

К.Я. Кондратьев<sup>1</sup>, Ал.А. Григорьев<sup>2</sup>

## Лесные пожары как компонент природной экодинамики

<sup>1</sup> *Центр экологической безопасности РАН / Нансеновский фонд окружающей среды и дистанционного зондирования, г. С.-Петербург*

<sup>2</sup> *Санкт-Петербургский университет*

Поступила в редакцию 12.02.2004 г.

Обзор проблематики лесных пожаров (имеющих главным образом природное происхождение) содержит анализ не только условий и масштабов лесных пожаров, но и их воздействий на окружающую среду, проявляющихся в изменении как свойств подстилающей поверхности и процессов на уровне поверхности, так и изменений химического состава атмосферы. Особое внимание уделено проблеме влияния лесных пожаров на формирование круговорота углерода, а также роли пожаров как фактора динамики окружающей среды.

### Введение

Регулярно возникающие в различных регионах земного шара лесные пожары привлекают к себе внимание как природные бедствия, приносящие серьезный экономический ущерб [1–52]. Проблема стала еще более острой по мере возрастания масштабов сжигания биомассы в низких широтах. Несомненно недооценивается роль природно обусловленных лесных пожаров как фактора динамики экосистем. Отмеченные обстоятельства побудили уже на ранней стадии развития методов дистанционного зондирования окружающей среды начать разработку сначала самолетных, а затем спутниковых методик мониторинга лесных пожаров [5, 6]. Имея в виду, что проблематика лесных пожаров достаточно детально обсуждалась в недавних монографиях [3, 32], мы обсудили в этом обзоре лишь результаты соответствующих новейших разработок.

Лесные пожары являются не только бедствием для населения, но и важным фактором локальной, региональной и даже глобальной экодинамики, что проявляется, например, в обусловленных пожарами выбросах в атмосферу парниковых газов и аэрозоля. Согласно имеющимся оценкам около 30% тропосферного озона, окиси углерода и углекислого газа, содержащихся в атмосфере, обусловлено вкладом лесных пожаров. Связанные с лесными пожарами выбросы аэрозоля в атмосферу могут оказывать существенное влияние на микрофизические и оптические характеристики облачного покрова (и, следовательно, на климат). Спутниковые наблюдения, относящиеся к Индонезии, продемонстрировали, например, что наличие связанных с продолжительными пожарами дымов в атмосфере привело к подавлению осадков, что способствовало дальнейшему развитию пожаров. В этом контексте Ji и Stocker [25] выполнили статистическую обработку данных спутника TRMM для измерений осадков в тропиках, а также данных аппаратуры TOMS (спектрометра для картирования общего со-

держания озона) об аэрозольном индексе (АИ) за период с января 1998 г. по декабрь 2001 г. с целью анализа закономерностей годового хода, внутрисезонной и межгодовой изменчивости числа лесных пожаров на суше в глобальных масштабах. В течение рассматриваемого периода имел место очень четко выраженный годовой ход пожаров в Юго-Восточной Азии с максимумом в марте, а в Африке, и также в Северной и Южной Америке – в августе. Анализ данных наблюдений обнаружил также существование межгодовой изменчивости лесных пожаров в Индонезии и Центральной Америке, коррелирующей с циклом Эль Ниньо/Южное колебание (ЭНЮК) в 1998–1999 гг.

Выявляется отчетливая корреляционная связь между изменчивостью содержания аэрозоля в глобальной атмосфере и упомянутыми вариациями частоты и интенсивности лесных пожаров. Исключение составляет регион Юго-Западной Австралии, где интенсивные пожары, зарегистрированные по данным TRMM, не сопровождалась формированием слоев дыма (по данным TOMS). Если исключить Австралийский регион, то коэффициент корреляции между числом пожаров и АИ (по данным TOMS) составляет 0,55. Статистический анализ данных путем расчета эмпирических ортогональных функций (ЭОФ) обнаружил наличие контраста между северным и южным полушариями, а также существование межконтинентального переноса аэрозоля, возникшего в результате пожаров в Африке и Америке. Данные статистического анализа указывают на присутствие 25–60-суточных внутрисезонных вариаций, налагающихся на годовой ход числа пожаров и содержания аэрозоля. Обнаружено сходство внутрисезонной изменчивости числа пожаров и динамики осцилляции Джулиана–Маддена.

### 1. Малые газовые компоненты

В контексте исследований роли лесных пожаров как фактора воздействия на окружающую среду

большое внимание уделялось мониторингу выбросов в атмосферу различных химически и оптически активных малых газовых компонентов (МГК) в процессе пожаров.

В 1998 г. произошло выгорание бореальных лесов на обширных территориях России и Северной Америки [26]. Согласно данным официальной статистики, пожары охватили территорию площадью около 4,8 млн га в бореальных лесах Северной Америки (Канада и США) и 2,1 млн га в России (обработка данных спутниковых наблюдений показала, что масштабы пожаров в России могли быть гораздо более значительными при охваченной пожарами территории в пределах 9,5–11,5 млн га). Сгорание биомассы, происходящее в бореальных лесах летом в условиях сухой погоды, обуславливает выбросы в атмосферу больших количеств химически и оптически активных малых газовых компонентов, оказывающих значительное (и специфическое) влияние на химические процессы и перенос излучения в атмосфере.

Полученные ранее результаты показали, что глобальные выбросы МГК при сжигании биомассы достигают 3800–4300 ТгС/год при очень небольшом вкладе за счет пожаров в бореальных лесах (23 ТгС/год, или 0,6%). Однако оценки подобного вклада весьма противоречивы. Так, например, для выбросов окиси углерода за счет лесных пожаров в области широт больше 30° с. ш. были получены значения, равные 50 ТгС/год (~6% от глобальных выбросов) и 121 ТгС/год. Оценки выбросов метана дали значение 0,9 ТгС/год (~3% по отношению к глобальным выбросам метана за счет сжигания биомассы).

Kasischke и Bruhwiler [26] выполнили анализ данных наблюдений обусловленных лесными пожарами в Северной Америке и России в 1998 г. повреждений бореальных лесов в пяти различных регионах для оценки выбросов в атмосферу углерода за счет CO<sub>2</sub>, CO и CH<sub>4</sub>. С этой целью были рассмотрены различные категории и уровни биомассы в рассматриваемых пяти регионах (включая болота на Дальнем Востоке России и степи в Сибири) и различные пропорции потребленного в процессе пожаров углерода. Заданы, кроме того, два различных соотношения вкладов горения и тления.

Обусловленные пожарами в бореальных лесах в 1998 г. выбросы МГК в атмосферу составили 290–383 Тг (общий углерод), 828–1105 (CO<sub>2</sub>), 88–128 (CO) и 2,9–4,7 Тг (CH<sub>4</sub>). Верхний предел указанных значений соответствует 8,9% суммарных глобальных выбросов углерода за счет сжигания биомассы; 13,8% глобальных выбросов CO, обусловленных лесными пожарами, и 12,4% глобальных выбросов метана за счет пожаров. Вклад лесных пожаров в России составил 78% по отношению к суммарным выбросам (19% приходится на долю Северной Америки). Принятие различных предположений относительно соотношения между ролью процессов горения и тления вызвало лишь небольшие изменения в оценках выбросов (< 4%), хотя в двух случаях эти изменения оказались несколько

более значительными (6 и 12%). Вклад торфяных пожаров на Дальнем Востоке России в поступление углерода в атмосферу осенью 1998 г. составлял до 40 Тг. Совместные выбросы CO, обусловленные лесными и болотными пожарами, имеют тот же уровень, что и аномально высокие выбросы, наблюдавшиеся в Пойнт Барроу (Аляска). Специального внимания заслуживает косвенное воздействие лесных пожаров на почвенное дыхание в высоких широтах, где существуют богатые углеродом почвы в зонах вечной мерзлоты. Обусловленное пожарами потепление почвы должно усилить процессы дыхания и, тем самым, способствовать интенсификации выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу на протяжении интервала времени до 10 лет после пожара.

## 2. Статистические данные о лесных пожарах

Пожары были доминирующим фактором воздействия на канадские леса, начиная с последнего ледникового периода. Для гигантских канадских лесов пожары определяли процессы, которые имели критически важное значение для самого существования таких видов первичной лесной растительности, как сосна, ель и осина, и являлись важным фактором разнообразия лесных ландшафтов, оказывая влияние на энергообмен и биогеохимические круговороты. Физиогномия канадских лесов тесно связана с режимом пожаров и требует существования периодических мощных пожаров, обуславливающих замену древостоя. Режим лесных пожаров определяется их повторяемостью, масштабами, интенсивностью, сезонностью, типом. Частота пожаров в канадских лесах влияет на динамику режима жизненных циклов леса. Масштабы пожаров определяют пространственную неоднородность («пятнистость») древостоя, а также влияют на величину эффективных расстояний регенерации. Очень изменчивая (в зависимости от типов и массы древесины, топографии и метеорологических условий) интенсивность пожаров характеризует выделяемую в ходе пожаров энергию. Время года, когда происходит пожар, является ключевым фактором послепожарной сукцессионной эволюции, воздействуя на интенсивность пожара, на послепожарную структуру экосистем и ландшафтов. Тип пожара характеризуется участием в горении различных компонентов древостоя и подстилки, а также зависит от метеорологических условий. Мерой интенсивности пожара служит степень потребления древесины и органики поверхностного слоя почвы в ходе пожара.

