

К.Я. Кондратьев, В.А. Исидоров

## Воздействия сжигания биомассы на химический состав атмосферы

*Центр экологической безопасности РАН/Нансеновский международный центр  
окружающей среды и дистанционного зондирования, г. Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный университет*

Поступила в редакцию 31.01.2001 г.

Обсуждается проблема биогенных выбросов в атмосферу. Проанализированы данные о воздействии сжигания биомассы на химический состав глобальной атмосферы, а также о газофазных реакциях образования атмосферного аэрозоля. Главное внимание уделено последствиям сжигания биомассы (лесные, кустарниковые и травяные пожары) в тропиках (Африка и Южная Америка) и в меньшей степени – лесным пожарам в средних широтах. Отдельно рассмотрен вопрос о сжигании биомассы для динамики тропосферного озона. Кратко затронута проблема влияния выбросов в атмосферу за счет сжигания биомассы на глобальный климат.

### Введение

Сжигание биомассы в тропиках является одним из главных источников поступления малых газовых компонентов (МГК) и частиц аэрозоля в тропосферу. Поскольку подобные МГК и аэрозоль существенно влияют на протекающие в атмосфере химические процессы и формирование глобального климата, то очень важное значение приобретает получение адекватной информации о продуктах выбросов в атмосферу, обусловленных сжиганием биомассы [1–42]. Полученные в этой связи результаты представляют собой данные как полевых наблюдений, так и лабораторного моделирования.

### 1. Саванны и тропические леса

На долю тропиков приходится около 40% поверхности суши земного шара и примерно 60% глобальной первичной продуктивности. Разнообразие видов растительности в тропиках гораздо шире, чем в других регионах. Однако в настоящее время происходит процесс трансформации тропических лесов и саванн в земли сельскохозяйственного назначения и пастбища со скоростью около 1% в год. За эту трансформацию ответственно, в первую очередь, осуществляемое человеком сжигание биомассы, которое оказывает существенное воздействие на химический состав атмосферы.

В процессе сжигания биомассы в атмосферу выбрасывается гигантское количество неметановых углеводородных соединений (NMHC),  $\text{NO}_x$  и многих других МГК. Как показал анализ данных спутниковых наблюдений, на долю тропиков приходится около 70% сжигаемой биомассы, примерно половина которой сосредоточена в Африке, причем максимум сжигания биомассы в годовом ходе (в период сухого сезона) имеет место к северу от экватора. Саванны и леса в тропиках выбрасывают в атмосферу также большое количество биогенных соединений.

Р. Дельма и др. [3] описали технические средства наблюдений, методы интерпретации данных и главные результаты, полученные в рамках международного полевого

наблюдательного эксперимента EXPRESSO, осуществленного в 1994–1996 гг. (основной период наблюдений охватывал начало сухого сезона в ноябре–декабре 1996 г.) с целью изучения процессов, ответственных за изменения химического состава тропосферы под воздействием сжигания биомассы в центральной Африке. Главными средствами наблюдений были: 1) французский самолет-лаборатория «Фоккер-27», оборудованный для измерений химического состава тропосферы и метеорологических параметров на высотах до 4 км; 2) аппаратура AVHRR (радиометры очень высокого разрешения) на двух метеорологических спутниках NOAA; 3) аппаратура, установленная на мачте высотой 65 м в тропическом лесу в республике Конго.

Анализ данных самолетных измерений, служивших для изучения особенностей динамики атмосферы и турбулентности, продемонстрировал наличие сложной структуры мезомасштабной атмосферной циркуляции вблизи внутритропической зоны конвергенции. Обработка спутниковых изображений позволила оконтурить зоны пожаров в лесах и в саванне. Совместная интерпретация данных наблюдений с самолета и на мачте позволила охарактеризовать влияние биогенных источников и сжигания биомассы на химический состав нижних слоев тропосферы. Анализ данных наблюдений опирался на использование соответствующих результатов численного моделирования процессов в региональных и глобальных масштабах.

Д. Гринберг и др. [11] обсудили результаты самолетных и наземных наблюдений выбросов МГК и аэрозоля в период сжигания биомассы в центральной Африке, выполненных в рамках полевого наблюдательного эксперимента EXPRESSO по изучению региональных источников и стоков окислителей. Среди NMHC максимальным уровнем выбросов над саваннами и тропическими лесами характеризуется изопрен. Концентрация изопрена в районах тропических лесов и саванн составляет 700–1000 и 100–400  $\text{трл}^{-1}$  соответственно, тогда как в случае  $\alpha$ -пинена она равна 30–100 и 20–30  $\text{трл}^{-1}$ .

Прямые измерения потока изопрена с применением корреляционной методики привели к значениям, составляющим с середины утра до полудня около 890  $\mu\text{кг}$  изо-

прена/м<sup>2</sup>·ч в случае влажных тропических лесов и полулиственных лесов (за сутки около 10,6 мг изопрена/м<sup>2</sup>) и примерно 570 мкг изопрена/м<sup>2</sup>·ч в условиях переходных и деградировавших лесных ландшафтов (6,5 мг изопрена/м<sup>2</sup>). С этими данными хорошо согласуются модельные оценки, полученные с использованием характеристик ландшафтов по спутниковым данным в сочетании с данными наблюдений выбросов МГК листьями.

Полученные значения концентрации и потоков изопрена использованы в работе [11] для оценок баланса оксидантов над тропическим лесом и саваннами. Анализ результатов вычислений радиационных потоков привел к выводу, что наблюдаемый сильный вертикальный градиент коэффициента скорости фотолиза NO<sub>2</sub> обусловлен ослаблением фотолитической радиации за счет значительно количества поглощающего аэрозоля, который образуется, по-видимому, как продукт сжигания биомассы. Численное моделирование химических процессов в пограничном слое атмосферы (ПСА) с применением боковой модели и при учете наблюдаемых значений концентрации и потока изопрена показало, что упомянутое ослабление фотолитической радиации приводит к уменьшению концентрации ОН примерно в два раза по сравнению с условиями безаэрозольного ПСА. Поэтому прямой вклад фотохимических процессов в ПСА в образование озона, особенно из биогенного изопрена, оказывается малым.

С. Руэллан и др. [35] обсудили результаты самолетных наблюдений аэрозоля в нижней части тропосферы (на высотах до 4 км) над центральной Африкой, выполненных в ноябре 1996 г. в рамках полевого наблюдательного эксперимента EXPRESSO. В контексте исследований выбрасываемых в атмосферу продуктов сжигания биомассы С. Руэллан и др. [35] осуществили обработку 24 проб аэрозоля с целью анализа свойств черного и органического углерода (BC и OC), растворимого в воде углерода (WSOC), полициклических ароматических углеводородных соединений (PAH), растворимых ионов, элементного состава и морфологии аэрозоля. Забор проб аэрозоля осуществлен над тропическими лесами или саваннами вблизи внутритропической зоны конвергенции (ВЗК).

