* 2012. V. 64. P. 19138.
 28. 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, N 17. P. 9489–9498. DOI: 10.1002/jgrd.50755.
 29. Sweeney C., Karion A., Wolter S., Newberger T., Guenther D., Jack A., Higgs J.A., Andrews A.E., Lang P.M., Neff D., Dlugokencky E., Miller J.B., Montzka S.A., Miller B.R., Masarie K.A., Biraud S.C., Novelli P.C., Crotwell M., Crotwell A.M., Thoning K., Tans P.P. Seasonal climatology of CO₂ across North America from aircraft measurements in the NOAA/ESRL Global Greenhouse Gas Reference Network // *J. Geophys. Res.: Atmos.* 2015. V. 120, N 10. P. 5155–5190. DOI: 10.1002/2014JD022591.
 30. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Покровский Е.В., Толмачев Г.Н., Фофонов А.В. Посты для мониторинга парниковых и окисляющих атмосферу газов // *Оптика атмосф. и океана.* 2007. Т. 20, № 1. С. 53–61.
 31. URL: <http://zotoproject.org/> (last access: 20.10.2017).
 32. 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. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды М.: Росгидромет, 2013. 178 с.
 33. Зуев В.Е., Белан Б.Д., Кабанов Д.М., Ковалевский В.К., Лукьянов О.Ю., Мелешкин В.Е., Миклушев 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.
 34. 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., Shamanayev V.S., Shmarginov V.P. Optik-E AN-30 aircraft laboratory: 20 years of environmental research // *J. Atmos. Ocean. Technol.* 2012. V. 29, N 1. P. 64–75.
 35. 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., 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.
36. Антохина О.Ю., Антохин П.Н., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Белан С.Б., Давыдов Д.К., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Неделэк Ф., Париж Ж.-Д., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фофанов А.В. Вертикальное распределение газовых и аэрозольных примесей воздуха над Российским сектором Арктики // Оптика атмосф. и океана. 2017. Т. 30, № 12. С. 1043–1052; *Antokhina O.Yu., Antokhin P.N., Arshinova V.G., Arshinov M.Yu., Belan B.D., Belan S.B., Davydov D.K., Ivlev G.A., Kozlov A.V., Nédélec P., Paris J.-D., Rasskazchikova T.M., Savkin D.E., Simonenkov D.V., Sklyadnueva T.K., Tolmachev G.N., Fofonov A.V.* Vertical distributions of gaseous and aerosol admixtures in air over the Russian Arctic // *Atmos. Ocean. Opt.* 2018. V. 31, N 3. P. 300–310.
 37. 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. N 55B. P. 378–390.
 38. Beer Ch., Reichstein M., Tomelleri E., Ciais Ph., Jung M., Carvalhais N., Rüdiger Ch., Arain M.A., Baldocchi D., Bonan G.B., Bondeau A., Cescatti A., Lasslop G., Lindroth A., Lomas M., Luysaert S., Margolis H., Oleson K.W., Rouspard O., Veenendaal E., Viovy N., Williams Ch., Woodward F.I., Papale D. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate // *Science.* 2010. V. 329, N 5993. P. 834–838.
 39. Pan Y., Birdsey R.A., Fang J., Houghton R., Kauppi P.E., Kurz W.A., Phillips O.L., Shvidenko A., Lewis S.L., Canadell J.G., Ciais Ph., Rautiainen A., Sitch S., Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests // *Science.* 2011. V. 333, N 6045. P. 988–993.
 40. Ahlström A., Raupach M.R., Schurgers G., Smith B., Arneeth A., Jung M., Reichstein M., Canadell J.G., Friedlingstein P., Jain A.K., Kato E., Poulter B., Sitch S., Stocker B.D., Viovy N., Ying Ping Wang, Wiltshire A., Zaehle S., Ning Z. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink // *Science.* 2015. V. 348, N 6237. P. 895–899.
 41. Ahlström A., Jianyang Xia, Arneeth A., Yiqi Luo, Smith B. Importance of vegetation dynamics for future terrestrial carbon cycling // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10, N 5. DOI: 10.1088/1748-9326/10/5/054019.
 42. Елисеев А.В. Оценка изменений характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учетом неопределенности значений параметров наземной биоты // *Изв. РАН. Физ. атмосф. и океана.* 2011. Т. 47, № 2. С. 147–170.