Stocks и др. [44] обсудили результаты разработки с целью документирования данных о лесных пожарах, имея в виду обоснование большой базы данных о пожарах (LFDB), которая должна включать информацию о местоположении и масштабах пожара, его причинах и усилиях по подавлению пожара с учетом всех пожаров на площадях более 200 га в Канаде за период 1959–1997 гг. База данных LFDB включает только 3,1% всех лесных пожаров, возникших в Канаде за указанный период.

Что касается остальных 96,9% пожаров, то они были подавлены, будучи в размерах меньше 200 га. Подобные пожары охватывают около 97% площади лесов, подвергшихся пожарам, и представляют большой интерес с точки зрения анализа воздействия лесных пожаров на экосистемы.

Связанное с лесными пожарами возгорание происходит в Канаде ежегодно на площади около 2 млн га, но иногда она достигает 7 млн га. Экозоны тайги и бореальных регионов испытали наиболее значительное воздействие лесных пожаров: ежегодно происходило выгорание примерно 0,7% залесенной территории. В условиях Северной Канады доминирующей причиной пожаров были молниевые разряды, ответственные за 80% пожаров, учитываемых в LFDB. Хотя число больших пожаров сравнительно невелико, они вносят существенный вклад в выгорание леса, особенно в условиях тайги и бореальных регионов. Сезон лесных пожаров в Канаде охватывает период с апреля по август при наиболее значительном поражении лесов, обусловленном молниями в Северной Канаде, в июне и июле. Около 50% территорий в Канаде, подвергшейся пожарам, не были документированы в удовлетворительной степени из-за их удаленности. База данных LFDB обновляется поэтому ежегодно и пополняется ретроспективными данными для оценки долговременных трендов.

Глобальное потепление климата привлекло внимание к возможному изменению режима молний на земном шаре как фактора пожароопасности. Согласно имевшимся ранее данным, в любой момент на Земле существует, в среднем, 1800 гроз, каждая из которых сопровождается 200 молниевыми вспышками в час (или 3,3 вспышки/мин). Средняя глобальная частота вспышек составляет 100 вспышек/с (обработка данных различных спутниковых наблюдений привела к оценкам в пределах 22–65 вспышек/с).

Christian и др. [14] обсудили результаты наблюдений молниевых вспышек, которые были сделаны при помощи малоинерционного оптического датчика (ОТД), установленного на спутнике Microlab-1 (выведен в апреле 1995 г. на орбиту с углом наклона 70°). В течение года рассматриваемые спутниковые наблюдения позволяют располагать данными для каждой точки большей части земного шара более чем 400 раз при продолжительности каждого наблюдения, равной 2 мин. Аппаратура ОТД обеспечивает получение информации о молниевых вспышках в пределах поля зрения 1300 × 1300 км как днем, так и ночью.

Статистическая обработка данных показала, что ежегодно на Земле возникает около 1,4 млрд вспышек, что соответствует  $(44 \pm 5)$  молниевым вспышкам/с (как внутриоблачным, так и между облаками и земной поверхностью). Таким образом, новые оценки дали значение, которое существенно ниже предложенного ранее (100 вспышек/с). Использование данных ОТД позволило построить глобальные карты частоты молниевых разрядов в разное время года. Анализ этих карт показал, что

молнии возникают преимущественно над сушей, а среднее соотношение между их числом над сушей и над океаном составляет примерно 10:1. На долю полосы широт 30° с. ш. — 70° ю. ш. приходится около 78% молний. Наиболее интенсивен круглогодичный режим молниевых разрядов в бассейне р. Конго, где средняя частота вспышек достигает (в Руанде) 80 вспышек/(км<sup>2</sup> · год), что соответствует условиям центральной части штата Флорида (США). Круглогодичный интенсивный режим молниевых вспышек характерен для северной части Атлантического океана и западного региона Тихого океана, где возникает неустойчивая атмосфера под воздействием адвекции холодного воздуха над теплой поверхностью океана. Менее часто случаются молнии в восточной части тропиков Тихого океана и в Индийском океане, где атмосфера является более теплой. Максимум частоты молний в северном полушарии приходится на лето, тогда как в тропиках имеет место полугодовой цикл молний.

### 3. Лесные пожары на Аляске

Очень содержательная программа исследований лесных пожаров и их роли в динамике экосистем была выполнена в регионе Аляски.

Реакция бореальных экосистем на возможное в будущем потепление климата существенно определяется зависимостью динамики лесных пожаров и растительного покрова от климатических условий. Частота пожаров является важным фактором, определяющим эволюцию высокоширотных лесов на уровне экосистем. Анализ данных метеорологических наблюдений выявил наличие отчетливой связи между условиями погоды (например, температурой воздуха и осадками), частотой и интенсивностью лесных пожаров. Следствием современного глобального потепления климата было усиление интенсивности и продолжительности пожаров.

С целью ретроспективного исследования пространственно-временной изменчивости пожаров в бореальных лесах на п-ве Кенаи и в центральном регионе Аляски выполнен анализ образцов древесного угля и пыльцы для оценки условий лесных пожаров [36]. Этот анализ показал, что за последние 1000 лет аккумуляция древесного угля в обоих рассматриваемых регионах была небольшой при несколько более высоком уровне в центре Аляски. Исключением оказался период постевропейских поселений на п-ве Кенаи, где произошло возрастание аккумуляции угля в 10 раз, что отображает вероятное увеличение числа пожаров антропогенного происхождения.

Данные за период голоцена о древесном угле и пыльце, относящиеся к оз. Дьон (центральный регион Аляски), указывают на низкую повторяемость пожаров в период 9000–5500 гг. (до настоящего времени — ДНВ) в случае сообществ березы — белой ели — ольхи (*Betula* — *Picea glauca* — *Alnus*), но высокую повторяемость для черной ели (*Picea mariana*) после того, как она стала доминировать позднее 5500 г. ДНВ. По-видимому, усиление

пожаров произошло в результате перехода к менее устойчивым к возгоранию лесам из черной ели. За последние 5500 лет имели место два четко различающихся режима лесных пожаров. Период 500–2400 гг. ДНВ характеризовался частыми пожарами при интервале возвращения пожаров, равном 98 годам. Гораздо меньшее число пожаров (при времени возвращения, составляющем 198 лет) было типично для периода позднее 2200 г. ДНВ. К числу важных факторов природно обусловленной динамики лесных пожаров принадлежали аккумуляция древесной массы, структура и видовой состав древостоя.

Почвы бореальных лесных экосистем принадлежат к числу экосистем, обладающих наиболее высокой плотностью углерода и содержат около одной четверти – одной трети всего почвенного углерода (200–7500 ГтС). В течение последних 15000 лет наличие низкой температуры зимой, годового дефицита влаги и постоянно замерзших почв ограничивало скорость разложения органики, что обусловило накопление органического вещества на подстиляющей поверхности лесов. В центральной (внутренней) части Аляски наиболее высокая скорость накопления углерода связана с древостоем черной ели, характерными особенностями которой является низкая продуктивность и замедленная скорость круговоротов биогенов. Сочетание низкой температуры, насыщенных влагой поверхностных горизонтов почвы и низкого качества подстилки приводит к ограничению разложения органического вещества, содержащегося в подстилке и мхе, что определяет интенсивное накопление углерода и биогенов в слоях органики. Скорость запасаения углерода в зрелой черной ели бореальных лесов Канады достигает 0,1–0,3 млн гС/(га · год).

Северные почвы в лесах и болотах могут накапливать углерода примерно 0,70 ГтС/год. Для северных ландшафтов на уровне экосистем одним из главных факторов, регулирующих запасаение и выбросы углерода, являются лесные пожары. В дополнение к непосредственным выбросам углерода в ходе сгорания послепожарные изменения температуры и влажности почвы, а также химических процессов являются потенциальными факторами ускорения разложения органики в послепожарный период, в результате чего возникают выбросы большого количества запасаенного углерода в атмосферу. Поскольку немедленного сбалансирования подобных потерь посредством усвоения углерода при образовании первичной продукции не происходит, возросшая скорость разложения обуславливает потерю углерода экосистемами в течение первого года после пожара. Однако на протяжении более длительных интервалов времени мобилизация почвенных биогенов за счет таяния вечной мерзлоты, осадения пепла, а также изменений теплового и водного режимов почвы может обеспечить более благоприятные условия для роста растений, возрастания суммарной первичной продукции (NPP) и поступления углерода к почве.

В конечном счете экологическое значение потерь углерода в процессах горения и послепожар-

ного разложения органики зависит от масштабов времени, в течение которого сообщества растительности восстанавливаются после разрушения. Спустя годы и десятилетия после пожара происходит сбалансирование потерь и поступления углерода. На протяжении тысячелетий северные почвы достигают состояния динамического равновесия по отношению к воздействиям лесных пожаров.

