

## ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ПОЖАРОВ В ЛИСТВЕННИЧНЫХ ЛЕСАХ СЕВЕРНОЙ ТАЙГИ СРЕДНЕЙ СИБИРИ

© 2005 г. В. И. Харук\*, М. Л. Двинская\*, К. Дж. Рэнсон\*\*

\* Институт леса СО РАН

660036 Красноярск, Академгородок

\*\* Годдардский центр НАСА, США

Поступила в редакцию 24.02.2004 г.

Рассмотрена периодичность пожаров в лиственничниках Эвенкии, их взаимосвязь с элементами ландшафта. Анализировались спилы с пожарными “подсушинами”, полученные на 72 пробных площадях; хронология пожаров охватывала XV–XX вв. Величины межпожарного интервала (МПИ) рассчитывали в двух вариантах: I – только по пожарным подсушинам; II – по пожарным подсушинам и началу роста поколения лиственницы, возникшего после наиболее раннего пожара. МПИ зависит от орографии места произрастания и составляет  $86 \pm 11$  ( $105 \pm 12$ ) лет для северо-восточных склонов,  $61 \pm 8$  ( $73 \pm 8$ ) – для юго-западных,  $139 \pm 17$  ( $138 \pm 18$ ) – для болот и  $68 \pm 14$  ( $70 \pm 13$ ) – для равнин. Средняя величина МПИ равна  $82 \pm 7$  и  $95 \pm 7$  лет соответственно для вариантов I и II. Скорость повышения уровня вечной мерзлоты после пожара составляет в среднем 0.3 см/год. Показано, что в среднем число пожаров достигает максимума с циклическостью 36 и 82 года. В частоте пожаров наблюдается временной тренд: в XIX в. МПИ был равен ~100 годам, в XX в. – 65.

*Ключевые слова:* лиственничники, гари, периодичность пожаров, вечная мерзлота, климатические тренды.

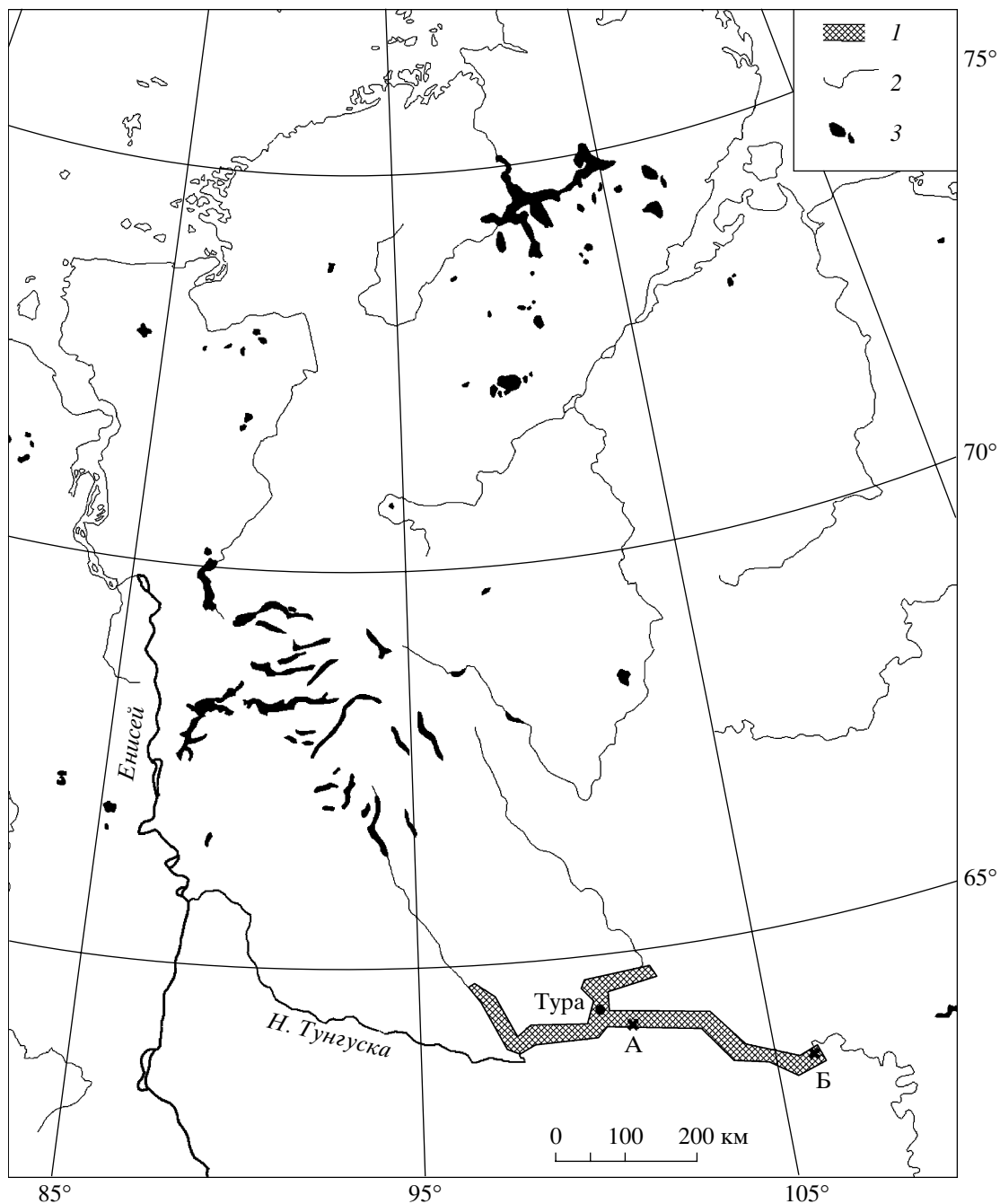
Лиственничники занимают территорию около 270 млн. га (преимущественно в криолитозоне) и рассматриваются как зона “стока” углерода. Однако возрастание температуры в высоких широтах (IPCC..., 2001) и, как одно из следствий, повышение частоты пожаров может перевести эти территории в зону эмиссии CO<sub>2</sub> и других парниковых газов.