 43. Глазюлев М.В., Ильясов Д.В., Терентьева И.Е., Сабреков А.Ф., Краснов О.А., Максюттов Ш.Ш. Эмиссия метана и диоксида углерода в заболоченных лесах южной и средней тайги Западной Сибири // *Оптика атмосф. и океана.* 2017. Т. 30, № 4. С. 301–309.
 44. Замолотчиков Д.Г., Грабовский В.И., Коровин Г.Н., Гитарский М.Л., Блинов В.Г., Дмитриев В.В., Куриц В.А. Бюджет углерода управляемых лесов Российской Федерации в 1990–2050 гг.: ретроспективная оценка и прогноз // *Метеорол. и гидрол.* 2013. № 10. С. 73–92.
 45. Романовский А.А., Коротков В.Н., Смирнов Н.С., Карabanь Р.Т., Трунов А.А. Оценка вклада землепользования в антропогенную эмиссию парниковых газов на территории России в течение 2000–2011 гг. // *Метеорол. и гидрол.* 2014. № 3. С. 5–18.
 46. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: ИГКЭ, 2014. 1008 с.
 47. Chuixiang Yi., Pendall E., Ciais Ph. Focus on extreme events and the carbon cycle // *Environ. Res. Lett.* 2015. V. 10. P. 070201. DOI: 10.1088/1748-9326/10/7/070201.
 48. Guo M., Li J., Xu J., Wang X., He H., Wu L. CO₂ emissions from the 2010 Russian wildfires using GOSAT data // *Environ. Pollut.* 2017. V. 226. P. 60–68.
 49. Andela N., Morton D.C., Giglio L., Chen Y., van der Werf G.R., Kasibhatla P.S., De Fries R.S., Collatz G.J., Hantson S., Kloster S., Bachelet D., Forrest M., Lasslop G., Li F., Manganon S., Melton J.R., Yue C., Randerson J.T. A human-driven decline in global burned area // *Science.* 2017. V. 356, N 6345. P. 1356–1362.
 50. URL: <http://www.fedstat.ru/indicators/start.do> (last access: 20.10.2017).
 51. Arneeth A. Uncertain future for vegetation cover // *Nature.* 2015. V. 524, N 7563. P. 44–45.
 52. Exbrayat J.-F., Williams M. Quantifying the net contribution of the historical Amazonian deforestation to climate change // *Geophys. Res. Lett.* 2015. V. 42, N 8. P. 2968–2976. DOI: 10.1002/2015GL063497.
 53. Alkama R., Cescatti A. Biophysical climate impacts of recent changes in global forest cover // *Nature.* 2016. V. 351, N 6273. P. 600–604.
 54. Naudts K., Chen Y., McGrath M.J., Ryder J., Valade A., Otto J., Luysaert S. Europe's forest management did not mitigate climate warming // *Science.* 2016. V. 351, N 6273. P. 597–600.
 55. Bastin J.-F., Berrahmouni N., Grainger A., Maniatis D., Mollicone D., Moore R., Patriarca C., Picard N., Sparrow B., Abraham E.M., Aloui K., Atesoglu A., Attore F., Bassillü C., Bey A., Garzuglia M., Garcia-Montero L.G., Grott N., Guerin G., Laestadius L., Lowe A.J., Mamane B., Marchi G., Patterson P., Rezende M., Ricci S., Salcedo I., Diaz A.S.-P., Stolle F., Surappaeva V., Castro R. The extent of forest in dry land biomes // *Science.* 2017. V. 356, N 6338. P. 635–638.
 56. Barlow J., Lennox G.D., Ferreira J., Berenguer E., Lees A.C., Nally R.M., Thomson J.R., de Barros Ferraz S.F., Louzada J., Oliveira V.H.F., Parry L., de Castro Solar R.R., Vieira I.C.G., Aragao L.E.O.C., Begotti R.A., Braga R.F., Cardoso T.M., de Oliveira R.C., Souza C.M., Moura N.G., Nunes S.S., Siqueira J.V., Pardini R., Silveira J.M., Vaz-de-Mello F.Z., Viega R.C.S., Venturieri A., Gardner T.A. Anthropogenic disturbance in tropical forests can double biodiversity loss from deforestation // *Nature.* 2016. V. 535, N 7610. P. 144–147.