На основе рассмотрения 140-летней последовательности эволюции подвергавшегося воздействию пожаров древостоя черной ели авторы [39] получили оценки времени, в течение которого функционирует возмущающее воздействие. В зависимости от возраста древостоя поток CO<sub>2</sub> в атмосферу устремлялся со средней скоростью 0,12–22 млн гС/год. За то же время в горизонтах органической почвы происходило запасаение углерода и азота со скоростью в пределах 0,28–0,54 млн гС/(га · год) и 0,0076 млн гN/(га · год). Модельное рассмотрение баланса массы показало, что послепожарные изменения дыхания за счет корней и микробов определяют функционирование почв как источника углерода в течение 7–15 лет после пожаров при уровнях выбросов в атмосферу от 1,8 до 11,0 млн гС/га (это составляет 12,4–12,6% суммарного количества органического вещества почвы). Эти оценки определяют значения потерь углерода того же порядка величины, что и в период сгорания, и свидетельствуют о том, что существующие модели могут занижать влияние лесных пожаров на выбросы углерода примерно в два раза.

Высокоширотные экосистемы занимают 22% поверхности суши и содержат около 40% глобального почвенного углерода, содержание которого должно быть чувствительным к изменениям климата. Среди всех биомов Земли самым крупным резервуаром углерода являются бореальные леса, большую часть которых «подстиляет» вечная мерзлота, динамика которой определяется циклами деградации (образования термокарста) и аградации. Эти циклы находятся в тесной связи с лесными пожарами, которые представляют собой главное возмущающее воздействие для бореальных лесов. Обусловленное пожарами таяние вечной мерзлоты приводит к существенным изменениям режима температуры и влажности почвы и, соответственно, – к изменениям почвенного резервуара углерода в экосистемах бореальных лесов.

В течение 1960-х гг. воздействие пожаров на бореальные леса было более значительным, чем ранее. За последние 20 лет площадь выгоревших бореальных лесов на севере Канады возросла примерно в два раза. Одновременно произошло повышение температуры подстиляющей поверхности в бореальных и арктических регионах Аляски за прошедшее столетие в пределах 2–4 °С (в том числе – на 1–2 °С за последние десятилетия). Потепление климата, происшедшее на Аляске за последние десятилетия, является составной частью потепления, наблюдавшегося на всем северо-западе Северной Америки. В настоящее время на Аляске имеет место также прогревание вечной мерзлоты.

Некоторые данные указывают на то, что причиной тренда потепления климата в Северной Америке могли быть природно обусловленные лесные пожары, хотя существует, конечно, и обратная зависимость режима лесных пожаров от климатических условий. Оценки показали, что глобальное потепление климата, которое может возникнуть при удвоении концентрации  $\text{CO}_2$ , способно привести к возрастанию площади выгоревших boreальных лесов на 40%. В свою очередь изменение режима пожаров в boreальных лесах влияет на формирование глобального круговорота углерода, изменяя пространственную структуру и режим функционирования boreальных экосистем. Для оценки влияния обусловленных лесными пожарами возмущающих воздействий на круговорот углерода необходимо использование крупномасштабных моделей биосферы суши с учетом процессов, определяющих режим температуры и влажности почвы, а также гидрологическую и биогеохимическую динамику экосистем boreальных лесов.

Zhang и др. [52] описали и применили подобную модель, способную воспроизводить упомянутые и другие процессы с целью анализа зависимости бюджетов углерода boreальных лесов от изменений концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере, характеристик климата и лесных пожаров. Способность модели адекватно воспроизводить главные закономерности формирования первичной продукции и дыхание экосистем была проверена путем сравнения с данными наблюдений для экосистемы зрелой черной ели в Канаде, а рассчитанное изменение со временем содержания углерода в растительности — с данными инвентаризации роста лесов из черной ели на Аляске.

Рассматриваемая модель использована для воспроизведения последовательности изменения окружающей среды после пожара в центральной части Аляски. Сравнение с результатами измерений температуры показало, что модель адекватно воспроизводит среднемесячную температуру почвы на глубине 10 см в течение всего сезона вегетации (с мая до октября) 1997 г. (коэффициент корреляции  $R > 0,93$ ) как на контрольном, так и на поврежденном пожаром участках. Высокая корреляция ( $R = 0,84$  и  $0,74$  для контрольного и поврежденного участков соответственно) имеет место и для данных о дыхании почвы. Хорошо коррелируют рассчитанные изменения со временем температуры и содержания углерода в почве в масштабах времени от десятилетия до столетия (коэффициент корреляции  $R = 0,93$  и  $0,71$  для температуры почвы на глубине 20 и 100 см;  $R = 0,95$  и  $0,91$  для дыхания почвы и содержания углерода соответственно). Численное моделирование показало, что заметное влияние на чувствительность динамики углерода к возмущающим воздействиям оказывают и некоторые другие факторы, кроме упомянутых. К числу подобных факторов принадлежат фиксация азота, рост мха, изменения глубины слоя органики, дренаж почвы и интенсивность лесных пожаров.

На долю boreальных лесов приходится около одной трети углерода всех континентальных экосистем. При этом высокоширотные экосистемы особенно чувствительны к изменениям климата, которые могут быть обусловлены вариациями огромных резервуаров углерода, заключенных в почвах северных широт, важная особенность которых состоит в наличии вечной мерзлоты. Северные boreальные леса, составляющие около 35% всех лесов земного шара, содержат примерно 66% глобального резервуара почвенного углерода. Поскольку boreальные леса поглощают углекислый газ, находящийся в атмосфере, и характеризуются медленным разложением подложки, они функционируют как стоки углерода. Главным возмущающим воздействием для boreальных лесов являются пожары, возникновение которых существенно зависит от условий климата. Поэтому изменения климата влекут за собой изменения режима лесных пожаров.

В условиях пожаров в атмосферу выбрасывается значительное количество  $\text{CO}_2$  и других малых газовых компонентов, включая парниковые газы (ПГ). Таким образом, регионы лесных пожаров оказываются источниками углерода. С целью анализа влияния лесных пожаров на выбросы и резервуары ПГ на территории исследовательской станции Caribou-Poker Creek Research (CPCRW), расположенной в центральной части Аляски, в течение летних сезонов 1998, 1999 и 2000 гг. были выполнены измерения потоков  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  до и после лесных пожаров. На типичном участке boreального леса осуществлены специальные эксперименты по горению леса в рамках программы FROSTFIRE в период 2–15 июля 1999 г. Анализ полученных результатов показал, что следствием лесных пожаров было уменьшение выбросов  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2\text{O}$  почвами, достигавшее 50% [27]. Поток  $\text{CH}_4$ , напротив, возрастал в пределах 7–142%, что отображало ту роль, которую лесные пожары играют в ускорении таяния замерзшей почвы и в последующем выбросе метана вечной мерзлотой. После пожара в почве происходило окисление большей части  $\text{CH}_4$ , но некоторая часть  $\text{CH}_4$  выбрасывалась почвой в атмосферу, когда происходило максимальное таяние вечной мерзлоты в августе 1999 г. и в сентябре 2000 г.

Высокой экспоненциальной корреляцией характеризуется соотношение между потоками МГК и температурой почвы до и после пожара, что свидетельствует о важной роли температуры почвы как фактора, определяющего потоки МГК от почв boreальных лесов. Помимо этого, повышение температуры почвы после пожара может обуславливать усиление диффузии  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{N}_2\text{O}$  между лесными почвами и атмосферой за счет интенсификации микробной активности, а также возрастание потоков МГК в почвах на участках сгоревшей черной ели.

Для оценки влияния подстилки из мха и лишайника на древостой черной ели Kim и Tanaka [27] сделали измерения их суммарного дыхания в лабораторной камере при наличии и без освещения.

Измеренное суммарное дыхание для условий после пожара составляет 42–58% по отношению к дыханию до пожара. Поэтому обусловленное мхом и лишайником суммарное дыхание ответственно примерно за половину суммарных выбросов CO<sub>2</sub> почвами. Максимальный уровень потока углерода за счет дыхания, обусловленного покровом мха и лишайника на поверхности в еловом лесу центральной Аляски, достигал (0,018 ± 0,009) ГтС/год, т.е. был существенным источником CO<sub>2</sub> для атмосферы в бореальных лесах. Дыхание почвы после искусственного пожара можно объяснить только вкладом за счет корней и микробов. Оценки микробного дыхания после пожара привели к значениям, которые почти в три раза превосходят рассчитанные для условий до пожара. Подобный результат свидетельствует о том, что послепожарные условия могут стимулировать микробное дыхание за счет более высокой концентрации биогенов и субстрата в остающихся почвах, а также в результате повышения температуры почвы. Величина микробного дыхания на участках сгоревшей черной ели может быть оценена в 14,7 тС/га на протяжении 10 лет после пожара. Это указывает на то, что микробное дыхание на участках сгоревшего елового леса в центральной части Аляски является главным источником поступления CO<sub>2</sub> из почвы в атмосферу.

Бореальные леса представляют собой второй по важности биом на Земле, что определяет их ключевую роль в формировании динамики глобальной окружающей среды, в том числе климата. На основе численного моделирования ранее было проанализировано воздействие на климат изменений протяженности бореальных лесов, обусловленных потеплением климата в высоких широтах, без учета изменений пространственной структуры энергообмена в экосистемах бореальных лесов. Как показали многие разработки, потепление климата ведет к повышению вероятности лесных пожаров. В этой связи не были изучены климатические последствия обусловленных пожарами изменений характеристик поверхности суши. Между тем пожары вызывают изменения различных характеристик экосистем, которые могут существенно влиять на энергообмен между подстилающей поверхностью и атмосферой. Происходит, например, спад альбедо поверхности, а потеря растительности ведет к уменьшению эвакотранспирации. Оба эти изменения обуславливают возрастание температуры поверхности и потока явного тепла (турбулентного теплообмена). Следствием потери деревьев оказывается уменьшение шероховатости подстилающей поверхности, а результатом повышения температуры — рост теплового излучения поверхности.