На всех высотах счетная концентрация частиц (их диаметр варьировал в пределах 10–14000 нм) была высокой [(3100±2060) см<sup>-3</sup>]. Менее значительной, чем ожидалось, оказалась доля частиц почвенного происхождения [массовая концентрация составила (20±18) мкг/м<sup>3</sup>]. С другой стороны, весьма существенным было содержание пирогенных частиц и черного углерода. Концентрация BC составила: (3,8±2,3) мкг/м<sup>3</sup> (пограничный слой атмосферы над лесом), (9,8±3,9) мкг/м<sup>3</sup> (саванна) и (8,7±1,6) мкг (слой харматанна).

Данные о других малых компонентах (оксалат, PAN и др.) демонстрируют наличие сильного влияния пожаров в саванне на их содержание в тропосфере региона. Полученные результаты свидетельствуют также о существовании вертикального и горизонтального обмена между различными слоями тропосферы и через ВЗК.

Доля WSOC в исследованных пробах составляла (46±9)% по отношению к содержанию общего органического углерода. Более значительной [(85±18)%] оказалась эта доля в слое харматанна, что указывает на возможную существенную роль таких образующихся при сжигании биомассы частиц, как облачные ядра конденсации. Для оценки старения подобных частиц были использованы различные химические индикаторы, включая

отношение концентраций WSOC/OC, которое возрастало с высотой в 2–3 раза при входе в слой харматанна.

В пределах пограничного слоя атмосферы над лесом зарегистрирована высокая концентрация органических кислот (формата, ацетата и оксалата), имеющих биогенное происхождение. Обсуждаемые результаты наблюдений получены в начале сухого сезона, когда преобладало влияние на атмосферу пожаров в саванне, а поток пылевого аэрозоля за счет харматанна был еще слабым. В этих условиях нитраты сохранялись преимущественно в газообразном состоянии, и поэтому соответствующие азотные биогены оставались в пределах рассмотренного региона.

За последние годы становится все более ясным, что обусловленные сжиганием биомассы выбросы в атмосферу оказывают не только радикальное влияние на химический состав атмосферы в тропиках, но существенно влияют и на глобальную атмосферу, внося тем самым вклад в изменения глобального климата. Особенно значительное воздействие на химический состав атмосферы оказывает сжигание биомассы в Африке, где располагается более половины биомов саванн. При этом в атмосферу выбрасывается большое количество таких парниковых газов, как CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, а также усиливается образование тропосферного озона.

С ноября по март регион пожаров охватывает западную и центральную части Африки (в северном полушарии), а в период июля–октября пожары распространяются в восточной и южной Африке (в южном полушарии). Общая циркуляция атмосферы (прежде всего через посредство внутритропической зоны конвергенции) обуславливает перенос аэрозольных и газовых продуктов сжигания биомассы над экваториальным поясом Атлантического океана.

С целью дальнейших исследований последствий сжигания биомассы (прежде всего с точки зрения пространственного распределения окиси углерода) в ноябре–декабре 1996 г. С. Каутенет и др. [2] выполнили самолетные измерения химического состава тропосферы и метеорологических параметров в рамках полевого наблюдательного эксперимента EXPRESSO (имеется в виду получение данных о региональных источниках и стоках оксидантов). Для решения этой задачи были использованы также данные AVHRR, устанавливаемого на спутниках NOAA, являющиеся входной информацией для региональной модели атмосферы (RAMS), которая позволяет оценить выбросы продуктов сжигания биомассы в атмосферу.

Уровень выбросов в атмосферу зависит от специфики сжигаемой биомассы и может быть оценен по данным AVHRR с использованием двух независимых методик: 1) с учетом классификации типов растительного покрова (CV), 2) на основе учета первичной продуктивности (NPP). Спутниковые изображения обрабатывались с целью определения площади подвергшейся сжиганию зоны. Доля сгоревшей биомассы (или фактор сжигания биомассы  $\alpha$ ) определяется путем модельных оценок и равняется примерно 40%. Такого рода информация используется для расчетов обусловленного пожарами перераспределения окиси углерода и CO<sub>2</sub>, результаты которых сопоставлены с данными самолетных наблюдений.

В работе [2] рассмотрены два эпизода такого рода событий, охватывавшие промежутки времени, равные 4 и 5 сут, когда полеты происходили над лесами и саваннами соответственно. Полученные результаты отображают то обстоятельство, что главным фактором пространственного распределения малых газовых компонентов – продуктов сжигания биомассы – была мезомасштабная циркуляция.

Результаты численного моделирования поля концентрации CO (с использованием модели RAMS) находятся в хорошем согласии с данными самолетных наблюдений над лесом и саванной. Применение методик CV или NPP для вычисления поля концентрации CO влечет за собой расхождение не более 20–30% (это небольшое расхождение осложняет выявление наиболее надежной методики).

В связи с широкой распространенностью пожаров в саваннах и их значительным воздействием на окружающую среду (химический состав атмосферы, свойства почвы, биоразнообразие и др.) Т. Нильсен [27] выполнил анализ особенностей пространственно-временного распределения пожаров в регионе осуществления полевого эксперимента EXPRESSO (центральная Африка) по данным AVHRR за периоды сухих сезонов с ноября 1994 по декабрь 1997 г. Для описания изменчивости пожаров использованы, в частности, три характеристики: 1) вероятность пожара в западной точке в определенный момент времени; 2) вероятность повторных пожаров в западной точке в течение определенного промежутка времени; 3) пространственная протяженность и температура горящей саванны, влияющие на условия в заданной точке.

Обработка спутниковых изображений показала, что возникновение пожара не является пространственно случайным процессом. Вероятность пожара повышается, например, при наличии пожаров поблизости от рассматриваемой точки. Комбинированный анализ характеристик временной и пространственной изменчивости пожаров позволил обосновать 12 типичных режимов пожаров, а также зависимость специфики пожаров от особенностей растительного покрова. Хотя не вызывает сомнений, что пожары в саваннах обусловлены, как правило, человеком, а не природными факторами, конкретные причины пожаров (связанные с теми или иными формами хозяйственной деятельности) остаются неясными. С точки зрения временной изменчивости целесообразно классифицировать пожары с учетом начала сезона пожаров, скорости их развития и продолжительности сезона пожаров. В этом контексте можно различить типы пожаров по особенностям динамики их развития: быстрого, позднего или длительного.

Вклад происходящих в саваннах пожаров составляет более 40% по отношению к глобальному уровню сжигания биомассы, за счет которого в атмосферу выбрасываются, в частности, такие малые газовые компоненты, как неметановые углеводородные соединения, окись углерода, метан и др., а также аэрозоль. Согласно имеющимся оценкам в период 1975–1980 гг. ежегодно происходило сжигание от 40 до 75% саванн, причем около 60% подобных пожаров имели место в Африке. В 1990 г. было сожжено примерно  $2,0 \cdot 10^9$  т биомассы растительности, в результате чего в атмосферу поступило 145 Тг CO, что составляет около 30% по сравнению с антропогенными выбросами CO. Количество выбросов C<sub>2</sub>–C<sub>3</sub> алканов, алкенов и бензена в атмосферу за счет пожаров в саваннах Африки могло составлять 20–95% по отношению к глобальным промышленным выбросам этих соединений. Относительный вклад упомянутых выбросов в формирование парникового эффекта атмосферы может достигать 25%. Существенное влияние оказывает сжигание биомассы на глобальный круговорот углерода (следовательно, на концентрацию CO<sub>2</sub>).