 57. Schepaschenko D.G., Shvidenko A.Z., Lesiv M.Yu., Ontikov P.V., Shchepaschenko M.V., Kraxner F. Estimation of forest area and its dynamics in Russia based on synthesis of remote sensing products // *Contemp. Problem. Ecol.* 2015. V. 8, N 7. P. 811–817.
 58. Kryazhimskiy A., Rovenskaya E., Shvidenko A., Gusti M., Shchepaschenko D., Veshchinskaya V. Towards harmonizing competing models: Russian

- forests' net primary production case study // Technol. Forecast. Soc. Change. 2015. V. 98. P. 245–254.
59. Швиденко А.З., Щепашенко Д.Г. Углеродный бюджет лесов России // Сиб. лесн. журн. 2014. Т. 1. С. 69–92.
 60. Trumbore S., Brando P., Hartmann H. Forest health and global change // Science. 2015. V. 349, N 6250. P. 814–818.
 61. Gauthier S., Bernier P., Kuuluvainen T., Shvidenko A.Z., Schepaschenko D.G. Boreal forest health and global change // Science. 2015. V. 349, N 6250. P. 819–822.
 62. Lewis S.L., Edwards D.P., Galbraith D. Increasing human dominance of tropical forests // Science. 2015. V. 349, N 6250. P. 827–832.
 63. Wingfield M.J., Brockerhoff E.G., Wingfield B.D., Slippers B. Planted forest health: The need for a global strategy // Science. 2015. V. 349, N 6250. P. 832–836.
 64. Bokusheva R., Kogan F., Vitkovskaya I., Conradt S., Batyrbayeva M. Satellite-based vegetation health indices as a criteria for insuring against drought-related yield losses // Agric. For. Meteorol. 2016. V. 220. P. 200–207.
 65. Sun Y., Frankenberg C., Wood J.D., Schimel D.S., Jung M., Guanter L., Drewry D.T., Verma M., Porcar-Castell A., Griffis T.J., Gu L., Magney T.S., Köhler P., Evans B., Yuen K. OCO-2 advances photosynthesis observation from space via solar-induced chlorophyll fluorescence // Science. 2017. V. 358. N 5747. P. 1–4.
 66. Min Q., Wu L. Factors controlling CO₂ exchange in a middle latitude forest // J. Geophys. Res. 2011. V. 116. P. D21301. DOI: 10.1029/2010JD015428.
 67. Santoro M., Beaudoin A., Beer Ch, Cartus O., Fransson J.E.S., Hall R.J., Pathe C., Schmillius C., Schepaschenko D., Shvidenko A., Thurner M., Wegmüller U. Forest growing stock Vume of the northern hemisphere: Spatially explicit estimates for 2010 derived from Envisat ASAR // Remote Sens. Environ. 2015. V. 168. P. 316–334.
 68. Welp L.R., Patra P.K., Rödenbeck C., Nemani R., Bi J., Piper S.C., Keeling R.F. Increasing summer net CO₂ uptake in high northern ecosystems inferred from atmospheric inversions and comparisons to remote-sensing NDVI // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16, N 14. P. 9047–9066.
 69. Szogs S., Arneth A., Anthoni P., Doelman J.C., Humpenöder F., Popp A., Pugh T.A.M., Stehfest E. Impact of LULCC on the emission of BVOCs during the 21st century // Atmos. Environ. 2017. V. 165. P. 73–87.
 70. Popkin G. Weighing the world's trees // Nature. 2015. V. 523, N 7558. P. 20–22.
 71. Keenan T. Spring greening in a warming world // Nature. 2015. V. 526, N 7571. P. 48–49.
 72. Fu Y.H., Zhao H., Piao S., Peaucelle M., Peng S., Zhou G., Ciais Ph., Huang M., Menzel A., Penuelas J., Song Y., Vitasse Y., Zhenzhong Zeng Z., Janssens I.A. Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding // Nature. 2015. V. 526, N 7571. P. 104–107.
 73. Seddon A.W.R., Macias-Fauria M., Long P.R., Benz D., Willis K.J. Sensitivity of global terrestrial ecosystems to climate variability // Nature. 2016. V. 531, N 7593. P. 229–232.