Возникновение пожаров, их интенсивность и цикличность, причиняемый ущерб, площадь гарей связаны с орографией территории. Характеристики рельефа (экспозиция, крутизна склонов и высота над ур. м.) играют важную роль в возникновении и интенсивности лесных пожаров. Экспозиция и крутизна склона значительно влияют на уровень увлажнения территории, так как наветренные склоны получают большее количество осадков, и вода, не задерживаясь на крутых склонах, накапливается в пониженных элементах рельефа. От экспозиции и крутизны склонов зависит также высыхание лесных горючих материалов. С высотой над уровнем моря связан вертикальный климатический градиент, влияющий на пожароопасность. Приуроченность пожаров к элементам рельефа вербально была сформулирована ранее (Курбатский, 1962); количественный подход к проблеме использован на примере гарей о. Сахалин (Харук и др., 2004б).

Цель данной работы – исследовать цикличность пожаров в лиственничниках Эвенкии, формализовать взаимосвязь локализации гарей с элементами ландшафта.

### МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследовались лиственничники Эвенкии; на рис. 1 представлена зона сбора наземных данных. По лесорастительному районированию территория Эвенкии относится в основном к Ангаро-Тунгусской лесорастительной провинции таежных лесов. В Нижне-Тунгусском округе северо-таежных светлохвойных лесов более 80% покрытой лесом площади занято древостоями из лиственницы Гмелина (*Larix gmelinii*) V класса бонитета (остальная площадь представлена березняками). Климат резко континентальный; среднегодовые температуры изменяются в интервале –8...–14°C, в теплый период выпадает 200–250 мм осадков. Большая часть территории представляет собой плато с максимальными высотами до 900 м. Лесные пожары на рассматриваемой территории, за редким исключением, низовые, что обусловлено разреженностью древостоев. Периодические пожары приводят к формированию разновозрастных древостоев из двух-четырех поколений деревьев или возникновению одновозрастных лиственничных молодняков (Abaimov et al., 2002).



**Рис. 1.** Схема наземных обследований: 1 – зона наземных обследований, 2 – гидросеть, 3 – озера.

В работе использовались материалы наземных обследований, дистанционного зондирования (снимки Landsat, NOAA/AVHRR), 3D цифровые топокарты (М 1 : 1000000), а также карта растительного покрова Евразии, полученная на основе анализа снимков SPOT VEGETATION (<http://www.gvm.sai.jrc.it/glc2000/Products/fullproduct.asp>). Наземные обследования были выполнены в 2001–2002 гг. При их планировании применяли снимки Landsat, по которым дешифрировали гари

и контрольные участки. Обследовалась территория, расположенная в широтном направлении между 63° и 65° с.ш. и в меридиональном – между 95° и 107° в.д. (см. рис. 1). Заложено 78 временных пробных площадей (ПП) согласно методике, описанной в “Инструкции ...” (1995). На каждой ПП определяли характеристики рельефа (высота над ур.м., экспозиция, угол уклона), описывали тип растительного покрова и фитоценоза, видовой состав древостоя, средние диаметр и высоту дере-

вьев, экзогенные воздействия (пожары, рубки), возобновление древесных видов, кустарниковый ярус, мертвый и живой напочвенный покров, тип почвы. Глубину оттаивания мерзлоты измеряли во второй и третьей декадах августа с помощью стального щупа либо по почвенному разрезу; за уровень отсчета принималась поверхность почвы. Для анализа динамики радиального прироста лиственницы на ряде ПП, где пожары отсутствовали за длительный (>200 лет) промежуток времени, брали спилы деревьев по методике, описанной Е.А. Вагановым и М.К. Арбатской (1996). Координаты центра каждой ПП фиксировали прибором GPS "Garmin-12" с точностью +/-15 м, и спиливали 3–6 деревьев с пожарными подсушинами. Несмотря на циклические пожары, отдельные деревья достигают значительного (до 400 лет) возраста; обычно они несут на себе наибольшее количество пожарных следов. Эти следы (подсушины) использовали для датировки пожара путем подсчета годичных колец на спиле. Древесина лиственницы в исследуемом регионе отличается, как правило, мелкослойностью, однако на точность датировки это не оказывало влияния, поскольку узкие годичные кольца четко идентифицируются под микроскопом.

Точность датировки оценивали повторным подсчетом числа годичных колец. Из ~300 спилов, использованных в анализе, только для 41 точность датировки была не абсолютной ( $4 \pm 1.5$  г). Ошибка обусловлена тем, что за послепожарной подсушиной возможно выпадение годичного кольца; в некоторых случаях подсчет затрудняла поврежденность древесины гнилью. Известно (Фурьев, 1996), что точность датировки может зависеть от времени возникновения пожара ("весенний", или раннелетний, и "осенний", или позднелетний, пожары): ко времени возникновения осеннего пожара годичное кольцо уже обычно сформировано. Однако в исследуемом регионе большинство пожаров приходится на июнь–июль (Sofronov et al., 1999). Точность датировки пожаров оценивали сопоставлением их с данными Авиалесоохраны по Эвенкии: наблюдается высокий уровень корреляции ( $r = 0.76$ ) между этими данными и выборкой в зоне наземных обследований (рис. 2).

Для перекрестной датировки пожаров за период с 1980 г. по 2000 г. использовали также временные ряды съемок со спутника NOAA/AVHRR; последние были представлены в виде значений NDVI (нормализованный вегетационный индекс), усредненных по времени (два значения в месяц) и величине пиксела ( $8 \times 8$  км). Гари выделялись на фоне контрольных точек по более низким значениям NDVI; для отделения сплошных гарей от территорий, пройденных низовым пожаром без повреждения верхнего полога, анализировали данные по NDVI в последующие годы.