В связи с отмеченными обстоятельствами Э. Хоффа и др. [14] изучили закономерности сезонного хода выбросов в атмосферу за счет пожаров в саванне Западной провинции Замбии в период сухого сезона 1996 г. (начало июня –

начало августа). Главной целью разработки был анализ влияния содержания влаги в топливе на динамику процесса сгорания. Наблюдения показали, что в начале сухого сезона за счет сжигания биомассы в атмосферу может выбрасываться меньше продуктов полного сгорания (CO<sub>2</sub>), но больше продуктов неполного сгорания (в том числе CO).

В течение периода наблюдений изучались пожары, созданные в 13 точках, расположенных на различных участках саванны. После поджигания экосистем прослеживалось дальнейшее развитие пожара в ходе эволюции сухого сезона. Общий расход топлива варьировал от 1884 до 3314 кг/га в саванне дамба и от 88953 до 132332 кг/га в саванне миомбо. Влагосодержание зеленого травяного покрова снизилось на протяжении пожаров от 127 до 69% (дамба) и в пределах 119–33% (миомбо). Коэффициент сжигания CF (доля сгоревшего при пожаре топлива) возрастал с 44 до 98% (дамба) и 1–47% (миомбо). Энергетическая линейная интенсивность горения варьировала в пределах 288–5271 кВт/м (дамба) и 25–5274 кВт/м (миомбо). Таким образом, в ходе развития пожара (по мере эволюции сухого сезона) происходило существенное изменение специфики пожара и обусловленных им выбросов в атмосферу.

Лабораторное моделирование пожаров, связанных со сжиганием растительности различных видов (при использовании Фурье-спектрометра для ИК-диапазона с целью определения свойств продуктов сжигания), привело к выводу, что во всех случаях в виде подобных продуктов наблюдались значительные количества такого рода окисленных органических соединений, как формальдегид, метанол, пары уксусной и муравьиной кислот. Д. Гудэ и др. [9] обсудили результаты трех новых экспериментов, целью которых было изучение продуктов сжигания травы. Получены данные о содержании в выбросах углекислого газа, окиси азота, водяного пара, окиси углерода, метана, аммония, этилена, ацетилена, изобутена, метанола, паров уксусной и муравьиной кислот, формальдегида и гидроксиацетальдегида. Эти данные характеризуют состав дымов при сжигании растительности различных типов. Выбросы формальдегида, метанола и уксусной кислоты происходили при таких условиях сжигания травы, когда относительная концентрация CO составляла ~1–2%, а при сжигании других окисленных соединений – около 1% CO. Все эти соединения имеют важное значение, поскольку они оказывают существенное влияние на химические процессы с участием O<sub>3</sub> и NO<sub>x</sub>, происходящие как в шлейфе дымов, так и в свободной тропосфере.

Спектроскопический анализ показал, что преобладающим выбросом C<sub>4</sub>-соединений был изобутен (C<sub>4</sub>H<sub>8</sub>), но не 1-бутен. Оценки привели к выводу, что (67±9)% содержащегося в топливе азота входило в состав исследованных МГК, а на долю NH<sub>3</sub> и NO<sub>x</sub> приходилось (22±8)%. Эти данные противоречат полученным ранее результатам, согласно которым трансформация в газовую фазу содержащегося в топливе азота достигала 90%, в том числе 55% составляли NH<sub>3</sub> и NO<sub>x</sub>. Причины такого расхождения пока что не ясны.

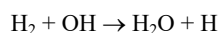
На основе использования глобальной трехмерной модели атмосферной циркуляции с учетом химических процессов А. Гюнтер и др. [12] осуществили численное моделирование, результаты которого показали, что увеличение выбросов изопрена и монотерпенов в два раза ведет к изменениям на 10–30% концентрации таких малых газовых компонентов, как OH, MPAN, NO<sub>x</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> и CO. Этот вывод имеет важное значение для интерпретации данных

полевого эксперимента EXPRESSO, целью которого являлась, в частности, оценка выбросов изопрена и монотерпенов в регионах лесов и саванн центральной Африки.

Сравнение результатов численного моделирования с данными наблюдений с самолета и с мачты над покровом леса привело к выводу, что оценки осредненных выбросов возможны с точностью до коэффициента, равного 2, если использовать в качестве входных параметров модели данные наземных измерений. В работе [12] получена оценка годового поступления изопрена в атмосферу центральной Африки как составляющего 35 тераграмм углерода (ТгС). Это значение лишь на 14% меньше найденного ранее с использованием более приближенной модели. Величины, рассчитанные для отдельных точек и различных моментов времени, отличаются от наблюдаемых до 5 раз, что отображает наличие весьма существенных погрешностей численного моделирования.

Ввиду немногочисленности измерений концентрации молекулярного водорода в атмосфере имеющаяся информация довольно противоречива. Согласно некоторым данным приземное отношение смеси  $H_2$  варьирует в пределах  $\sim 540\text{--}590$  млрд $^{-1}$  в условиях чистой тропосферы и достигает  $\sim 800$  млрд $^{-1}$  в городских регионах. Значения фоновой концентрации  $H_2$  в северном полушарии (СП) примерно на 5% выше, чем в южном полушарии (ЮП). Однако согласно другим данным, относящимся к интервалу широт  $71^\circ$  с.ш.  $\text{--}90^\circ$  ю.ш., концентрация  $H_2$  в ЮП ( $\sim 520$  млрд $^{-1}$ ) выше, чем в СП ( $\sim 490$  млрд $^{-1}$ ). По данным наблюдений в 1986–1989 гг., имел место тренд роста концентрации  $H_2$ , равный  $(0,6\pm 0,1)\%$  в год.

Известны четыре главных источника  $H_2$  в тропосфере: два фотохимических источника (окисление метана и неметановых углеводородных соединений) и два источника за счет продуктов сгорания (такие «технологические» источники, как сжигание ископаемых топлив, а также сжигание биомассы). Биогеохимический круговорот характеризуется наличием взаимодействий с круговоротами метана и окиси углерода через посредство реакций образования и разрушения формальдегида. Водород удаляется из тропосферы путем реакции с ОН:



и посредством осаждения  $H_2$  на подстилающую поверхность. П. Новелли и др. [28] обсудили результаты осуществившихся в течение 5 лет наблюдений концентрации  $H_2$  путем анализа проб воздуха, взятых примерно в 50 точках удаленного морского пограничного слоя атмосферы. Обработка данных наблюдений за 1991–1996 гг. показала, что глобально осредненное значение отношения смеси  $H_2$  составляет  $(531\pm 6)$  млрд $^{-1}$ , причем изменчивость концентрации  $H_2$  характеризуется отчетливым годовым ходом в обоих полушариях при одинаковых уровнях сезонного максимума около  $530\text{--}550$  млрд $^{-1}$ . Однако минимум концентрации  $H_2$  (в годовом ходе) оказался в СП на  $70$  млрд $^{-1}$  более глубоким, чем в ЮП (соответственно около  $450$  и  $520$  млрд $^{-1}$ ) и поэтому количество  $H_2$  в ЮП примерно на 3% больше, чем в СП.