В связи с отмеченными обстоятельствами Chambers и Chapin [12] осуществили градиентные микрометеорологические наблюдения (при помощи установленной на мачтах аппаратуры) летом, при отсутствии осадков, на шести участках выгоревшего леса (черной ели), где с момента пожара прошло от 0 до 14 лет. Обработка полученных данных показала, что в результате пожара минимальное альбедо

первоначально уменьшалось с 0,09 до 0,06, затем наступал быстрый его рост до 0,135, обусловленный сукцессионным развитием растительности. В условиях ясного неба в околополуденные часы повышение температуры подстилающей поверхности и изменение структуры древостоя обуславливают уменьшение радиационного баланса поверхности примерно на 9,3% (около 70 Вт/м<sup>2</sup>) в течение первых 10 лет после начала сукцессии. Спад среднесуточного радиационного баланса составлял 5,5%. В околополуденное время поток тепла в почву удваивался по сравнению с измеренным на соседнем неповрежденном пожаром участке леса, хотя среднесуточное возрастание было существенным только в течение первых нескольких лет после пожара.

Вызванное лесным пожаром уменьшение радиационного баланса, усиление поступления тепла в почву и снижение отношения Боуэна, происходившие в течение первого десятилетия сукцессии, могли порождать спад турбулентного потока тепла в полдень до 80 Вт/м<sup>2</sup> по сравнению с условиями неповрежденного древостоя. Контраст в потоках явного тепла и шероховатости на границах неповрежденного и пострадавшего от пожара леса мог индуцировать связанную с этим мезомасштабную циркуляцию и вызывать усиление конвекции. Поскольку размеры площади выгоревшего леса часто превосходят 10<sup>4</sup> га, следствием пожаров может быть локальное изменение климата. С учетом многочисленных лесных пожаров в центральной части Аляски не исключено и воздействие пожаров на климат в региональных масштабах.

#### 4. Лесные пожары и круговорот углерода

Грубые лесные остатки (CWD) являются обращающей на себя внимание и важной характеристикой всех лесных экосистем — от бореальных до тропических. CWD оказывают влияние на круговороты биогенов, образование гумуса, запасание углерода, частоту возникновения лесных пожаров, круговорот воды и составляют среду обитания для гетеротрофных и автотрофных организмов. Обычно наличие мертвых деревьев и CWD не учитывается при определении бюджетов углерода, хотя за последнее время привлекла внимание важность этих резервуаров углерода как бореальных запасов углерода.

Bond-Lamberty и др. [11] исследовали распределение и динамику дыхания древесных остатков (WD) в условиях хронологической последовательности при пожарах в бореальном лесу, состоящем преимущественно из черной ели, в северной части провинции Манитоба (Канада). Рассматриваемая хронологическая последовательность включала семь древостоев, подвергавшихся пожару в период с 1870 по 1998 г. Каждый из древостоев представлял собой отдельные хорошо и плохо дренированные участки. Авторы [11] ставили перед собой следующие задачи: 1) количественное описание распределения WD (с учетом диаметра остатков деревьев и класса

распада); 2) прослеживание эволюции выбросов  $\text{CO}_2$  отдельными WD и численное моделирование влияния влажности, размеров и уровня распада остатков деревьев на дыхание; 3) оценки годового дыхания WD и расчеты постоянной распада для каждого из рассмотренных участков.

Биомасса грубых древесных остатков варьировала от 1,4 до 177,6 Мг/га, как правило, убывая по мере увеличения возраста. Наиболее распавшиеся WD характеризовались более высокой влажностью, более низкой плотностью и более высокой скоростью дыхания, чем менее распавшиеся WD. Уровень влажности и категория распада могли служить существенными предикторами дыхания при влажности меньше 43%. При более высокой влажности она переставала быть существенной, но приобретал важное значение дренаж почвы древесного: на более сухих участках происходило возрастание дыхания за счет WD. Учет года пожара не играл важной роли для оценок дыхания. Рассчитанные значения годовых выбросов углерода в зависимости от WD изменялись в пределах 0,11–1,92 МгС/(га · год). Значения вычисленной годовой скорости распада  $k$  изменялись в условиях рассматриваемой хронологической последовательности от 0,01 до 0,06. Это означает, что отдельная экспоненциальная модель распада не является приемлемой для всего массива рассматриваемых данных. Прямые расчеты  $k$  по данным измерений дыхания древесины могут быть полезными при анализе межгодовой изменчивости значений  $k$ .

Главный вывод состоит в том, что древесные остатки являются существенным резервуаром углерода и источником  $\text{CO}_2$  для различных ландшафтов (следовательно, служат фактором годовых выбросов углерода), а скорость распада остатков зависит от дренажа грунта и от времени. Модели экосистем и бюджета углерода, в которых не учитывается наличие древесных остатков, характеризуются игнорированием существенного компонента потоков углерода, особенно в таких регионах, как бореальные леса, где пожары являются регулярными.

Оценки воздействий изменения климата на связанный с динамикой экосистемы годовой куммулятивный суммарный обмен углекислым газом (NEE) в северном полушарии привели к значениям порядка 1 ГтС (гигатонны углерода) или более. Согласно Третьему отчету МГЭИК (Межправительственной группы экспертов по проблеме изменений климата) антропогенно обусловленное повышение температуры воздуха в бореальных лесах должно быть зимой сильнее, чем летом. Отсюда следует, что изменение климата окажет противоречивое влияние на NEE в бореальной зоне, проявляясь, с одной стороны, в возрастании продолжительности вегетационного сезона и, следовательно, — в усилении куммулятивного фотосинтеза, а с другой стороны (и, возможно, что это более существенно), — в смягчении зим и усилении почвенного дыхания. Последнее особенно важно, поскольку в бореальной зоне около 84% запасов углерода сосредоточено в органическом веществе почв.

В связи с этим большую актуальность приобретают комплексные исследования влияния фотосинтеза и дыхания на углеродный бюджет экосистем, а также обусловленной динамикой климата сезонности и межгодовой изменчивости NEE в бореальных лесах. Многие бореальные экосистемы являются источниками углерода зимой и стоками летом (в период вегетационного сезона). Suni и др. [45] выполнили исследование межгодовой изменчивости куммулятивного обмена  $\text{CO}_2$  для экосистем в зависимости от вариаций климата на примере пяти вегетационных сезонов. Прямые (флуктуационные) измерения потока  $\text{CO}_2$  производились в период с апреля 1996 по апрель 2001 г. в сосновом лесу (*Scots pine*) на юге Финляндии. Наиболее репрезентативным индикатором начала сезона роста экосистемы оказалась температура воздуха, а окончания сезона вегетации — продолжительность светового дня.

Анализ результатов наблюдений показал, что лес служит стоком углерода при наличии лишь слабой межгодовой изменчивости. Уровень усвоения углерода в течение четырех сезонов вегетации изменялся на 80 гС/м<sup>2</sup>, варьируя между 230 и 310 гС/м<sup>2</sup>. Оценки выбросов углерода зимой привели к значениям от 60 до 90 гС/м<sup>2</sup>. Межгодовая изменчивость сезонного обмена углеродом (весна, лето, осень) составляла от 30 гС/м<sup>2</sup> осенью и весной, до 80 гС/м<sup>2</sup> летом.

Учет вариаций метеорологических параметров позволил лишь частично объяснить изменчивость куммулятивных значений NEE для различного времени года и для сезона вегетации. Значительный вклад как дневных, так и ночных потоков  $\text{CO}_2$  в формирование обмена углеродом отображает значимое воздействие на формирование NEE как фотосинтеза, так и дыхания. Полученные результаты свидетельствуют, в целом, о сложности взаимосвязи между климатом и NEE.

Предполагается, что бореальные леса являются регионом стока углерода. Однако следствием характерных для них пожаров может оказаться трансформация бореальных лесов в источники С за счет прямых выбросов С при сгорании биомассы и косвенных воздействий пожаров на тепловой и водный режимы, а также на структуру и функционирование экосистем.

За последние несколько десятилетий частота пожаров в бореальных лесах возросла и может еще более увеличиться в условиях продолжающегося глобального потепления климата. Это должно привести к сокращению времени восстановления экосистем в периоды между пожарами, а также к усилению выбросов в атмосферу парниковых газов. Поток  $\text{CO}_2$  от поверхности грунта ( $R_s$ ) является вторым по важности потоком углерода в бореальных лесах, что определяет его роль в формировании глобального круговорота углерода.

Величина  $R_s$  изменяется под влиянием различных процессов: 1) возникновение пожаров приводит к частичной ликвидации растительного покрова и к понижению альбедо поверхности почвы (последнее

обуславливает повышение температуры поверхности и усиление скорости разложения остатков растительности); 2) пожар прерывает процесс накопления органического вещества почвы и изменяет баланс между поступлением детрита и гетеротрофным дыханием (в результате поступления большого количества детрита); 3) пожар порождает изменения сукцессии растительности и состава ее видов, а также качества подстилки.