 74. Корзухин М.Д. Расчетные оценки влияния изменения климата на продуктивность лесов (Обзор подходов) // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. 2015. Т. 26, № 2. С. 33–58.
 75. Mahecha M.D., Reichstein M., Carvalhais N., Lasslop G., Lange H., Seneviratne S.I., Vargas R., Ammann Ch., Arain A., Cescatti A., Janssens I.A., Migliavacca M., Montagnani L., Richardson A.D. Global convergence in the temperature sensitivity of respiration at ecosystem level // Science. 2010. V. 329, N 5993. P. 838–840.
 76. Jung M., Reichstein M., Schwalm C.R., Huntingford C., Sitch S., Ahlström A., Arneth A., Camps-Valls G., Ciais P., Friedlingstein P., Gans F., Ichii K., Jain A.K., Kato E., Papale D., Poulter B., Raduly B., Rödenbeck C., Tramontana G., Viivy N., Wang Y.-P., Weber U., Zaehle S., Zeng N. Compensatory water effects link yearly global land CO₂ sink changes to temperature // Nature. 2017. V. 541, N 7638. P. 516–520.
 77. Hadden D., Grelle A. Changing temperature response of respiration turns boreal forest from carbon sink into carbon source // Agric. For. Meteorol. 2016. V. 223. P. 30–38.
 78. Schurgers G., Lagergren F., Mulder M., Lindroth A. The importance of micrometeorological variations for photosynthesis and transpiration in a boreal coniferous // Biogeosciences. 2015. V. 12, N 1. P. 237–256.
 79. Zhu P., Zhuang Q., Ciais P., Welp L., Li W., Xin Q. Elevated atmospheric CO₂ negatively impacts photosynthesis through radiative forcing and physiology-mediated climate feedback // Geophys. Res. Lett. 2017. V. 44, N 4. P. 1956–1963.
 80. Doughty Ch.E., Metcalfe D.B., Girardin C.A.J., Amerzquita F.F., Cabrera D.G., Huasco W.H., Silva-Espejo J.E., Araujo-Murakami A., da Costa M.C., Rocha W., Feldpausch T.R., Mendoza A.L.M., da Costa A.C.L., Meir P., Phillips O.L., Malhi Y. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia // Nature. 2015. V. 519, N 7541. P. 78–82.
 81. Rowland L., da Costa A.C.L., Galbraith D.R., Oliveira R.S., Binks O.J., Oliveira A.A.R., Pullen A.M., Doughty C.E., Metcalfe D.B., Vasconcelos S.S., Ferreira L.V., Malhi Y., Grace J., Mencuccini M., Meir P. Death from drought in tropical forests is triggered by hydraulics not carbon starvation // Nature. 2015. V. 528, N 7580. P. 119–122.
 82. Seneviratne S., Ciais P. Trends in ecosystem recovery from drought // Nature. 2015. V. 548, N 7666. P. 164–165.
 83. URL: <http://aisori.meteo.ru/Climater/> (last access: 20.10.2017).
 84. Kim J., Kim H.M., Cho C.-H., Boo K.-O., Jacobson A.R., Sasakawa M., Machida T., Arshinov M., Fedoseev N. Impact of Siberian observations on the optimization of surface CO₂ flux // Atmos. Chem. Phys. 2017. V. 17, N 4. P. 2881–2899.