Что касается компонентов глобального бюджета  $H_2$ , то его главным источником в тропосфере является окисление метана, а усвоение водорода почвой служит главным стоком. Размер глобального годового круговорота  $H_2$  составляет  $75$  Тг  $H_2$ /г. Подобный круговорот в сочетании с расчетной величиной содержания водорода в тропосфере ( $155$  Тг) определяет время жизни, равное  $\sim 2$  годам.

Хотя имеющаяся информация о глобальном распределении источников и стоков  $H_2$  и определяющих его факторах остается неполной, несомненно, что более низкий уровень минимальной концентрации  $H_2$  в северном полушарии можно объяснить влиянием межполушарной асимметрии усвоения  $H_2$  почвами. По-видимому, годовой ход концентрации  $H_2$  в южном полушарии обусловлен влиянием сжигания биомассы.

## 2. Бореальные леса и другие источники выбросов

Пожары в бореальных лесах вносят лишь небольшой (около 2%) вклад в выбросы углерода в атмосферу, но оказывают серьезное воздействие на химические процессы в высокоширотной тропосфере, особенно связанные с образованием тропосферного озона и формированием окислительной способности тропосферы. Существенное влияние оказывают пожары в бореальных лесах также на радиационные свойства атмосферы, приводя к образованию первичного и вторичного аэрозолей.

Анализ химического состава снега, аккумулированного на северных ледниках и на гренландском ледяном щите, открывает уникальные возможности оценки эволюции пожаров в прошлом под влиянием природных (изменения климата) или антропогенных факторов. В этой связи Д.-Л. Джафрезо и др. [18] обсудили результаты анализа концентрации аэрозольного оксалата ( $C_2O_4^{2-}$ ) в еженедельных пробах снега, которые были взяты на вершине Саммит гренландского ледяного щита ( $72^\circ 30'$  с.ш.,  $38^\circ 00'$  з.д., высота над уровнем моря  $3210$  м) в летние сезоны 1992–1995 гг. Были зарегистрированы четыре эпизода повышенной концентрации оксалата, которые можно интерпретировать как результат прохождения над точкой отбора проб шлейфа продуктов сжигания биомассы.

По крайней мере, в двух случаях регионы пожаров располагались на севере Канады. Анализ аэрозоля, относящегося к одному из таких событий, обнаружил сильное увеличение счетной концентрации частиц аккумуляционной моды, хотя рост суммарной концентрации не был значительным. Специфика химического состава аэрозоля характеризуется наличием типичных продуктов сжигания биомассы: мелкодисперсного аэрозоля, содержащего К; высокой концентрации аммония ( $NH_4$ ), аэрозольных муравьиной кислоты ( $HCOO^-$ ) и ацетата ( $CH_3COO^-$ ), а также органических соединений типа гликолата.

Микроструктура аэрозоля, содержащего К, оксалат и гликолат, сдвинута в сторону аккумуляционной моды и по форме соответствует микроструктуре сульфатного аэрозоля, что свидетельствует о наличии внутренней перемешанности рассматриваемых компонентов в частицах аэрозоля. Значения молярного отношения S/K позволяют предположить, что сера попадала в аэрозоль в процессе дальнего переноса (вероятно, путем газофазного образования сульфатов). Измерения концентрации упомянутых компонентов в пробах частиц туманов выявили хорошее согласие относительно изменчивости концентрации аэрозоля и тумана с точки зрения содержания различных соединений (ацетата, муравьиной кислоты, хлорида, нитрата и сульфата).

В апреле 1997 г. Йокелсон и др. [41] выполнили самолетные измерения концентрации МГК в атмосфере над очагом сжигания биомассы в штате Северная Каролина (США). С этой целью на самолете-лаборатории King Air B-90 был установлен ИК-Фурье-спектрометр в сочетании с

проточной многоходовой кюветой (AFTIR), что позволило осуществлять измерения концентрации МГК *in situ*. В число исследованных компонентов входили водяной пар, углекислый газ, окись углерода, метан, формальдегид, муравьиная кислота, метанол, этилен и аммиак. Значения концентраций формальдегида, уксусной кислоты и метанола, измеренные по отношению к концентрации окиси углерода, составили  $(2,5 \pm 1)\%$ , что находится в хорошем согласии с результатами аналогичных лабораторных имитационных экспериментов. Однако эти значения существенно превышают полученные ранее при изучении «свежих» дымов.

На основе использования простой фотохимической модели в работе [41] сделаны расчеты, показавшие, что при численном моделировании процессов образования озона в шлейфе дымов от сжигания биомассы необходимо учитывать реакции с участием окисленных органических соединений, возникающих в значительных количествах (как и  $\text{HO}_x$ ) при сжигании биомассы. Обсуждаемые результаты свидетельствуют о том, что окисленные биогенные и другие органические соединения, содержание которых измерялось лишь в редких случаях, играют важную роль в химических процессах, происходящих с участием  $\text{HO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  и  $\text{O}_3$  в тропосфере.

Метилбромид ( $\text{MeBr}$ ) обладает в атмосфере наиболее высокой концентрацией среди органических бромсодержащих газов. Хотя он разрушается в тропосфере через посредство реакции с гидроксидом  $\text{OH}$ , часть его поступает в стратосферу и, в результате фотолиза, становится источником атомов брома, разрушающих озон. В отличие от хлорфторуглеродных соединений метилбромид имеет как антропогенное, так и природное происхождение, причем трудность оценок антропогенного вклада определяет сложность выявления его воздействия на глобальную окружающую среду, хотя за последние годы были предприняты серьезные усилия для изучения его источников и стоков.

При общем содержании метилбромида в глобальной атмосфере, равном примерно 145 Гг, и времени жизни около 0,7 лет уровни его взаимно компенсирующихся годовых источника и стока должны составлять 207 Гг/г, причем уровень неизвестных источников достигает примерно 80 Гг/г. Изученные источники  $\text{MeBr}$  включают выбросы, связанные с использованием химических средств защиты сельскохозяйственных культур (с фумигацией), сжигание биомассы и бензина, а также выбросы, обусловленные Мировым океаном. Океан, будучи и источником и стоком метилбромида, рассматривался как результирующий источник до тех пор, пока исследование выбросов в восточном секторе Тихого океана в диапазоне широт  $44^\circ$  с.ш. –  $45^\circ$  ю.ш. не изменили знак этих оценок на обратный. Важно при этом, что значительным источником  $\text{MeBr}$  являются холодные полярные воды.