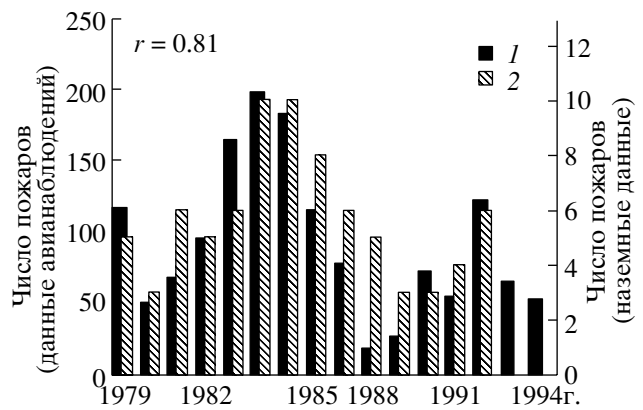


Рис. 2. Частота пожаров в Эвенкии по данным авианаблюдений (1) и наземным обследованиям (2).

Наряду с живыми анализировали погибшие под воздействием пожаров деревья, что позволяло удлинить хронологию пожаров. При этом использовалась перекрестная датировка, т.е. точная привязка последних двух подсушин как на живых, так и на погибших деревьях (отметим, что в отдельных случаях точная датировка была выполняема и при совпадении по одной подсушине; например, если дерево погибло в результате наиболее позднего пожара).

Величину межпожарного интервала (МПИ) рассчитывали в двух вариантах: I – расчет выполнялся только по подсушинам на живых деревьях и сухостое; II – вариант I дополняли датировкой наиболее раннего пожара на данной ПП. Известно, что поколение, возникшее после пожара, имеет значимо более высокий прирост по сравнению с поколением, возникшим до пожара. Анализ динамики радиального прироста и был использован для определения даты возникновения послепожарного поколения.

Таким образом, датировка наиболее ранних (по временной шкале) пожаров производилась по дате возникновения послепожарного поколения. При этом вводилась поправка на время возникновения нового поколения на гари: на основе наших наблюдений было принято, что первая генерация подростка на гари возникает в среднем через  $3 \pm 2$  года после пожара. Отметим, что послепожарное ускорение роста типично и для выживших после пожара угнетенного подростка и отдельных деревьев (включая поврежденные): на спиле четко прослеживается зона увеличенного радиального прироста. Межпожарный интервал рассчитывали по формуле  $D_i - D_{i-1}$ , где  $D_i, D_{i-1}$  – даты  $i$ -го и  $i-1$ -го пожаров. При анализе временных трендов в цикличности пожаров МПИ относился к году, соответствующему середине интервала. Для подсчета цикличности пожаров каждому календарному году в исследуемый период (с 1410 г. по 2000 г.)

**Таблица 1.** Значения МПИ для различных элементов рельефа по вариантам I и II

Элемент рельефа	МПИ, лет		Величина выборки (ПП)	
	I	II	I	II
ЮЗ склоны	61 ± 8	73 ± 8	11	16
СВ склоны	86 ± 11	105 ± 12	13	16
Болота	139 ± 17	138 ± 18	7	9
Равнины	68 ± 14	70 ± 13	7	7
Все ПП	82 ± 7	95 ± 7	38	48

**Таблица 2.** Достоверность различий МПИ

Элемент рельефа	Вариант I				Вариант II			
	ЮЗ	СВ	Болота	Равнины	ЮЗ	СВ	Болота	Равнины
ЮЗ								
СВ	0.93				0.97			
Болота	0.99	0.99			0.99	0.86		
Равнины	0.33	0.68	0.99		0.15	0.95	0.99	
Все ПП	0.66	0.23	0.99	0.57	0.96	0.52	0.97	0.9

присваивалось значение, соответствующее числу пожаров в данный год. Полученный ряд был пройден фильтром “скользящее окно” размером 11 лет, что позволило сгладить флуктуации. Для определения периодов “пожарной активности” выполнен спектральный анализ полученных данных (разложение в ряд Фурье).

Анализ взаимосвязи гарей с характеристиками рельефа был основан (1) на данных наземного обследования и (2) на 3D цифровой карте М 1 : 1000 000, представляющей собой матрицу значений высот с 30-секундным разрешением по широте и долготе (<http://www.ngdc.noaa.gov/seg/topo/globeget.sht>). Распределение площадей гарей рассчитывали для склонов различных экспозиций [северных (315°–45°), восточных (45°–135°), южных (135°–225°) и западных (225°–315°) склонов, а также юго-западного (135°–315°) и северо-восточного (315°–135°) направлений], болот и равнин. К равнинам (плакоры, дренированные приречные террасы) были отнесены территории с величиной уклонов 0°...2°. В целом по пробным площадям крутизна склонов варьировала в интервале от 0° до 20°.

При анализе данных, наряду с регрессионным анализом, использовался непараметрический тау-параметр ( $T$ ) Кендалла (StatSoft, Inc. 2003). Параметр  $T$  принимает значения в интервале  $[-1, +1]$  и вычисляется по следующей формуле:  $T = (\text{число}$

совпадений – число несовпадений)/(общее число сравниваемых пар); нулевое значение тау соответствует отсутствию корреляции; +1, –1 – полная синхронности и асинхронности сравниваемых рядов.