С целью лучшего понимания воздействия лесных пожаров на круговорот углерода в бореальных лесах Wang и др. [47] выполнили измерения и численное моделирование  $R_s$  для черной ели (*Picea mariana*) на примере послепожарной хронологической последовательности для серии семи лесных пожаров на севере провинции Манитоба (Канада) в условиях хорошего и плохого дренажа грунта. Задачи исследований состояли в том, чтобы: 1) количественно охарактеризовать зависимость  $R_s$  от температуры почвы для лесов различного возраста; 2) изучить послепожарную сукцессионную динамику древостоев; 3) оценить годовой поток  $\text{CO}_2$  от поверхности почвы.

Поток  $\text{CO}_2$  сильно зависел от условий дренажа и возраста древостоя. Имела место положительная корреляция потока  $\text{CO}_2$  с температурой почвы ( $R_s = 0,78$ ), причем результаты численного моделирования потока сильно различались в зависимости от сочетания уровня дренажа и возраста древостоя.

В период сезона вегетации поток  $\text{CO}_2$  от хорошо дренированного грунта был значительно больше, чем от плохо дренированного. Средние годовые значения потока  $\text{CO}_2$  от почвы в различные годы составили: 226 (1998 г.); 412 (1995 г.); 357 (1989 г.); 413 (1981 г.); 350 (1964 г.); 274 (1930 г.) и 244  $\text{гC}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  (1870 г.) в условиях хорошо дренированных грунтов и соответственно — 146, 380, 300, 303, 256, 233 и 264  $\text{гC}/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$  в случае плохо дренированных грунтов. В зимнее время года (с 1 ноября до 30 апреля) значения потока  $\text{CO}_2$  варьировали в пределах 5–19% по отношению к годовому потоку. Повидимому, уменьшение потока на участках, недавно подвергшихся пожару, было обусловлено главным образом уменьшением уровня дыхания за счет корней деревьев.

На протяжении всей рассмотренной хронологической последовательности пожаров произошли изменения потока  $\text{CO}_2$  от почвы примерно в два раза при достижении максимальных значений до смыкания зон деревьев, когда почва была наиболее теплой и происходило накопление как надземной, так и подповерхностной биомассы. Наблюдаемый спад потока  $\text{CO}_2$  в случае более старых древостоев можно объяснить более низкой температурой почвы, что обусловлено накоплением теплоизолирующего органического вещества и другими факторами.

Бореальные леса занимают территорию площадью около 14 млн  $\text{км}^2$  в циркулярной полосе широт 50–70° с. ш., что составляет примерно 10% всей глобальной поверхности суши. Эти леса содержат непропорционально большое количество почвенного углерода, благодаря климатическим

условиям, которые неблагоприятны для процессов разложения органики. Среднегодовая температура в бореальных лесах близка к 0 °C при слабом дренаже почвы, обусловленном доминированием низменностей. Характерными особенностями рассматриваемой полосы широт являются широко распространенная вечная мерзлота и изолированность глубоких почвенных горизонтов от летнего прогревания, обусловленная наличием мхов и тонких корней («мелкого» углерода), которые сгорают при лесных пожарах, но восстанавливаются в последующие десятилетия. Подобная теплоизоляция способствует сохранению вечной мерзлоты, что осложняет дренаж грунта и замедляет процессы разложения органического вещества, запасенного в глубоких слоях грунта под слоем мха. Измеренная в июле и августе 1996 г. интенсификация дыхания за счет глубоких слоев достигала примерно 10  $\text{гC}/(\text{га} \cdot \text{сут})$ . Подобное усиление дыхания коррелировало с повышением температуры глубоких слоев. Таким образом, органическое вещество глубоких слоев грунта характеризуется лабильностью при связанной с низкой температурой малой скорости разложения.

В связи с отмеченными обстоятельствами Hirsch и др. [23] проанализировали полученную на сети автоматизированных измерений информацию об изотопном составе продуктов дыхания почвы. Полученные результаты подтверждают предположение о том, что обусловленное глубокими слоями грунта дыхание на участке леса из черной ели, использованном в рамках программы BOREAS, чувствительно к процессу таяния почвы и большая часть потока  $\text{CO}_2$  связана с разложением старого органического вещества, но не просто с дыханием корней. В течение лета 1999 г. дыхание глубоких слоев грунта характеризовалось линейной зависимостью от температуры на глубине 50 см при наклоне, равном 0,2  $\text{гC}/(\text{га} \cdot \text{сут} \cdot \text{°C})$ . Позднее доминирующее влияние на дыхание оказывало разложение старого органического вещества грунта, образовавшегося из атмосферного  $\text{CO}_2$  столетия тому назад.

Надежные измерения обмена  $\text{CO}_2$  между различными экосистемами суши и атмосферой сохраняют высокий уровень приоритетности, ввиду большого внимания к  $\text{CO}_2$  как к парниковому газу в контексте проблемы «глобального потепления». Главное внимание уделяется в связи с этим анализу возможностей замыкания глобального баланса углерода и оценкам роли антропогенных выбросов  $\text{CO}_2$  в формировании биогеохимических круговоротов. Подобные разработки ведутся, в частности, в рамках таких международных программ, как AmeriFlux (Северная Америка), CarboEurope и FLUXNET, причем главную роль в осуществлении данных наблюдений играет использование устанавливаемой на мачтах и самолетах аппаратуры для прямых (корреляционных) измерений потока  $\text{CO}_2$ , а также измерений в лабораторных кюветах и камерах (в последнем случае исследуется газообмен для различных элементов растений (листья, стебли, ветви) и растений в целом).



Smith и др. [42] обсудили результаты количественных сравнений измеренных значений потока  $\text{CO}_2$  в пространственных масштабах от ветви и сообщества до обширных участков растительности (данные наблюдений на башне и с самолета). При этом главное внимание было уделено обеспечению сравнимости данных при минимальности выборок в случае локальных измерений. Влияние временной неоднородности учитывалось путем использования повторных наблюдений в идентичные дни через двухчасовые промежутки времени с высокими и низкими значениями потоков  $\text{CO}_2$  (на разных стадиях вегетационного сезона).

Измерения потоков  $\text{CO}_2$ , мкмоль/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ), в условиях высокогорной экосистемы степной полнины в юго-восточной части штата Вайоминг (США) выполнены с использованием четырех методик: кюветы (измерения, относящиеся к отдельному листу), камеры (данные для сообщества растительности), башни и самолета (в последних двух случаях сделаны корреляционные прямые измерения). На участке интенсивных измерений и вдоль траектории самолета определялись однородность видового состава растений, плотность растительности и площадь листьев на единицу площади подстилающей поверхности, а также топографическая изменчивость.

Сравнения потоков  $\text{CO}_2$  производились в дни с относительно высокой и низкой влажностью почвы. В совпадающие дни расхождение между потоками  $\text{CO}_2$ , определенными с применением четырех методик [4,0–4,6 мкмоль/( $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ )] за одинаковые промежутки времени (09–11 ч), изменялось в пределах  $\pm 9\%$  (при максимальном расхождении, равном 23%). Данные наземных измерений в пределах временного различия  $\pm 1$  сут по отношению к самолетным данным отличались в пределах от  $\pm 7$  (минимально) до  $\pm 38\%$  (максимально). При двухнедельном сдвиге по времени соответствующие различия возрастали до  $\pm 31\%$  ( $\pm 38\%$ ). Таким образом, в почти идеальных топографических условиях и при однородном растительном покрове временная неоднородность данных измерений, составляющая всего несколько дней, обуславливает различия измеренных потоков  $\text{CO}_2$ , которые превосходят расхождения данных, полученных с использованием четырех методик.

## 5. Лесные пожары и климат

Для прогноза роли динамики экосистем суши в глобальных изменениях необходимо располагать информацией, в частности о главных процессах на поверхности суши, которые влияют на формирование климата. Понимание актуальности этой задачи стимулировало разработку имитационных численных моделей с учетом соответствующих обратных связей, которые позволяют, в частности, воспроизвести влияние полей температуры и влажности на обмен малыми газовыми компонентами между подстилающей поверхностью и атмосферой с учетом изменяющихся свойств поверхности.

Поскольку в разработанных до сих пор моделях не было принято во внимание такого существенного

фактора, как лесные пожары, Hinzman и др. [22] предприняли полевой наблюдательный эксперимент FROSTFIRE с целью проанализировать влияние метеорологических условий и особенностей растительного покрова на динамику пожара и на соответствующие обратные связи по данным искусственного лесного пожара на площади 970 га в регионе водосбора центральной части Аляски (близости от г. Фербенкса). Типичные особенности этого региона состоят в наличии бореальных (преимущественно еловых) лесов и «пятнистой» (прерывающейся) вечной мерзлоты. Детальное послепожарное исследование участка сгоревшего леса показало, что, в целом, динамика и последствия искусственного пожара вполне соответствовали особенностям природного лесного пожара.

Прерывающиеся зоны вечной мерзлоты принадлежат к числу регионов, которые наиболее чувствительны к глобальному потеплению климата. Эти зоны в значительной степени перекрываются с циркулярным поясом бореальных лесов в северном полушарии. Термическое состояние вечной мерзлоты в рассматриваемых зонах очень неустойчиво, поскольку температура часто оказывается близкой к  $-1$  °С или даже выше. Пространственное распределение вечной мерзлоты в сильной степени зависит от таких факторов, как типы ландшафта, почв и растительного покрова.