Наблюдения показали, что существенным стоком  $\text{MeBr}$  [ $42 \pm 32$ ] Гг/г служат почвы, но эти оценки требуют дальнейших уточнений, как и данные о выбросах метилбромида растительностью. Противоречивые данные Всемирной метеорологической организации указывают на то, что выбросы  $\text{MeBr}$  за счет сжигания бензина достигли в 1991–1992 гг. 15 Гг/г., но согласно другой информации составляли лишь 0,5–1,5 Гг/г. (имеется также оценка порядка 3–4 Гг/г.). Для выбросов, обусловленных сжиганием биомассы, были получены, в частности, две оценки: 19 и 14–24 Гг/г. Д. Вильямс и др. [39] обсудили результаты изме-

рений потока метилбромида на шести сельскохозяйственных полях в процессе их фумигации, включая измерения потоков как над почвой (при помощи газовых камер), так и в почве на глубинах до 90 см (измерения сделаны на различных участках в Калифорнии). Анализ данных измерений показал, что от 21 до 74% метилбромида выбрасывается в атмосферу. Средний относительный уровень выбросов составляет  $(49 \pm 19)\%$  (измерения в камерах) и  $(52 \pm 20)\%$  (данные для почвы). В работе [39] проанализированы главные факторы, определяющие уровень выбросов метилбромида.

Главными факторами, определяющими источники и стоки  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$ , являются микробные (биогеохимические) процессы в почвах, протекающие благодаря наличию в почвах азота, углерода и кислорода, а также воды. Формирующиеся таким образом потоки МГК в атмосферу характеризуются сильной пространственно-временной неоднородностью, что серьезно осложняет оценки бюджета озона и потоков упомянутых МГК. Существенно влияет на потоки азота и метана применение азотных удобрений. С целью изучения пространственно-временной изменчивости потоков  $\text{NO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$  была выполнена продолжавшаяся три года программа полевых наблюдений (с использованием газовых камер) на плантациях леса бальсы (*Ochroma lagopus*) в Коста-Рике, которые как подвергались, так и не подвергались внесению удобрений.

Потоки исследуемых МГК в почве измерялись вручную в 36 случайно распределенных точках леса, а осредненные выбросы в атмосферу определялись по данным семи камер. Данные наблюдений свидетельствуют о наличии сильной изменчивости потоков МГК в пределах двух избранных участков площадью  $40 \times 40 \text{ м}^2$ , за исключением потоков окиси азота, которые изменялись слабо. Внесение удобрений вызывало усиление выбросов окиси азота, но не порождало их пространственной изменчивости. Примерно за 6 нед значения потока окиси азота на удобренном участке возвращались к нормальному уровню, наблюдавшемуся во внесении удобрений. Если почва была относительно сухой, то внесение удобрений ограничивало усвоение  $\text{CH}_4$  почвой.

### 3. Сжигание биомассы и тропосферный озон

В настоящее время считается, что наблюдаемый в тропиках Атлантического океана в южном полушарии максимум общего содержания тропосферного озона (ОСТО) в годовом ходе обусловлен сжиганием биомассы в регионах Африки и Бразилии в период весны в южном полушарии. Во время сжигания биомассы в атмосферу поступает значительное количество таких предшественников тропосферного озона, как  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_x$  и углеводородные соединения, что порождает рост ОСТО порядка 10–15 е.Д. (единиц Добсона).

Интерпретация данных, относящихся к Южной Атлантике, осложняется, однако, тем фактом, что изменчивость целого ряда метеорологических параметров характеризуется сходной с пространственным распределением ОСТО структурой с зональным волновым числом, равным 1. Это позволяет предположить наличие значительного влияния метеорологических факторов на поле ОСТО. Численное моделирование продемонстрировало, например, что максимум ОСТО может формироваться и в отсутствие сжигания биомассы, будучи обусловлен-

ным процессом оседания в тропосфере и горизонтальным переносом воздуха.

С другой стороны, в регионе Индонезии возникали аномалии ОСТО порядка 10–20 е.Д. в период Эль Ниньо 1997–1998 гг. (в это время наблюдались также крупномасштабные пожары во влажных тропических лесах Индонезии), что отображает необходимость учета как биогенных, так и динамических факторов. Существенную роль может также играть воздействие на тропосферу, оказываемое стратосферой с характерным для нее влиянием солнечной активности и квазидвухлетних колебаний (КДК). Изменения общего содержания озона в стратосфере влияют на поступление УФ солнечной радиации в тропосферу и тем самым оказывают воздействие на ход фотохимических процессов в тропосфере.

В связи с отмеченными обстоятельствами Д. Зимке и С. Чандра [42] проанализировали причины изменчивости ОСТО с помощью данных спутниковых наблюдений («Нимбус-7») за 20 лет (1979–1998 гг.), оценивая роль сжигания биомассы и крупномасштабного переноса. Рассмотрение относящихся к тропикам данных наблюдений выявило наличие трех регионов, характеризующихся специфическими особенностями годового хода и межгодовой изменчивости ОСТО: восточного и западного секторов Тихого океана, а также Атлантического.

Для последнего региона типично достижение максимумов ОСТО примерно в одинаковое время (сентябрь–октябрь) как к северу, так и к югу от экватора, тогда как в направлении от севера к югу от экватора амплитуда годового хода ОСТО возрастает от 3 до 6 е.Д. С другой стороны, годовой ход ОСТО в обоих секторах Тихого океана оказался слабым при максимумах ОСТО в марте–апреле (северное полушарие) и сентябре–ноябре (южное полушарие).

Существенно различной является и межгодовая изменчивость ОСТО в трех рассматриваемых регионах. В регионе Атлантики доминирующим фактором изменчивости являются КДК, не совпадающие, однако, по фазе с проявлением влияния КДК в стратосфере. Подобная закономерность согласуется с предположением о влиянии модуляции поступающей в тропосферу УФ-радиации на фотохимические процессы в тропосфере в масштабах времени, характерных для КДК и определяющих вариации общего содержания озона в стратосфере. Однако предсказываемые фотохимической моделью изменения ОСТО значительно меньше наблюдаемых, что отображает критически важную роль, которую играют динамические факторы.

По-видимому, существенное (но менее значительное, чем динамика атмосферы) влияние на изменчивость ОСТО над Атлантическим океаном оказывает и сжигание биомассы. Доминирующим фактором межгодовых вариаций ОСТО над Тихим океаном является Эль Ниньо, когда в восточном секторе Тихого океана наблюдаются минимальные значения ОСТО, а в западном – максимальные. Подобная сигнатура изменчивости отображает комбинированное воздействие обусловленного конвекцией переноса и интенсивного сжигания биомассы в регионе Индонезии. Для построения карт ОСТО с высоким пространственным разрешением и изучения длинных рядов данных по ОСТО предложена методика STOR, основанная на использовании малой изменчивости ОСТО вблизи линии смены дат.