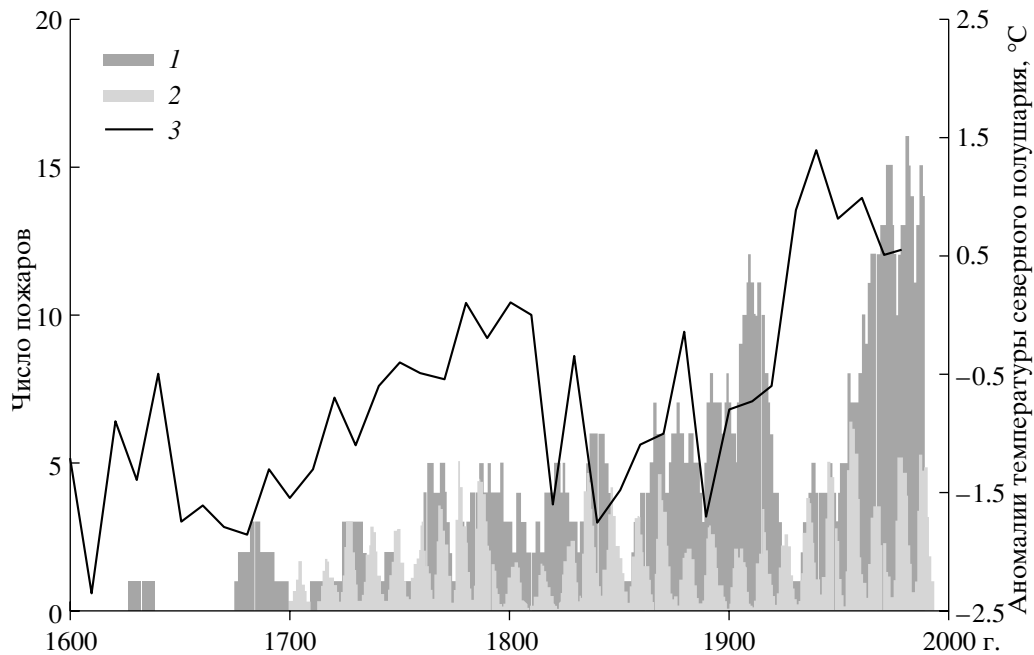
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

**Цикличность пожаров.** На всех заложенных пробных площадях лиственничники были пирогенного происхождения. Для оценки средней площади ежегодно возникающих гарей использовали упомянутые выше данные SPOT VEGETATION за период 1996–2000 гг. Анализируемая территория охватывала зону доминирования лиственницы в азиатской части России (~220 млн. га, или ~80% площади всех лиственничников). Установлено, что с 1996 по 2000 гг. ежегодно в гари в среднем переводилось 0.25% лесной территории. Следует отметить, что эти данные являются приближенной оценкой, поскольку методика определения площади гарей, а также их возраста по данным SPOT VEGETATION требует дальнейшей разработки. Данные по величинам МПИ (расчет выполнен для периода с 1410 по 2002 гг.), показывают (табл. 1), что периодичность пожаров в лиственничниках связана с орографией территории.

Различия величин МПИ между юго-западными и северо-восточными склонами значимы при  $p > 0.1$ ; значения для болот отличаются от суходолов на уровне  $p > 0.01$  (табл. 2). При расчете МПИ только по пожарным подсушинам (вариант I) значения МПИ меньше и составляет в среднем  $82 \pm 7$  года. Вероятная причина различий между вариантами расчета – временной тренд в значениях межпожарного интервала (что обсуждается ниже). Средние значения МПИ, рассчитанные по варианту I, близки к данным И.П. Панюшкиной и М.К. Арбатской (1999), полученным для нижнего течения р. Н. Тунгуска:  $82 \pm 48$  лет. Согласно Г.А. Ивановой (1996), периодичность пожаров в Центральной Эвенкии составляет 90 лет (минимальные значения – 61 год, максимальные – 120 лет). Высокая дисперсия МПИ в цитируемых работах есть следствие усреднения величин МПИ без учета ландшафтной приуроченности гарей.

**Циклы подверженности пожарам.** На рис. 3 приведена гистограмма распределения пожаров по годам для всего исследуемого временного интервала (1410–2000 гг). Максимальное количество пожаров наблюдалось в следующие годы: 1620–1630, 1650–1660, 1680–1690, 1720–1730, 1760–1770, 1790–1800, 1820–1840, 1870–1880, 1890–1900, 1910–1920, 1940–1950, 1960–1985 и 1990–1995.

Фурье-анализ данных рис. 3 позволил выделить малый (36 лет) и большой (82 года) циклы пожарной опасности (рис. 4). Первый из них бли-



**Рис. 3.** Распределение числа пожаров по годам (1), аномалии июнь-июльских температур для северо-востока Сибири (2) (Panushkina et al., 1999), севера Евразии (3) (Наурызбаев и др., 2003) и аномалии средних температур северного полушария (4) (Mann et al, 2003).

зок к циклу Брикнера (средняя продолжительность которого 35 лет), второй, возможно, связан с вековым (60–120 лет) солнечным циклом. На экосистемном уровне малому циклу соответствуют слабые, длительному – сильные (“породосменные”) пожары. Аналогичные циклы установлены для динамики радиального прироста листовенницы. Влияние пожаров было исключено отбором образцов в древостоях, не затронутых пожарами в течение более 200 лет. Указанный феномен обусловлен лимитирующим воздействием летних температур на радиальный прирост (Ваганов Е.А., Арбатская, 1996); в то же время повышение температуры благоприятствует возникновению пожаров. Это подтверждается обратной зависимостью между частотой пожаров и вариабельностью ширины годичных колец для древостоев, подверженных периодическим пожарам (Swetnam, 1996).

**Временные тренды пожарной опасности.** В динамике пожаров наблюдается временной тренд: возрастание частоты пожаров и уменьшение межпожарного интервала в XX столетии по сравнению с XIX (рис. 5а, 5б). Представленные на рис. 5 данные “выравнены”, т.е. рассматривались только те деревья, возраст которых превышал 200 лет; данные рассчитывались только по пожарным подсушинам (вариант I). Временной тренд для частоты пожаров значим при  $p > 0.1$ ; для МПИ он отличен от нуля ( $p > 0.2$ ). Средние величины межпожарных интервалов в XIX и

XX столетиях приведены в табл. 3. Видно снижение средней величины МПИ в XX столетии: со  $101 \pm 12$  до  $65 \pm 6$  лет; различия средних значений всех ПП достоверны на уровне  $p > 0.01$ , для болот на уровне  $p > 0.2$ . Различия в величинах МПИ между остальными элементами рельефа незначимы.