Наиболее важными факторами, контролирующим деградацию или развитие вечной мерзлоты, являются наличие и толщина поверхностного органического слоя почвы. Если этот слой оказывается удаленным, то происходят уменьшение альбедо и возрастание теплопроводности поверхностного слоя почвы примерно от 0,2 до 1,0 Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ). Лесные пожары в бореальных лесах весьма существенно влияют на толщину органического слоя почвы и являются одним из природных компонентов динамики экосистем бореальных лесов. В течение второй половины XX в. площадь пожаров в северо-американских бореальных лесах возросла с 1 млн га/год (1950 г.) до почти 3 млн га/год (2000 г.). Воздействия пожаров на лесные экосистемы проявляются в изменении теплового и водного баланса и вечной мерзлоты и представляют собой как кратковременные, так и долговременные процессы. Типичный период возвратных пожаров в бореальных лесах варьирует в пределах 29–300 лет в зависимости от условий климата и антропогенных воздействий. Что касается кратковременных процессов, связанных с влиянием пожаров на влажность и тепловой режим почвы, то они изучены сравнительно хорошо. Возникновение пожара сразу сопровождается увеличением влажности почвы за счет спада эвакотранспирации, но через два года после пожара на выгоревшей территории иногда наблюдался спад влажности почвы. Послепожарная ситуация характеризуется значительным перераспределением компонентов теплового баланса подстилающей поверхности. Это происходит, в частности, из-за уменьшения альбедо поверхности и, соответственно, — роста поглощенной коротковолновой радиации с последующим

увеличением явного и скрытого потоков тепла. Все это приводит к спаду радиационного баланса, но к усилению поступления тепла в почву.

По данным наблюдений последствий лесных пожаров (в том числе двух контролируемых пожаров) в 11 пунктах, расположенных в бореальных лесах Внутренней Аляски, Yoshikawa и др. [51] проанализировали влияние пожаров: 1) на поступление к поверхности почвы тепла за счет теплопроводности и конвекции; 2) удаление мха как теплоизолирующего слоя; 3) тепловой баланс; 4) влажность почвы; 5) толщину активного слоя почвы. Перенос тепла к почве посредством теплопроводности к слою вечной мерзлоты оказался несущественным во время пожара, но сразу после пожара могли происходить возрастание теплопроводности почвы до 10 раз и спад альбедо до 50% (в зависимости от степени выгорания поверхностного органического слоя почвы).

В зависимости от толщины остающегося органического слоя сильно изменяются процессы деградации и восстановления слоя вечной мерзлоты. Если в течение пожара уменьшения толщины органического слоя не произошло, то в этом случае не возникает и изменений активного слоя (того слоя над вечной мерзлотой, где ежегодно происходят процессы таяния и замерзания), несмотря на спад альбедо. Любое значительное воздействие на поверхностный органический слой порождает возрастание потока тепла через активный слой к слою вечной мерзлоты. Примерно через 3–5 лет после того, как активный слой подвергался сильному возмущающему воздействию, происходит такое увеличение его толщины, при котором в течение последующей зимы не возникает полного замерзания слоя. В результате образуется толик — незамерзающий слой под сезонно замерзающей почвой и над слоем вечной мерзлоты. Растаявший слой толщиной 4,15 м наблюдался, например, на участке выгоревшего леса в 1983 г. Расчеты показали, что если после лесного пожара сохраняется органический слой толщиной более 7–12 см, то термическое воздействие на вечную мерзлоту оказывается минимальным.

## 6. Экология лесов

Лесные пожары очень существенно влияют на экологию лесов, включая формирование круговорота углерода. Пожары инициируют новую сукцессию полога леса и, таким образом, регулируют аккумуляцию углерода, определяемую первичной продукцией. Пожары воздействуют, помимо этого, на тепловой режим почвы, что, в свою очередь, оказывает влияние на процессы дыхания почвы. Наконец, следствием лесных пожаров оказывается их влияние на круговорот углерода в региональных и глобальных масштабах, обусловленное выбросами углерода в атмосферу и последующим дальним переносом. French и др. [20] разработали модель, позволяющую рассчитать выбросы малых газовых компонентов в атмосферу при лесных пожарах и их влияние на формирование круговорота углерода.

Эта модель применена для вычислений выбросов трех углеродсодержащих МГК ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ ) за счет пожаров в бореальных лесах Аляски (на площади 223 220 га) в период 1950–1999 гг. Проанализировано влияние на развитие пожаров двух факторов: доли израсходованного при пожарах углерода, а также относительной роли процессов горения и тления. Расчеты показали, что за последние 50 лет в атмосферу ежегодно выбрасывалось в среднем 4,5 ТгС. В годы с интенсивными лесными пожарами уровень выбросов возрастал до 38 ТгС, а минимальный уровень понижался до 0,36 ТгС в 1989 г. Таким образом, имела место сильная межгодовая изменчивость выбросов общего углерода и различных углеродсодержащих соединений. При этом годовые выбросы общего углерода практически полностью зависели от площади выгоревшего леса. Соотношение между горением и тлением оказывало существенное влияние на уровни выбросов  $\text{CO}$  и  $\text{CH}_4$ . Полученные оценки свидетельствуют о важном вкладе пожаров в бореальных лесах Аляски, происходивших в течение второй половины XX в., на выбросы углеродсодержащих газов в атмосферу.

В июне 1999 г. в регионе центральной гористой части Аляски (поблизости от г. Фербенкса) был осуществлен экспериментальный лесной пожар на площади 11 км<sup>2</sup> (по проекту FROSTFIRE), главная цель которого состояла в изучении воздействий пожаров на экосистемы бореальных лесов и в анализе возможностей экстраполяции полученных результатов в региональных масштабах. Формирование после пожара вторичной сукцессии является главным процессом, ответственным за изменение структуры и видового состава лесов. Значительную часть наблюдаемых изменений густоты (плотности) лесов, живой биомассы, термических свойств почвы, резервуаров и потоков углерода и биогенов в экосистемах можно объяснить как результат длительной послепожарной эволюции.

В этой связи Fastie и др. [19] предприняли восстановление истории лесных пожаров (их пространственно-временной изменчивости) в регионе осуществления проекта FROSTFIRE с использованием разнообразной наземной информации о состоянии лесов и данных аэрофотосъемки. Полученные результаты показали, что за период 1896–1925 гг. в регионе водосбора FROSTFIRE влиянию пожаров подверглось 93% лесов, а в избранном контрольном районе водосбора — 47%. За весь период XIX в. и позднее в XX в. не было обнаружено необычно мощных пожаров. Возникновение пожаров в начале XX в. могло быть связано с горными разработками. За последние 200–250 лет ни в одной части исследованного региона сильные лесные пожары не возникали более одного раза, что свидетельствует о завышенности полученных ранее данных о частоте пожаров. В березовых и чернеловых лесах восстановление их видового состава после пожаров происходило за несколько десятилетий после пожара. Однако березовые леса на южных склонах не обнаружили признаков восстановления на протяжении 200 лет после пожара.

Применение газовой хроматографической методики анализа состава проб воздуха на содержание различных малых газовых компонентов открыло новые возможности. Эти возможности были использованы, в частности, для измерений концентрации десятков различных органических соединений (алканов, алкенов, алкинов и ароматических МГК), результаты которых привели к обнаружению устойчивого возрастания концентрации многих МГК на протяжении двух последних десятилетий. В настоящее время группа сотрудников Калифорнийского университета в г. Ирвине (USI) регулярно осуществляют мониторинг содержания около 100 летучих органических соединений с использованием как наземных, так и самолетных проб. Choi и др. [13] обсудили результаты анализа взятых с реактивного самолета Gulfstream в период 28 августа – 14 сентября 1999 г. проб воздуха на содержание углеводородных и галогенуглеродных соединений в рамках второго самолетного Эксперимента по изучению продуктов сжигания биомассы и разрядов молний (BIBLE-B).

С целью определения концентрации не связанных между собой соединений выполнена обработка данных наблюдений с использованием методики главных компонентов (РСА). Задачи, поставленные перед полевыми наблюдательными экспериментами по программе BIBLE-B, состояли в изучении МГК как продуктов сжигания биомассы и молниевых разрядов с учетом их химической трансформации, происходящей в атмосфере в регионе западной периферии Тихого океана. При этом маршруты полетов пересекали районы континентального муссона, а также области атмосферы с преобладанием МГК городского и промышленного происхождения (продукты сгорания, хлорированные компоненты ( $\text{CHCl}_3$ ,  $\text{CH}_2\text{Cl}_2$  и др.) и этаны, ксилены и алканы с длинными цепями – до  $\text{C}_7$ ). Случаи с повышенной концентрацией пентана отображали существование продуктов выбросов, обусловленных работой двигателей.

Как правило, наличие групп этил- и пропилнитратов указывало на важность процессов окисления в среде с высокой концентрацией окислов азота  $\text{NO}_x$ , т.е. на существенное воздействие городов или молний. В условиях атмосферы над тропическим океаном наиболее заметными были метилнитраты и соединения брома, а иногда – диметилсульфид и метилиодид. При полетах над Австралийским континентом зарегистрированы сигнатуры сжигания биомассы. Бросалось в глаза отсутствие отчетливых сигнатур выбросов метана ветлами и утечек пропана. Наиболее характерной особенностью всех рассматриваемых результатов наблюдений было обнаружение антропогенных источников МГК.