В регионах р. Амазонки и центральной Бразилии в период сухой зимы южного полушария (июль–октябрь) возникает вызванное человеком сжигание биомассы в виде

пожаров на участках экосистем тропических лесов и серадо, что порождает выбросы в атмосферу многих малых газовых компонентов – МГК ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ , гидроуглеводородные соединения и др.) и аэрозоля. Образуются также вторичные МГК за счет реакций между продуктами старения. К числу вторичных продуктов относятся, в частности, тропосферный озон. В связи с этим в период с 16 августа по 10 сентября 1995 г. в регионе Куиаба (Cuiaba, центральная Бразилия:  $16^\circ$  ю.ш.,  $56^\circ$  з.д.) был осуществлен полевой наблюдательный эксперимент SCAR-B, главная цель которого состояла в изучении физических свойств дыма, образующегося при сжигании биомассы, и его влияния на радиационный баланс и климат [24a].

Выполненные в период эксперимента озонозондовые наблюдения обнаружили повышение концентрации тропосферного озона (по сравнению со средними условиями сухого сезона), которая сильно изменялась в зависимости от специфики атмосферной циркуляции. Данные фотометрических наблюдений аэрозольной оптической толщины и приземной концентрации сажевого углерода позволили количественно охарактеризовать условия задымления атмосферы. Анализ траекторий воздушных масс привел к выводу, что особенно сильное повышение концентрации озона произошло 26–29 августа и было, по-видимому, связано не только с прямым воздействием продуктов сжигания биомассы, но с влиянием выбросов в атмосферу различных МГК в крупных городах, расположенных на атлантическом побережье Бразилии. Этот вывод подтверждается данными лидара для зондирования облаков, установленного на борту высотного самолета ER-2.

Кислотные МГК принимают активное участие в происходящих в тропосфере химических процессах. Они являются, в частности, главными продуктами процессов окисления, а сухое и влажное осаждение  $\text{HNO}_3$  и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  из атмосферы представляет собой главный сток для тропосферных  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_2$ . В удаленных (фоновых) регионах атмосферы доминирующими кислотными МГК, а также компонентами облачной воды и осадков оказываются часто монокарбоксильные кислоты  $\text{HCOOH}$  и  $\text{CH}_3\text{COOH}$ . В облачной воде муравьиная кислота является основным стоком для радикалов гидроксила.

Р. Талбот и др. [36] описали главные закономерности крупномасштабного распределения  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCOOH}$  и  $\text{CH}_3\text{COOH}$  над центральным и южным регионами Тихого океана южного полушария по данным, полученным в рамках полевого наблюдательного эксперимента PEM-Tropics в весеннее время года. Ввиду удаленности рассматриваемого региона от континентов предполагалось, что концентрация кислотных МГК должна быть низкой. Однако оказалось, что на высотах 2–12 км над южной частью Тихого океана наблюдались повышенные (до  $1200 \text{ трил}^{-1}$  по объему) значения отношения смеси кислотных МГК. Как правило, подобные ситуации были характерны для слоя 3–7 км в полосе широт  $15\text{--}65^\circ$  ю.ш. В большинстве случаев имела место корреляция с отношениями смеси  $\text{CH}_3\text{Cl}$ , PAN и  $\text{O}_3$ , отображающая наличие источников всех этих компонентов, обусловленных фотохимическими процессами и сжиганием биомассы. Отсутствовала, однако, корреляция кислотных МГК с типичными загрязняющими МГК (например,  $\text{C}_2\text{Cl}_4$  или  $\text{CH}_3\text{CCl}_3$ ).

Продукты выбросов за счет автомобильного транспорта характеризовались наличием значительного старения при диапазоне значений отношения концентраций  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{CO}$  в пределах 0,2–2,2  $\text{трил}^{-1}/\text{млрд}^{-1}$ . Соотношение

между содержанием кислотных МГК и этим отношением было сходным с наблюдавшимся в «старых» воздушных массах (таких, которые поступили через >3–5 сут после того, как они покинули континент) западного сектора северной части Тихого океана. Наблюдаемое в морском пограничном слое атмосферы южного региона Тихого океана среднее значение отношения концентраций  $C_2H_2/CO$ , равное 0,6, свидетельствует о том, что этот регион не подвер-

гался прямому воздействию выбросов за счет сжигания биомассы. Здесь наблюдались самые низкие значения отношения смеси кислотных МГК при средних значениях, равных 14 ( $HNO_3$ ), 19 ( $HCOOH$ ) и 18 трил<sup>-1</sup> ( $CH_3COOH$ ). Эти значения согласуются с низкими уровнями концентрации  $NO_x$  (10 трил<sup>-1</sup>),  $CO$  (около 50 млрд<sup>-1</sup>),  $O_3$  (<20 млрд<sup>-1</sup>) и долгоживущих углеводородных соединений (например,  $C_2H_6$ ; < 300 трил<sup>-1</sup>).

Распределение масштабов сжигания сухой биомассы (Тг/г.) в различных регионах

Регион	Источник						
	Тропические леса	Саванна	Леса умеренных широт	Бореальные леса	Бытовое топливо	С/х отходы	Древесный уголь
Тропическая Америка	590	770	0	0	170	200	7,5
Тропическая Африка	390	2430	0	0	240	160	9,3
Тропическая Азия	280	70	0	0	850	990	3,3
Тропическая Океания	0	420	0	0	8	17	0
США и Канада	0	0	0	0	80	250	0,5
Зап. Европа	0	0	0	0	40	170	0,2
Бывший СССР и Восточная Европа	0	–	–	–	–	–	–
Леса умеренных широт	0	0	224	0	0	0	0
Бореальные леса	0	0	0	56	0	0	0
Сумма	1260	3690	224	56	1438	2017	21

В целом анализ данных PEM-Tropics указывает на существенное влияние «старых» выбросов продуктов сжигания биомассы на пространственное распределение концентрации кислотных МГК над южнотихоокеанским регионом весной. Роль подобных выбросов в химических процессах в атмосфере южного полушария оказалась гораздо более значительной, чем это предполагалось ранее.

### Заключение

Осознанная только за последние годы проблема биогенных выбросов в атмосферу вообще и выбросов, обусловленных сжиганием биомассы в частности, привлекла внимание к антропогенно обусловленным изменениям химического состава атмосферы, ведущим к воздействиям на климат [17,21–23]. Полученные ранее оценки показали, что радиационное возмущающее воздействие (РВВ) на климат, обусловленное аэрозолем, который возникает при сжигании биомассы, составляет около  $-1,0 \text{ Вт/м}^2$  (в случае чисто рассеивающего аэрозоля диапазон неопределенности оценок равен  $-0,3 \div -2,2 \text{ Вт/м}^2$ ) и, таким образом, сравнимо с РВВ за счет антропогенного сульфатного аэрозоля, а с другой стороны, – с имеющим противоположный знак «парниковым» РВВ (со времени начала промышленной революции последнее достигло  $2-3 \text{ Вт/м}^2$ ).