**Взаимосвязь частоты пожаров с аномалиями температуры.** Возрастание частоты пожаров происходит на фоне значимого ( $p > 0.05$ ) тренда температур в XX столетии (см. рис. 3). Для оценки взаимосвязи этих переменных использованы реконструкции летних температур на региональном (северо-восток Сибири: Panushkina et al., 2003),

**Таблица 3.** Средние величины МПИ в XIX и XX вв.

Элемент рельефа	МПИ, лет	Величина выборки (ПП)
XIX век		
ЮЗ склоны	$93 \pm 29$	3
СВ склоны	$109 \pm 25$	6
Болота	$125 \pm 20$	6
Все ПП	$101 \pm 12$	20
XX век		
ЮЗ склоны	$58 \pm 8$	11
СВ склоны	$74 \pm 11$	11
Болота	$81 \pm 27$	4
Все ПП	$65 \pm 6$	30

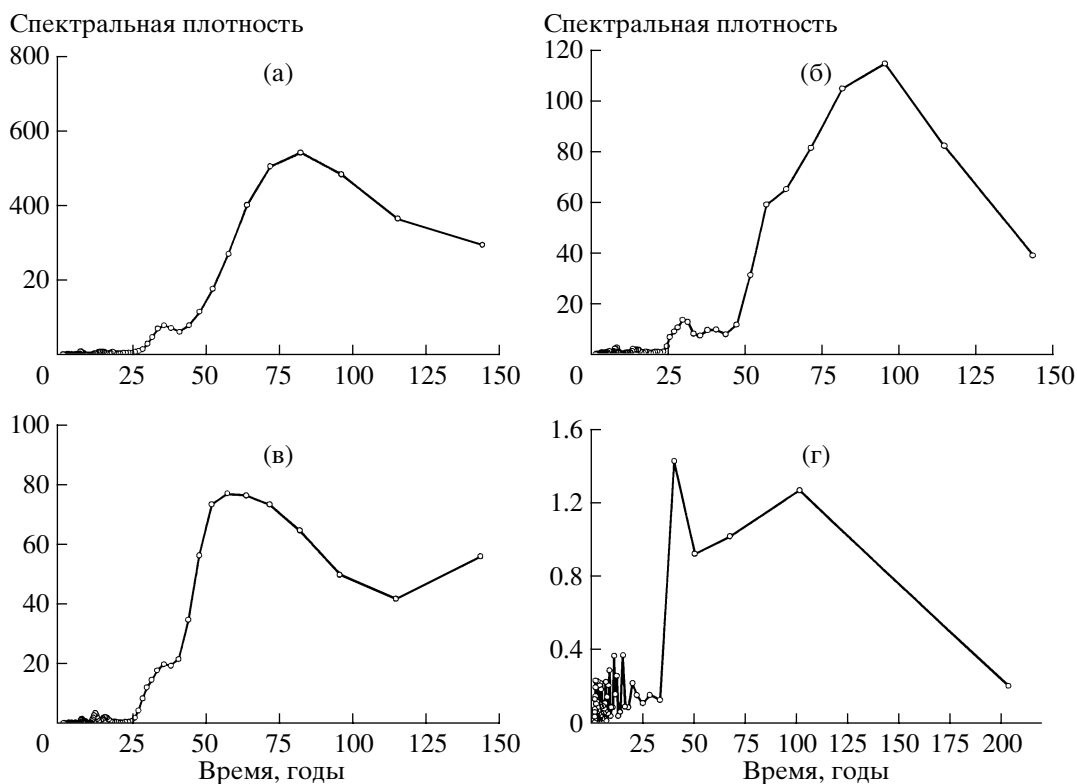


Рис. 4. Фурье-спектры периодичности пожаров (а – все ПП, б – СВ склоны, в – ЮЗ склоны) и величины радиального прироста лиственницы (г).