## 7. Пожары в саваннах

Пожары в саваннах и их замещение сельскохозяйственными культурами или растительностью пастбищ приводят к кратко- и(или) долговременным изменениям круговоротов биогенов и углерода.

В связи с этим в период с сентября 1999 по ноябрь 2000 г. Kisselle и др. [28] выполнили измерения потоков окиси углерода между почвой и атмосферой в центральной части Бразилии при различной степени повреждения саванн пожарами. Главное внимание было сконцентрировано на двух участках, покрытых *cerrado stricto sensu(s)* при доле поверхности, занятой растительностью, в пределах 20–50%, и кустарниками.

В работе [28] рассмотрена растительность, которая либо подвергалась пожарам через каждые два года, либо в течение 26 лет была защищена от пожаров. Анализ результатов измерений выбросов  $\text{CO}$  в атмосферу в условиях прозрачных камер выявил наличие годового хода выбросов с максимумом в период конца сухого сезона и перехода к влажному сезону (август–октябрь) и минимумом в конце влажного сезона (февраль–апрель). Дневные значения потока  $\text{CO}$  в условиях прозрачных камер были всегда больше величин, наблюдавшихся в непрозрачных камерах. Суточный ход характеризовался отрицательными потоками (из атмосферы в почву) во всех случаях ночью и положительными – днем (в условиях прозрачных камер). Скорость осаждения  $\text{CO}$ , наблюдавшаяся в непрозрачных камерах, опускалась ночью до  $0,002$ – $0,014$  см/с, что соответствует нижнему пределу для тропических, умеренных и высоких широт. Не было обнаружено существенных различий между среднегодовыми величинами дневных потоков  $\text{CO}$  на не подвергшихся пожарам участках *cerrado* и *campo sujo* ( $160 \cdot 10^9$  и  $190 \cdot 10^9$  молекул/( $\text{cm}^2 \cdot \text{c}$ ) соответственно).

Пожары порождали значительное возрастание выбросов  $\text{CO}$  поверхностью почвы на участках *cerrado*. Данные измерений, полученные через 30 сут после пожара, показали, что образование  $\text{CO}$  днем оказалось более чем в 10 раз превышающим значение для не подвергшегося пожару *cerrado ss* ( $812,8 \cdot 10^9$  и  $76,8 \cdot 10^9$  молекул/( $\text{cm}^2 \cdot \text{c}$ ) соответственно). Послепожарные выбросы  $\text{CO}$  превосходили наблюдавшиеся до пожара в условиях как непрозрачных, так и прозрачных камер. Это свидетельствует о том, что следствием пожаров было образование фотохимически и термически активных предшественников  $\text{CO}$ . Сильный спад выбросов  $\text{CO}$  обуславливало удаление подстилки и остатков растительности с не подвергшихся пожарам участков *campo sujo* и с пастбища. Наблюдаемые значения потоков  $\text{CO}$  на пострадавших от пожаров участках (по данным для непрозрачных камер) оказались, в целом, близкими к полученным ранее в результате аналогичных измерений в саваннах Венесуэлы и Африки.

## 8. Обмен между тропосферой и стратосферой

Обычно тропопауза рассматривается как барьер для перемешивания между тропосферой и стратосферой. Хотя иногда «башни» мощных кучевых

облаков проникают в стратосферу, наиболее эффективным механизмом поступления вещества из тропосферы в стратосферу служат, вероятно, вулканические извержения. Анализ результатов недавних спутниковых наблюдений выявил, однако, связь между аномальными аэрозольными слоями в стратосфере в 1998 г. и лесными пожарами летом в северном полушарии. В связи с этим Fromm и Servranckx [21] высказали предположение, что подобный тропосферно-стратосферный перенос (TST) мог быть обусловлен воздействием экстремально интенсивной конвекции. Поскольку аналогичная ситуация возникла летом 2001 г. в Канаде, предпринят детальный анализ этой ситуации, который привел к однозначному выводу о формировании плотного дымового облака в верхней и нижней тропосфере (UT/LS) в результате возникших в Канаде в мае 2001 г. лесных пожаров и воздействия «взрывной» конвекции на распространение дыма от пожаров. Таким образом, при определенных метеорологических условиях может возникать значительный перенос вещества из планетарного пограничного слоя в UT/LS, обусловленный как непосредственно вертикальной адвекцией, так и процессом разрушения гравитационных волн. По-видимому, такого рода явление возникает в средних и высоких широтах северного полушария достаточно регулярно. Остается, однако, неясным, каких высот может достигать дымовое облако и каков его химический состав.

В связи с обнаружением поступления продуктов сгорания органики в верхнюю тропосферу и даже в стратосферу Андрианов и др. [4] предприняли численное моделирование «огненного смерча», возникающего иногда в атмосфере в благоприятных для этого метеорологических условиях.

### Заключение

Анализ информации о лесных пожарах демонстрирует разнообразную и противоречивую природу этого явления. С одной стороны, лесные пожары — это стихия природного (а иногда и антропогенного) происхождения, причиняющая серьезный материальный ущерб. С другой стороны, пожары — необходимый компонент эволюции лесов, обеспечивающий их обновление. Еще один не менее важный аспект связан с выбросами в атмосферу во время лесных пожаров разнообразных малых газовых и аэрозольных компонентов, оказывающих существенное влияние на протекающие в атмосфере химические и другие процессы (стоит напомнить в этом контексте о влиянии на климат пожаров, обусловленных ядерными взрывами в атмосфере [30], а также о динамике тропосферного озона [31]). Особого внимания заслуживает проблема гетерогенных химических реакций на частицах водного (облака) и твердого аэрозоля. Критически важная роль динамики облачного покрова в формировании климата диктует потребность в детальном изучении сложных взаимодействий между атмосферным (в том числе дымовым) аэрозолем и облаками.

С точки зрения проблемы климата важно учитывать не только влияние последствий лесных пожаров на климат, но и обратное воздействие изменений климата на условия возникновения лесных пожаров. Мы имеем дело, таким образом, с исключительной сложности проблемой понимания интерактивной совокупности разнообразных физических, химических и биологических процессов. Магистральный путь решения этой задачи — получение необходимых данных наблюдений и применение методологии численного моделирования системы «природа — общество». Пока что мы находимся еще в начале этого пути. Важным шагом в этом направлении является программа EFEU изучения воздействий горения растительности (лесные пожары, сжигание биомассы и др.) на состав и циркуляцию атмосферы. Эта программа была кратко описана в работе Wurzel и Simmel [50].

1. Андрианов С.А., Васильченко И.И., Голицын Г.С., Забавин В.Н., Щербин М.Д. Численное моделирование процессов формирования «огненного смерча» // Изв. РАН. Физика атмосф. и океана. 2003. Т. 39. № 1. С. 3–13.
2. Гитарский М.Л., Карабанов Р.Т., Филипчук А.Н., Назаров И.М., Коротков В.Н., Романовская А.А. Расчетная оценка стока углерода в лесах России за последнее десятилетие // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. СПб.: Гидрометеониздат, 2002. Т. XVIII. С. 261–275.
3. Григорьев Ал.А., Кондратьев К.Я. Экологические катастрофы. СПб., 2001. 684 с.
4. Исаков А.А. Оптические и микрофизические характеристики дыма лесных пожаров в Подмосковье в июле–сентябре 2002 г. // Оптика атмосф. и океана. 2003. Т. 16. № 10. С. 886–892.
5. Кондратьев К.Я. Метеорологические спутники. Л.: Гидрометеониздат, 1963. 312 с.
6. Кондратьев К.Я., Тимофеев Ю.М. Метеорологическое зондирование атмосферы из космоса. Л.: Гидрометеониздат, 1978. 280 с.
7. Кондратьев К.Я., Кративин В.Ф., Савиных В.П. Перспективы развития цивилизации. Многомерный анализ. М.: ЛОГОС, 2003. 575 с.
8. Кондратьев К.Я., Лосев К.С., Ананичева М.Д., Чеснокова И.В. Естественнонаучные основы устойчивости жизни. М.: ЦСАГО, 2003. 250 с.
9. Пономарев Е.И., Сухинин А.И. Использование информации с ИСЗ НОАА для пространственной оценки пожарной опасности лесных территорий // Сиб. экол. ж. 2001. № 5. С. 577–589.
10. Пономарев Е.И., Сухинин А.И. Методика картирования и среднесрочного прогнозирования пожарной опасности лесов по условиям погоды // География и природные ресурсы. 2002. № 4. С. 112–117.
11. Bond-Lamberty B., Wang C., Gower S.T. Annual carbon flux from woody debris for a boreal black spruce fine chronosequence // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. № 3. P. WFX1/1–WFX1/10.
12. Chambers S.D., Chapin F.S., III. Fire effects on surface-atmosphere energy exchange in Alaskan black spruce ecosystems: implications for feedbacks to regional climate // J. Geophys. Res. D. 2003. V. 108. N 1. P. 1/1–1/17.
13. Choi Y., Elliott S., Simpson I.J., Blake D.R., Colman J.J., Dubey M.K., Meinardi S., Rowland F.S., Shirai T., Smith F.A. Survey of whole air data from