Образующиеся при сжигании биомассы частицы аэрозоля состоят главным образом из сконденсированных органических компонентов, из элементного или черного углерода, но также включают нитраты, сульфаты и другие компоненты. Хотя отношение концентрации черного углерода к концентрации органических жидких компонентов мало, важное обстоятельство состоит в наличии существенного поглощения солнечной радиации черным углеродом, что определяет потепляющее влияние на атмосферу (по-видимому, в пределах нескольких десятых  $\text{Вт/м}^2$ ) и может влиять на процесс конвекции.

Ввиду трудности получения достаточно надежных оценок влияния сажевого компонента аэрозоля С. Якобеллис и др. [16] сделали новые вычисления РВВ с учетом следующих семи источников аэрозоля: 1) сжигание

тропических лесов; 2) сжигание саванн; 3) сжигание лесов в умеренных широтах; 4) сжигание бореальных лесов; 5) сжигание древесного топлива; 6) сжигание сельскохозяйственных отходов; 7) производство и сжигание древесного угля. Данные таблицы характеризуют масштабы этих компонентов в различных регионах.

Расчеты РВВ с использованием различных методик параметризации переноса излучения и вычисленного поля содержания аэрозоля (среднегодовое среднелобальное значение содержания равно  $3 \cdot 10^{-3} \text{ г/м}^2$ ) привели к средним значениям РВВ в пределах от  $-0,6$  до  $-1,0 \text{ Вт/м}^2$  (погрешности расчетов определяются главным образом неопределенностями входных параметров). Важные обстоятельства заключаются в наличии взаимной компенсации систематических погрешностей за счет различных факторов, определяющих РВВ, а также в выводе о значительно более высокой эффективности воздействия аэрозоля, образовавшегося за счет сжигания биомассы, на интенсивность обратного рассеяния (по сравнению с сульфатным аэрозолем) в условиях облачного неба, что обусловлено главным образом меньшим зенитным расстоянием Солнца в тропических регионах, где сконцентрировано сжигание биомассы.

1. Andrea M.O., Andrea T.W., Annegarn H., Beer J., Cachier H., Canut P., Elbert W., Maenhaut W., Saima I., Wienhold F.G., Zenker T. Airborn studies of aerosol emissions from savanna fires in southern Africa. 2. Aerosol chemical composition // J. Geophys. Res. 1998. V. 103. N D24. P. 32119–32128.
2. Cautenet S., Poulet D., Delon C., Delmas R., Gregoire J.-M., Pereira J.M., Cherchali S., Amram O., Flouzat G. Simulation of carbon monoxide redistribution over Central Africa during biomass burning events (Experiment for Regional Sources and Sinks of Oxidants (EXPRESSO)) // J. Geophys. Res. 1999. V. 104. N D23. P. 30641–30657.
3. Delmas R.A., Druilhet A., Cros B., Durand P., Delon C., Lacaux J.M., Brustet J.M., Serca D., Affre C., Guenther A., Greenberg J., Baugh W., Harley P., Klinger L., Ginoux P., Brasseur G., Zimmerman P.R., Gregoire J.M., Janodet E., Tournier A., Perros P., Marion T., Gaidichet A., Cachier H., Ruellan S., Maslet P., Cautenet S., Poulet D., Bouka Biona C., Nganga D., Tathy J.P., Minga A., Loemba-Ndembi J., Ceccato P. Experiment for Regional Sources and Sinks of Oxidants