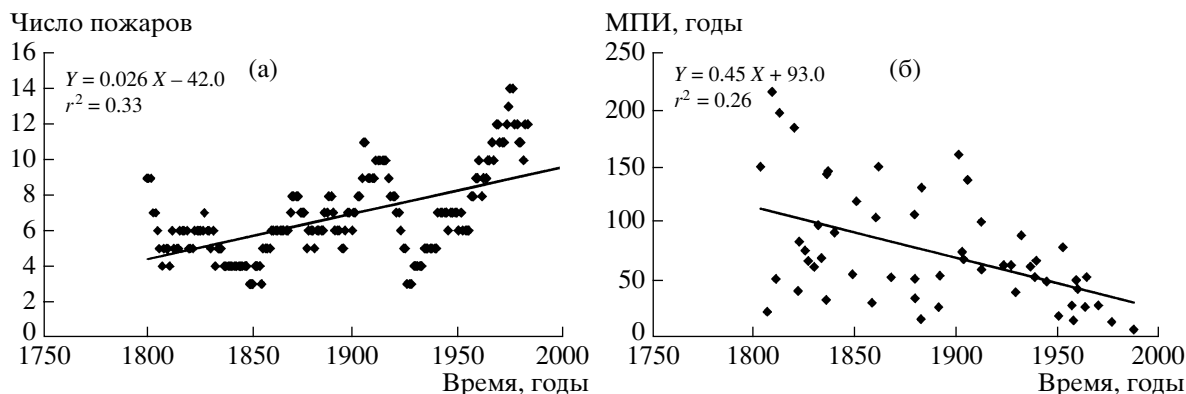
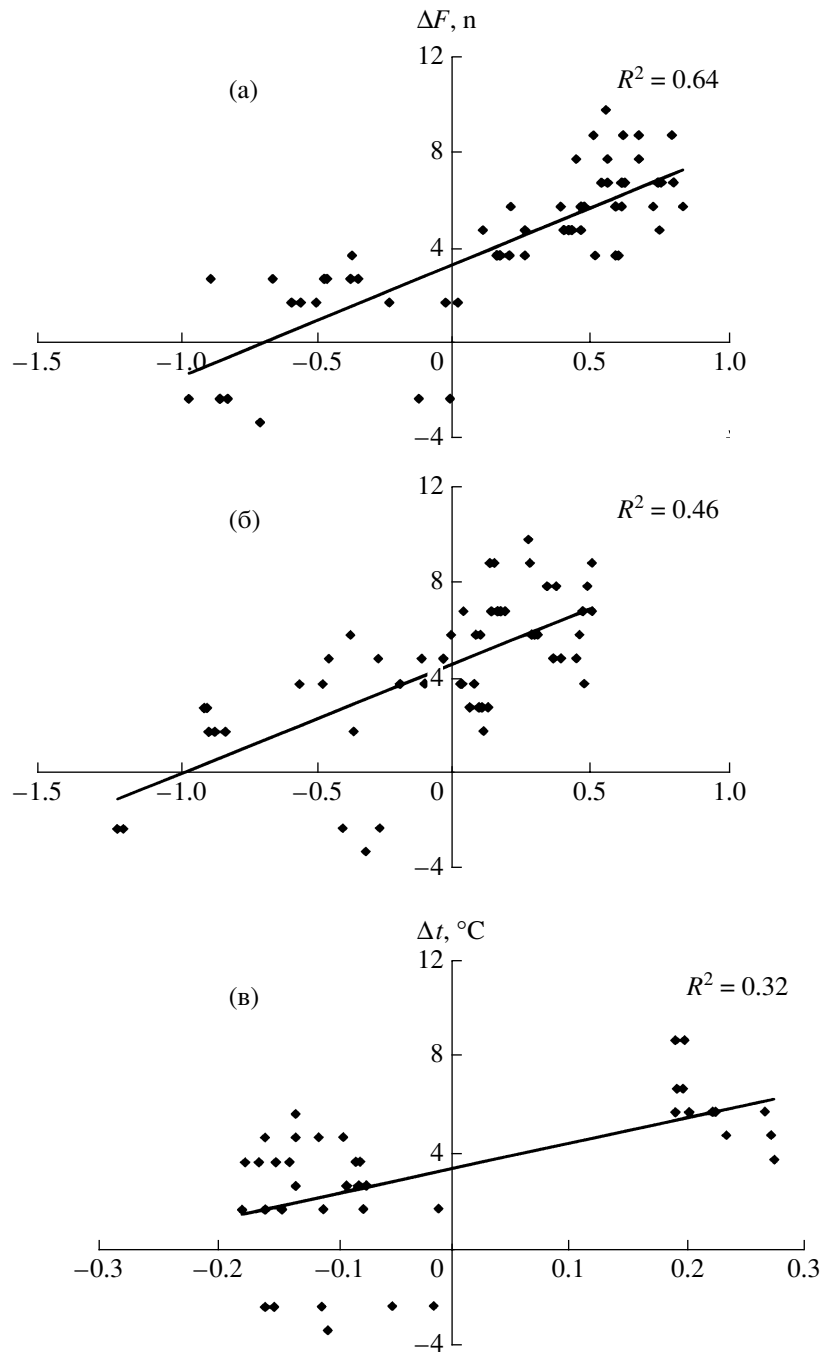


Рис. 5. Временные тренды частоты пожаров (а) и величин межпожарного интервала (б) в XIX–XX столетиях.

субглобальном (север Евразии: Наурузбаев и др., 2003), и глобальном (средние температуры северного полушария: Mann et al., 2003) уровнях. Установлена значимая связь частоты пожаров с региональными температурами:  $Rns = 0.44$ ,  $Tns = 0.23$ ,  $p > 0.01$ , где  $Rns$ ,  $Tns$  – коэффициент кросс-корреляции и  $t$ -параметр Кендалла (на субглобальном и глобальном уровнях связи незначимы). Дальнейший анализ был основан на учете катастрофических пожаров 1914–1916 гг., охвативших не только Центрально-Тунгусскую провинцию, но и

весь сибирский регион (Красноярский..., 1961; Леви и др., 2003). Вслед за этой экологической катастрофой (леса были уничтожены на площади  $\sim 160000 \text{ км}^2$ ), несмотря на положительный температурный тренд, происходит уменьшение числа пожаров, обусловленное изъятием горючих материалов предшествовавшими пожарами (см. рис. 3). Аналогичное явление наблюдается после максимума пожаров, соответствующего  $\sim 1846$  г.

Также отмечена (Bessie, Johnson, 1995; Swetnam, Vaisan, 1996) значимость запасов горючих



**Рис. 6.** Зависимость частоты пожаров ( $\Delta F, n$ ) от аномалий июнь-июльских температур ( $\Delta t, ^\circ C$ ) для северо-востока Сибири (а) (Panushkina et al., 1999), севера Евразии (б) (Наурызбаев и др., 2003) и средних температур северного полушария (в) (Mann et al., 2003).

материалов в возникновении пожаров. Длительность периода “рефрактерности” соответствует минимальному (~25 лет) времени накопления горючих материалов для последующего пожара; указанный временной интервал был исключен из дальнейшего анализа. После коррекции статистики приняли следующие значения:  $Rns = 0.67$ ,  $Rna = 0.43$ ,  $Rnh = 0.37$ ;  $p > 0.99$ ;  $Tns = 0.48$ ,

$Tna = 0.35$ ;  $p > 0.05$ , где  $Rna$ ,  $Rnh$  – коэффициенты кросс-корреляции для регионального и глобального уровней,  $Tna$  –  $\tau$ -параметр для регионального уровня.