- the second airborne Biomass Burning and Lightning Experiment using principal component analysis // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 5. P. 3/1–3/10.
14. *Christian H.J., Blakeslee R.J., Boccippio D.J., Boeck W.L., Buechler D.E., Driscoll K.T., Goodman S.J., Hall J.M., Koshak W.J., Mach D.M., Stewart M.F.* Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 4/1–4/15.
  15. *Conrad S.G., Sukhinin A.L., Stocks B.J., Cahoon D.R., Davidenko D.P., Ivanova G.A.* Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia // *Clim. Change.* 2002. V. 55. P. 197–211.
  16. *Conrad S.G., Ivanova G.A.* Wildfire in Russian boreal forests – Potential impacts of fire regime characteristics on emissions and global carbon balance estimates // *Environ. Pollut.* 2002. V. 98. P. 305–313.
  17. *Dioumaeva I., Trumbore S., Schuur E.A.G., Goulden M.L., Litvak M., Hirsch A.I.* Decomposition of peat from upland boreal forest: Temperature dependence and sources of respired carbon // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 3. P. WFX3/1–WFX3/12.
  18. *Dohrenbusch A., Bartsch N. (Eds.)* Forest Development. Succession, Environmental Stress and Forest Management. Springer for Science, the Netherlands, 2003. XVI+220 p.
  19. *Fastie C.L., Lloyd A.H., Doak P.* Fire history and postfire forest development in an upland watershed of interior Alaska // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 6/1–6/13.
  20. *French N.H.F., Kasischke E.S., Williams D.G.* Variability of the emission of carbon-based trace gases from wildlife in the Alaskan boreal forest // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 7/1–7/11.
  21. *Fromm M.D., Seroranckx R.* Transport of forest fire smoke above the tropopause by supercell convection // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. N 10. P. 49/1–49/4.
  22. *Hinzman L.D., Fukuda M., Sardberg D.V., Chapin F.S., III, Dash D.* FROSTFIRE: An experimental approach to predicting the climate feedbacks from the changing boreal fire regime // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 9/1–9/6.
  23. *Hirsch A.I., Trumbore S.E., Goulden M.L.* Direct measurement of the deep soil respiration accompanying seasonal thawing of a boreal forest soil // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 3. P. WFX2/1–WFX2/10.
  24. *Isaev A.C., Korovin G.N., Bartalev S.A., Ershov D.V., Janetos A., Kasischke E.S., Shurgart H.H., French N.H., Orlick B.E., Murphy T.L.* Using remote sensing for assessment of forest wildfire carbon emissions // *Clim. Change.* 2002. V. 55. P. 231–255.
  25. *Ji Y., Stocker E.* Seasonal, intraseasonal, and interannual variability of global land fires and their effects on atmospheric aerosol distribution // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 23. P. ACH10/1–ACH10/11.
  26. *Kasischke E.S., Bruhwiler L.P.* Emissions of carbon dioxide, carbon monoxide, and methane from boreal forest fires in 1998 // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 2/1–2/14.
  27. *Kim Y., Tanaka N.* Effect of forest fire on the fluxes of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in boreal forest soils interior Alaska // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 10/1–10/12.
  28. *Kisselle K.W., Zepp R.G., Burke R.A., Pinto A. de S., Bustamante M.M.C., Opsahl S., Varella R.F., Viana L.T.* Seasonal soil fluxes of carbon monoxide in burned and unburned Brazilian savannas // *J. Geophys. Res. D.* 2002. V. 107. N 20. P. LBA18/1–LBA18/12.
  29. *Kondo Y., Ko M., Koke M., Kawakami S., Ogawa T.* Preface to Special Section on Biomass Burning and Lightning Experiment (BIBLE) // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 3. P. BIB1/1–BIB1/11.
  30. *Kondratyev K.Ya.* Climate Shocks: Natural and Anthropogenic. Wiley, New York e.a., 1988. 296 p.
  31. *Kondratyev K.Ya., Varotsos C.A.* Atmosphere Ozone Variability: Implications for Climate Change, Human Health and Ecosystems. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K., 2000. 617 p.
  32. *Kondratyev K.Ya., Grigoryev A.I., Varotsos C.A.* Environmental Disasters: Anthropogenic and Natural. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K., 2002. 484 p.
  33. *Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Varotsos C.A.* Global Carbon Cycle and Climate Change. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K., 2003. 344 p.
  34. *Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.S., Varotsos C.A.* Global Ecodynamics and Human Society. Springer/PRAXIS, Chichester, U.K., 2004. 368 p.
  35. *Korovin G.N.* Analysis of distribution of forest fires in Russia // *Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia* / Edited by J.G. Goldammer and V.V. Furayev. Kluwer Acad., Norwell, MA, 1996. P. 112–128.
  36. *Lamarque J.-F., Edwards D.P., Emmons K., Gille J.C., Wilhelmi O., Gerbig C., Prevedel D., Deeter M.N., Warner J., Ziskin D.C., Khattatov B., Francis G.L., Yudin V., Ho S., Mao D., Chen J., Drummond J.R.* Identification of CO plumes from Mopitt data: Application to the August 2000 Idaho-Montana forest fires // *Geophys. Res. Lett.* 2003. V. 30. N 13. P. 21/1–21/4.
  37. *Lynch J.A., Clark J.S., Bigelow N.H., Edwards M.E., Finney B.P.* Geographic and temporal variations in fire history in boreal ecosystems of Alaska // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 8/1–8/17.
  38. *Michalek J.L., French N.H.F., Kasischke E.S., Johnson R.D., Colvell J.F.* Using Landsat TM data to estimate carbon release from burned biomass in an Alaskan spruce complex // *Int. J. Remote Sens.* 2000. V. 21. P. 323–338.
  39. *O'Neil K.P., Kasischke E.S., Richter D.D.* Seasonal and decadal pattern of carbon uptake and emission along an age sequence of burned black spruce stands in interior Alaska // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 11/1–11/15.
  40. *Shvidenko A.Z., Nilsson S.* Extent, Distribution and ecological role of fire in Russian forests // *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest* / Edited by E.S. Kasischke and B.J. Stocks. New York: Springer-Verlag, 2000a. P. 132–150.
  41. *Shvidenko A.Z., Nilsson S.* Fire and the carbon budget of Russian forests // *Fire, Climate Change, and Carbon Cycling in the Boreal Forest* / Edited by E.S. Kasischke and B.J. Stocks. New York: Springer-Verlag, 2000b. P. 289–311.
  42. *Smith W.K., Kelly R.D., Welker J.M., Fahnestock J.T., Reiners W.A., Hunt E.R.* Leaf-to-aircraft measurements of net CO<sub>2</sub> exchange in a sagebrush steppe ecosystem // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 3. P. ACH15/1–ACH15/9.
  43. *Smith J.A., Baker M.B., Weinman J.A.* Do forest fire affect lightning? // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 2003. V. 129. Part B. N 593. P. 2651–2670.
  44. *Stocks B.J., Mason J.A., Todd J.B., Bosch E.M., Wotton B.M., Amiro B.D., Flannigan M.D., Hirsch K.G., Logan K.A., Martell D.L., Skinner W.R.* Large forest fires in Canada, 1959–1998 // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 5/1–5/12.

45. *Suni T., Berninger F., Markkanen T., Keronen P., Rannik Ü., Vesala T.* Interannual variability and timing of growing-season CO<sub>2</sub> exchange in a boreal forest // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 9. P. ACL2/1–ACL2/8.
46. *Veblen T.T., Baker W.L., Montenegro G., Swetnam T.W. (Eds.)* Fire and Climatic Change in Temperate Ecosystems of the Western Americas. Springer for Science, the Netherlands, 2003. XVIII+444 p.
47. *Wang C., Bond-Lamberty B., Gower S.T.* Soil surface CO<sub>2</sub> flux in a boreal black spruce fire chronosequence // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 3. P. WFX5/1–WFX5/8.
48. *van der Werf G.R., Randerson J.T., Collatz G.J., Giglio L., Kasibhatla P.S., Arellano A.F., Jr., Olsen S.C., Kasischke E.S.* Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño / La Niña period // *Science.* 2004. V. 303. N 5654. P. 73–76.
49. *West P.W.* Tree and Forest Measurement. Springer for Science, the Netherlands, 2004. XII+167 p.
50. *Wurzler S., Simmel M., and the EFEU-Team.* Impact of vegetation fires on composition and circulation of the atmosphere (EFEU) // *AFO–2000 Newsletter.* 2003. N 5. P. 11–14.
51. *Yoshikawa K., Bolton W.R., Romanowsky V.E., Fukuda M., Hinzman L.D.* Impacts of wildfire on the permafrost in the boreal forests of Interior Alaska // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 4/1–4/14.
52. *Zhang Q., McGuire A.D., O'Neill K.P., Harden J.W., Romanowsky V.E., Yarie J.* Modeling soil thermal and carbon dynamics of a fire chronosequence in interior Alaska // *J. Geophys. Res. D.* 2003. V. 108. N 1. P. 3/1–3/26.

*K.Ya. Kondratyev, Al.A. Grigor'ev.* **Forest fires as a component of natural ecodynamics.**

This review of the problems of forest fires (mostly of natural origin) includes analysis of not only the conditions and scales of forest fires, but also their effect on the environment, showing itself as changes in the surface properties and surface processes, as well as variations of the atmospheric chemical composition. Emphasis is placed on the effect of forest fires on the carbon cycle, as well as the role of forest fires as a factor of environmental dynamics.