 85. Brienen R.J.W., Phillips O.L., Feldpausch T.R., Gloor E., Baker T.R., Lloyd J., Lopez-Gonzalez G., Monteagudo-Mendoza A., Malhi Y., Lewis S.L., Martinez R.V., Alexiades M., Davila E.A., Alvarez-Loayza P., Andrade A., Aragao L.E.O.C., Araujo-Murakami A., Arets E.J.M.M., Arroyo L., Aymard G.A., Bánki O.S., Baraloto C., Barroso J., Bonal D., Boot R.G.A., Camargo J.L.C., Castilho C.V., Chama V., Chao K.J., Chave J., Comiskey J.A., Valverde F.C., da Costa L., de Oliveira E.A., Di Fiore A., Erwin T.L., Fauset S., Forsthofer M., Galbraith D.R., Grahame E.S., Groot N., Herrault B., Higuchi N., Honorio Coronado E.N., Keeling H., Killeen T.J., Laurance W.F., Laurance S., Licona J., Magnussen W.E., Marimon B.S., Marimon-Junior B.H., Mendoza C., Neill D.A., No-

- queira E.M., Numez P., Pallqui Camacho N.C., Parada A., Pardo-Molina G., Peacock J., Peca-Claros M., Pickavance G.C., Pitman N.C.A., Poorter L., Prieto A., Quesada C.A., Ramirez F., Ramirez-Angulo H., Restrepo Z., Roopsind A., Rudas A., Salomao R.P., Schwarz M., Silva N., Silva-Espejo J.E., Silveira M., Stropp J., Talbot J., ter Steege H., Teran-Aguilar J., Terborgh J., Thomas-Caesar R., Toledo M., Torello-Raventos M., Umetsu R.K., van der Heijden G.M.F., van der Hout P., Guimaraes Vieira I.C., Vieira S.A., Vilanova E., Vos V.A., Zagt R.J. Long-term decline of the Amazon carbon sink // *Nature*. 2015. V. 519, N 7543. P. 344–348.
86. Kunstler G., Falster D., Coomes D.A., Hui F., Kooyman R.M., Laughlin D.C., Poorter L., Vanderwee M., Vieilledent G., Wright S.J., Aiba M., Baraloto Ch., Caspersen J., Cornelissen J.H.C., Gourlet-Fleury S., Hanewinkel M., Herault B., Jens Kattge J., Kurokawa H., Onoda Y., Pecuelas J., Poorter H., Uriarte M., Richardson S., Ruiz-Benito P., Sun I.-F., Stehl G., Swenson N.G., Thompson J., Westerlund B., Wirth Ch., Zavala M.A., Zeng H., Zimmerman J.K., Zimmermann N.E., Westoby M. Plant functional traits have globally consistent effects on competition // *Nature*. 2015. V. 528, N 7583. P. 34–38.
87. Crowther T.W., Glick H.B., Covey K.R., Bettigole C., Maynard D.S., Thomas S.M., Smith J.R., Hintler G., Duguid M.C., Amatulli G., Tuanmu M.-N., Jetz W., Salas C., Stam C., Piotta D., Tavani R., Green S., Bruce G., Williams S.J., Wiser S.K., Huber M.O., Hengeveld G.M., Nabuurs G.-J., Tikhonova E., Borchardt P., Li C.-F., Powrie L.W., Fischer M., Hemp A., Homeier J., Cho P., Vibrans A.C., Umunay P.M., Piao S.L., Rowe C.W., Ashton M.S., Crane P.R., Bradford M.A. Mapping tree density at a global scale // *Nature*. 2015. V. 525, N 7568. P. 201–205.
88. Liang J., Crowther T.W., Picard N., Wiser S., Zhou M., Alberti G., Schulze E.-D., McGuire A.D., Bozzato F., Pretzsch H., de-Miguel S., Paquette A., Herault B., Scherer-Lorenzen M., Barrett C.B., Glick H.B., Hengeveld G.M., Nabuurs G.-J., Pfautsch S., Viana H., Vibrans A.C., Ammer C., Schall P., Verbyla D., Tchebakova N., Fischer M., Watson J.V., Chen H.Y.H., Lei X., Schelhaas M.-J., Lu H., Gianelle D., Parfenova E.I., Salas C., Lee E., Lee B., Kim H.S., Bruelheide H., Coomes D.A., Piotta D., Sunderland T., Schmid B., Gourlet-Fleury S., Sonke B., Tavani R., Zhu J., Brandl S., Vayreda J., Kitahara F., Searle E.B., Neldner V.J., Ngugi M.R., Baraloto C., Frizzera L., Balazy R., Oleksyn J., Zawila-Niedzwiecki T., Bouriaud O., Bussotti F., Finer L., Jaroszewicz B., Jucker T., Valladares F., Jagodzinski A.M., Peri P.L., Gonmadje C., Marthy W., O'Brien T., Martin E.H., Marshall A.R., Rovero F., Bitariho R., Niklaus P.A., Alvarez-Loayza P., Chamaña N., Valencia R., Mortier F., Wortel V., Engone-Obiang N.L., Ferreira L.V., Odeke D.E., Vasquez R.M., Lewis S.L., Reich P.B. Positive biodiversity-productivity relationship predominant in global forest // *Science*. 2016. V. 354, N 6309. P. 1–12, 196.