На заключительном этапе анализировалась связь между аномалиями пожаров ( $>\sigma$ ) и температурой. Представленные на рис. 6 данные рассчитаны для XIX и XX столетий отдельно, что мини-

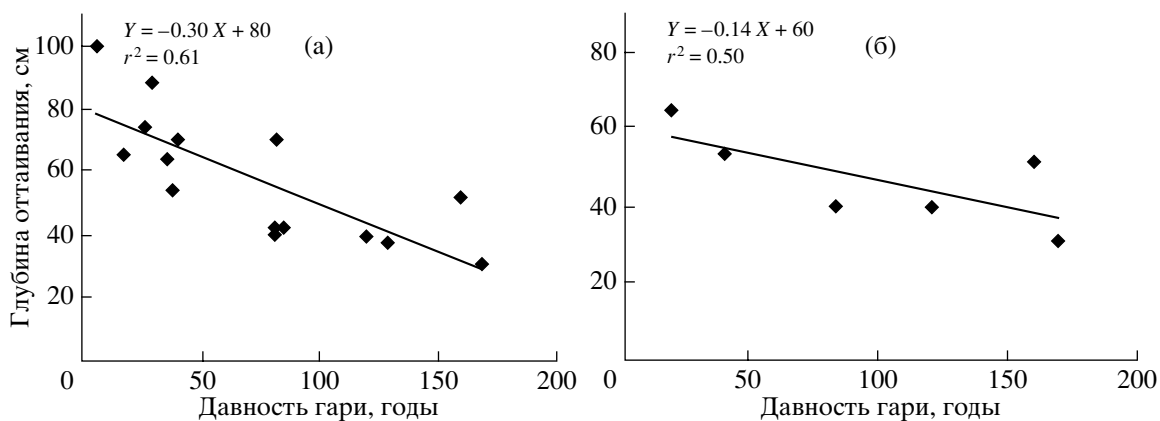


Рис. 7. Динамика величины сезонного оттаивания почвогрунтов в зависимости от возраста гари для всех ПП (а) и болот (б).

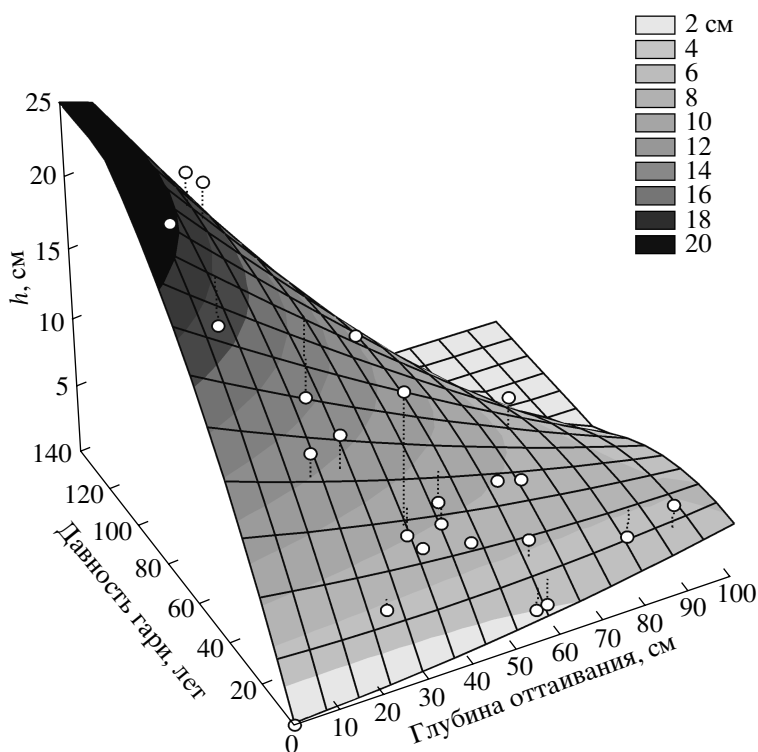


Рис. 8. Зависимость между толщиной мохово-лишайникового покрова ( $h$ ), возрастом гари и глубиной оттаивания почвы.

мизирует влияние временных трендов частоты пожаров (см. рис. 3). Как следует из рис. 6, между аномалиями пожаров и температурой наблюдается более тесная связь, чем при анализе общего числа пожаров. Коэффициенты корреляции последовательно возрастают при переходе от глобального ( $Rnh^2 = 0.32$ ) к субрегиональному ( $Rna^2 = 0.46$ ) и региональному ( $Rns^2 = 0.64$ ) уровням ( $p > 0.01$ ).

**Воздействие пожаров на вечную мерзлоту.** Динамика глубины оттаивания на гаях приведена

на рис. 7 (данные получены для периода наиболее полного оттаивания почвогрунтов, т.е. второй половины августа). В процессе увеличения давности гари наблюдается снижение средней глубины оттаивания с 80–100 см (~60 см для болот) до ~30 см через 180 лет. Представленные на рис. 6 данные позволяют оценить скорость повышения уровня мерзлоты после пожара; в среднем она составляет  $0.3 \pm 0.064$  см/год, для болот эта величина ниже и равна  $0.14 \pm 0.069$  см/год. Это обусловлено возрастанием толщины теплоизолятора – мохо-



во-лишайникового покрова (рис. 8). Скорость роста последнего оценивается величиной  $0.07 \pm 0.014$  см/год. Согласно некоторым оценкам, время восстановления высоты мохово-лишайникового покрова до допозарного уровня составляет 30–50 лет (Sofronov et al., 1999), что превышает полученные нами данные. Мохово-лишайниковый покров (вместе с торфянистым горизонтом) при высыхании превращается в горючий материал, создающий в засушливые периоды условия для возникновения устойчивых пожаров на обширных территориях, охватывающих миллионы гектаров. Отметим, что увеличение послепожарной глубины оттаивания почвогрунтов является одной из причин ускоренного роста выживших после пожара деревьев; длительность этого периода составляет, по нашим оценкам, 10–30 лет. Последующее повышение уровня мерзлоты ограничивает развитие корневой системы древесных растений в поверхностном слое (30 см и менее). Поэтому, несмотря на то, что ствол лиственницы защищен толстой коркой, повреждение низовыми пожарами ее корневой системы приводит к усыханию древостоев.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пожары – неотъемлемый элемент лесных территорий с преобладанием лиственницы: все обследованные лиственничники (общая протяженность маршрутов >1000 км) были пирогенно происхождения. Величины межпожарных интервалов в лиственничниках зависят от рельефа, варьируя от  $61 \pm 8$  лет для юго-западных склонов до  $139 \pm 17$  лет для болот (по другому варианту расчета – от  $73 \pm 8$  до  $138 \pm 18$  лет).