- (EXPRESSO): An overview // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D23. P. 30609–30624.
4. Dubovik O., Holben B.N., Kaufman Y.J., Yamasoe M., Smirnov A., Tanre D., Slutsker I. Single-scattering albedo of smoke retrieved from the sky radiance and solar transmittance measured from ground // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 31903–31924.
  5. Echalar F., Artaxo P., Martins J.V., Yamasoe M., Gerab F., Maenhaut W., Holben B. Long-term monitoring of atmospheric aerosol in the Amazon Basin: Source identification and apportionment // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 31849–31864.
  6. Fenn M.A., Browell E.V., Butler C.F., Grant W.B., Kooi S.A., Clayton M.B., Gregory G.L., Newell R.E., Zhu Y., Dibb J.E., Flueberg H.E., Anderson B.E., Bandy A.R., Blake D.R., Bradshaw J.D., Heikes B.G., Sachse G.W., Sandholm S.T., Singh H.B., Talbot R., Thornton D.C. Ozone and aerosol distribution and air mass characteristics over the South Pacific during the burning season // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D13. P. 16197–16212.
  7. Ferek R.J., Reid J.S., Hobbs P.V., Blake D.R., Liousse C. Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases and particles from biomass burning in Brazil // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 32107–32118.
  8. Gleason J.F., Hsu N.C., Torres O. Biomass burning smoke measured using backscattered ultraviolet radiation: SCAR-B and Brazilian smoke interannual variability // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 31969–31978.
  9. Goode J.G., Yokelson R.J., Sussott R.A., Ward D.E. Trace gas emissions from laboratory biomass fires measured by open-path Fourier transform infrared spectroscopy: Fires in grass and surface fuels // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D17. P. 21237–21246.
  10. Gorshkov V.G., Gorshkov V.V., Makarieva M. Biotic Regulation of the Environment. Key Issues of Global Change. Springer/PRAXIS. Chichester, U.K., 2000. 364 p.
  11. Greenberg J.P., Guenther A.B., Madronich S., Baugh W., Ginoux P., Druilhet A., Delmas R., Madon C. Biogenic volatile organic compound emission in central Africa during the Experiment for Regional Sources and Sinks of Oxidants (EXPRESSO) biomass burning season // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D23. P. 30659–30671.
  12. Guenther A., Baugh B., Brasseur G., Greenberg J., Harley P., Klinger L., Serca D., Vierling L. Isoprene emission estimates and uncertainties for the Central African EXPRESSO study domain // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D23. P. 30625–30639.
  13. Guild L.S., Kauffman J.B., Ellingson L.J., Cummings D.L., Castro E.A., Babbitt R.E., Ward D.E. Dynamics associated with total aboveground biomass, C, nutrient pools, and biomass burning of primary forest and pasture in Rondonia, Brazil during SCAR-B // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 32091–32100.
  14. Hoffa E.A., Ward D.E., Hao W.M., Susott R.A., Wakimoto R.H. Seasonality of carbon emissions from biomass burning in a Zambian savanna // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D11. P. 13841–13853.
  15. Holdsworth G., Higuchi K., Zielinski G.A., Mayewski P.A., Wahlen M., Deck B., Chylek P., Jonson B., Damiano P. Historical biomass burning: Late 19<sup>th</sup> century pioneer agriculture in northern hemisphere ice core data and its atmospheric interpretation // *J. Geophys. Res.* 1996. V. 101. N D18. P. 23317–23334.
  16. Iacobellis S.F., Frouin R., Somerville R.C.J. Direct climate forcing by biomass-burning aerosols: Impact of correlations between controlling variables // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D10. P. 12031–12045.
  17. Isidorov V.A. Organic Chemistry of the Earth's Atmosphere. Berlin; Heidelberg e.a.: Springer Verlag, 1990. 218 p.
  18. Jaffrezo J.-L., Davidson C.I., Kuhns H.D., Bergin M.H., Hilmamo R., Maenhaut W., Kahl J.W., Harris J.M. Biomass burning signatures in the atmosphere of central Greenland // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 103. N D23. P. 31607–31078/
  19. Kaufman Y.J., Justice C.O., Flynn L.P., Kendall J.D., Prins E.M., Giglio L., Ward D.E., Menzel W.P., Setzer A.W. Potential global fire monitoring from EOS-MODIS // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 32215–32238.
  20. King M.D., Tsay S.-C., Ackerman S.A., Larsen N.F. Discriminating heavy aerosol, clouds, and fires during SCAR-B: Application of airborne multispectral MAS data // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 31989–32000.
  21. Kondratyev K.Ya. Multidimensional Global Change. Chichester: Wiley/PRAXIS. 1998. 761 p.
  22. Kondratyev K.Ya. Climatic Effects of Aerosols and Clouds: Springer/PRAXIS, Chichester, U.K. 1999. 264 p.
  23. Kondratyev K.Ya., Varotsos C.A. Atmospheric Ozone Variability: Implications for Climate Change, Human Health, and Ecosystems. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K. 2000. 716 p.
  - 23a. Liu X., Espen P.V., Adams F., Cafmeyer J., Maenhaut W. Biomass burning in southern Africa: Individual particle characterization of atmospheric aerosols and savanna fire sample // *J. Atmos. Chem.* 2000. V. 36. N 2. P. 135–155.
  24. Lobert J.M., Keene W.C., Logan J.A., Yevich R. Global Chlorine emissions from biomass burning: Reactive chlorine emissions inventory // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D7. P. 8373–8390.
  - 24a. Longo K.M., Thompson A.M., Kirchhoff V.W.J.H., Rewer L.A., de Freitas S.R., Dias M.A.F.S., Artaxo P., Hart W., Spinhirne J.D., Yamasoe M.A. Correlation between smoke and tropospheric ozone concentration in Cuiaba' during Smoke, Clouds, and Radiation – Brazil (SCAR-B) // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D10. P. 12113–12122.
  25. Martins J.V., Artaxo P., Liousse C., Reid J.S., Hobbs P.V., Kaufman Y.J. Effects of black carbon content, particle size, and mixing on light absorption by aerosols from biomass burning in Brazil // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 32041–32050.
  26. Martins J.V., Hobbs P.V., Weiss R.E., Artaxo P. Sphericity and morphology of smoke particles from biomass burning in Brazil // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 32051–32058.
  27. Nielsen T.T. Characterization of fire regimes in the Experiment for Regional Sources and Sinks of Oxidants (EXPRESSO) study area // *J. Geophys. Res.* V. 104. N D23. P. 30713–30723.
  28. Novelli P.C., Lang P.M., Masarie K.A., Hurst D.F., Myers R., Elkins J.W. Molecular hydrogen in the troposphere: Global distribution and budget // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D23. P. 30427–30444.
  29. Poppe D., Koppmann R., Rudolph J. Ozone formation in biomass burning plumes: Influence of atmospheric dilution // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. N 20. P. 3823–3826.
  30. Prins E.M., Feltz J.M., Menzel W.P., Ward D.E. An Overview of GOES-8 diurnal fire and smoke results for SCAR-B and 1995 fire season in South America // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 31821–31836.
  31. Reid J.S., Hobbs P.V. Physical and optical properties of young smoke from individual biomass fires in Brazil // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 32013–32030.
  32. Reid J.C., Hobbs P.V., Liousse C., Martins J.V., Weiss R.E., Eck T.F. Comparison of techniques for measuring shortwave absorption and carbon content of aerosols from biomass burning in Brazil // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 32031–32040.
  33. Remer L.A., Kaufman Y.J., Holben B.N., Thomson A.M., McNamara D. Biomass burning aerosol size distribution and modeled optical properties // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 31879–31892.
  34. Ross J.I., Hobbs P.V., Holben B.N. Radiative characteristics of regional hazes dominated by smoke from biomass burning in Brazil: Closure tests and direct radiative forcing // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 31925–31942.
  35. Ruellan S., Cachier H., Gaudichet A., Maslet P., Lacaux J.-P. Airborne aerosols over central Africa during the Experiment for Regional Sources and Sinks of Oxidants (EXPRESSO) // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D23. P. 30673–30690.
  36. Talbot R.W., Dibb J.E., Scheuter E.M., Blake D.R., N.J., Gregory G.L., Sachse G.W., Bradshaw J.D., Sandholm S.T., Singh H.B. Influence of biomass combustion emissions on the distribution of acidic trace gases over the Southern Pacific basin during austral springtime // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D5. P. 5623–5634.



37. *Trosnikov I.V., Nobre C.A.* Estimation of aerosol transport from biomass burning areas during the SCAR-B experiment // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 32129–32138.
38. *Weitz A.M., Keller M., Crill P.M.* Spatial and temporal variability of nitrogen oxide and methane fluxes from a fertilized tree plantation in Costa Rica // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D23. P. 30097–30107.
39. *Williams J., Wang N.-Y., Cicerone R.J.* Methyl bromide emissions from agricultural field fumigations in California // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D23. P. 30087–30096.
40. *Yamasoe M.A., Kaufman Y.I., Dubovik O., Remer L.A., Holben B.N., Artaxo P.* Retrieval of the real part of the refractive index of smoke particles from Sun/sky measurements during SCAR-B // *J. Geophys. Res.* 1998. V. 103. N D24. P. 31893–31902.
41. *Yokelson R.J., Goode J.C., Ward D.E., Susott R.A., Babbitt R.E., Wade D.D., Bertschi I., Griffith D.W.T., Hao W.M.* Emissions of formaldehyde, acetic acid, methanol, and other trace gases from biomass fires in North Carolina measured by airborne Fourier transform infrared spectroscopy // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D23. P. 30109–30125.
42. *Ziemke J.R., Chandra S.* Seasonal and interannual variabilities in tropical tropospheric ozone // *J. Geophys. Res.* 1999. V. 104. N D17. P. 21425–21442.

*K.Ya. Kondratyev and V.A. Isidorov.* **Effect of biomass burning on chemical composition of the atmosphere.**

In the framework of the problem of biogenic emissions into the atmosphere, we analyze the data on effect of biomass burning on chemical composition of the global atmosphere and gas-phase reactions of the atmospheric aerosol formation. The emphasis is on the impact of the biomass burning (forest, shrub, and grass fires) in the tropics (Africa and South America), and, to a lesser degree, on mid-latitude forest fires. Separately, the influence of the biomass burning on the tropospheric ozone dynamics is considered. The impact of the factors under study on the global climate is also briefly outlined.