89. Duffy J.E., Godwin C.M., Cardinale B.J. Biodiversity effects in the wild are common and as strong as key drivers of productivity // *Nature*. 2017. V. 549, N 7671. P. 261–264.
90. Kyrner C. A matter of tree longevity // *Science*. 2017. V. 355, N 6321. P. 130–131.
91. Рябошанко А.Г., Ревокатова А.П. Роль восстановления лесов и новых лесопосадок в снижении концентрации CO₂ в атмосфере // *Фундам. и прикл. климатология*. 2015. Т. 2. С. 81–92.
92. Van der Heijden M.G.A. Underground networking // *Science*. 2016. V. 352, N 6283. P. 290–291.
93. Klein T., Siegwolf R.T.W., Körner C. Belowground carbon trade among tall trees in a temperate forest // *Science*. 2016. V. 352, N 6283. P. 342–344.
94. Silva L.C.R. Carbon sequestration beyond tree longevity // *Science*. 2017. V. 355, N 6330. P. 1141.
95. Бабурина А.Г., Гордиенко П.В., Карасев В.В., Рябинков В.А., Якушкин Е.А. Динамика очагов корневой губки в лесах России // *Макромицеты бореальной зоны: Тр. всерос. науч.-практич. конф.* 2009. С. 2–7.
96. Павлов И.Н., Барабанова О.А., Кулаков С.С., Еремин В.В., Агеев А.А., Евдокимова Л.С., Ромашкин И.В., Коротков А.А., Еремина Т.В. Снижение устойчивости хвойных лесов Сибири к корневым патогенам в результате современного увеличения температуры приземного слоя воздуха и почвы // *Хвойные бореальной зоны*. 2011. Т. 28, № 1–2. С. 47–53.
97. Павлов И.Н., Барабанова О.А., Кулаков С.С., Юшкова Т.Ю., Агеев А.А., Пашенова Н.В., Тарасов П.А., Шевцов В.В., Иванова Т.Н. К вопросу образования очагов куртинного усыхания сосны обыкновенной на старопашотных землях (Роль корневой губки, эдафических факторов и изменения климата) // *Хвойные бореальной зоны*. 2010. Т. 27, № 3–4. С. 263–272.
98. Павлов И.Н., Рухуллаева О.В., Барабанова О.А., Агеев А.А. Оценка роли корневых патогенов в ухудшении состояния лесного фонда Сибирского федерального округа // *Хвойные бореальной зоны*. 2008. Т. 25, № 3–4. С. 262–268.
99. Terrer C., Vicca S., Hungate B.A., Phillips R.P., Prentice I.C. Mycorrhizal association as a primary control of the CO₂ fertilization effect // *Science*. 2016. V. 353, N 6294. P. 72–74.
100. Van der Putten W.H. Belowground drivers of plant diversity // *Science*. 2017. V. 355, N 6321. P. 134–135.
101. Zipfel C., Oldrout G.E.D. Plant signalling in symbiosis and immunity // *Nature*. 2017. V. 543, N 7645. P. 328–336.

M.Yu. Arshinov, B.D. Belan, D.K. Davydov, O.A. Krasnov, Sh. Macsyutov, T. Machida, M. Sasaki, A.V. Fofonov. Peculiarities of the vertical distribution of carbon dioxide over Southwestern Siberia in the summer season.

The long-term variability of carbon dioxide concentration at different altitudes during the summer period is analyzed on the basis of data of aircraft sounding over Southwestern Siberia. The monitoring data show that summer values of carbon dioxide concentration at an altitude of 7.0 km grew with a rate of 1.90 ppm/year over the region under study. In the atmospheric boundary layer, the CO₂ concentration grew insignificantly during summer periods from 1997 to 2004 (0.32 ppm/year). From 2005 to 2017 inclusive, the growth rate sharply increased and was 2.55 ppm/year. The analysis of possible causes of such long-term behavior has shown that it is not due to reduction of the area of forests, wildfires, or diseases of trees. It is also impossible to assert that the carbon dioxide sink was caused by the impact of climatic parameters on forest vegetation. It is probable that the amount of carbon dioxide accumulated in the atmosphere by 2004 makes impossible its further absorption by Siberian forests.