В частоте пожаров наблюдается временной тренд: время “оборота огня” в XX в. сократилась примерно на 1/3 по сравнению с XIX в. Этот феномен есть результирующая (1) антропогенной и (2) природной составляющих. Первая составляющая (геолого-разведочные работы) сказывалась преимущественно в 40–80-х годах прошлого столетия; однако в последние 15 лет этот фактор практически прекратил действовать. В пользу ведущей роли природной составляющей указывают следующие факты. Плотность населения в исследуемом регионе мала (<0.03 чел/км<sup>2</sup>); при этом даже в наиболее населенной части Эвенкии (~8% от общей площади лесов) грозовые разряды являются причиной пожаров ~45% пожаров и до 90% – на остальной части территории (Схема..., 2001; Иванов, Иванова, 2004). Этому способствует высокая эффективность молниевых разрядов в криолитозоне: вследствие скачка электропроводности на границе с мерзлотным энергия высвобождается в узком (<30 см) корнеобитаемом слое.

Вследствие прогнозируемого возрастания температуры воздуха в высоких широтах (на 4–6°C к

2100 г; Gordon et al., 2000) следует ожидать дальнейшего сокращения МПИ (нижняя граница которого в настоящее время составляет ~25 лет) и трансформации северных лиственничников из зоны стока углерода в источник парниковых газов.

Возрастание частоты пожаров может способствовать сохранению доминирования лиственницы, поскольку в криолитозоне, несмотря на защищенность ствола лиственницы толстой коркой (до 20% объема ствола), основной причиной ее послепожарного усыхания является повреждение огнем корневой системы, “спрессованной” в узком верхнем горизонте почвогрунтов. С возрастанием глубины корнеобитаемого слоя следует ожидать увеличения резистентности лиственницы: известно, что вне зоны вечной мерзлоты она является наиболее огнестойким видом.

Возрастание частоты пожаров оказывает влияние на видовое разнообразие северных ландшафтов. Накапливаются свидетельства экспансии “вечнозеленых хвойных” (ель, кедр, пихта) в зону доминирования лиственницы, на связь этого феномена с повышением температуры в высоких широтах и динамикой пожаров. Гари представляют собой “стартовые площадки” для миграции указанных выше видов в традиционную среду преобладания лиственницы, поскольку на горяч возрастает глубина сезонного оттаивания почвогрунтов, улучшаются радиационный режим, условия минерального питания и дренажа. Лиственница в свою очередь на крайнем пределе своего произрастания увеличивает сомкнутость древостоев и продвигается в зону тундры (Kharuk, Fedotova, 2003; Харук и др., 2004а). Результатом этого процесса может стать достижение лиственницей побережья Арктики – феномена, наблюдавшегося в голоцене, тогда как часть традиционной зоны лиственничников будет представлена видами, характерными для средней и южной тайги.

Работа поддержана грантами РФФИ (№ 03-05-65333б и 05-04-97714).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ваганов Е.А., Арбатская М.К. История климата и частота пожаров в центральной части Красноярского края. 1. Климатические условия сезона роста и распределение пожаров в сезоне. // Сиб. экологич. журн. 1996. Т. 3. № 1. С. 9–18.
- Иванов В.А., Иванова Г.А. Пожарные режимы в лесах Средней Сибири // Управление лесными пожарами на экорегиональном уровне. Мат-лы Международного научно-практического семинара (9–12 сентября 2003 г.). М.: Алекс, 2004. С. 147–150.
- Иванова Г.А. Экстремальные пожароопасные сезоны в лесах Эвенкии // Сиб. экологич. журн. 1996. Т. 3. № 1. С. 29–34.
- Инструкция по проведению лесоустройства в лесном фонде России. М.: ВНИИЦлесресурс, 1995. 174 с.

- Красноярский край / Под ред. Кириллова М.В., Щербакова Ю.А. Красноярск: Красноярское кн. изд-во, 1961. 404 с.
- Курбатский Н.П. Техника и тактика тушения лесных пожаров. М: Наука, 1962. 153 с.
- Леви К.Г., Задонина Н.В., Бердникова Н.Е. и др. Современная геодинамика и гелиодинамика. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2003. 383 с.
- Наурзбаев М.М., Ваганов Е.А., Сидорова О.В. Изменчивость приземной температуры воздуха на севере Евразии по данным тысячелетних древесно-кольцевых хронологий // Криосфера Земли. 2004. Т. 7. № 2. С. 84–91.
- Панюшкина И.П., Арбатская М.К. Дендрохронологический подход в исследовании горимости лесов Эвенкии // Сиб. экологич. журн. 1999. Т. 6. № 2. С.167–173.
- Схема организации и развития авиационной охраны лесов от пожаров по Эвенкийскому автономному округу. М.: Росгипролес, 2001. 103 с.
- Фуряев В.Н. Роль пожаров в процессе лесообразования. Новосибирск: Наука, 1996. 252 с.
- Харук В.И., Щербинина И.С., Якубайлик О.Э. и др. Гари о. Сахалин: анализ пространственного распределения на основе ГИС-технологий // Лесоведение. 2004а. № 5. С. 66–72.
- Харук В.И., Им С.Т., Рэнсон К. Дж. и др. Временная динамика лиственницы в экотоне лесотундры // ДАН. 2004б. Т. 398. № 3. С. 404–408.
- Abaimov A.P., Zyryanova O.A., Prokushkin S.G. Long-term investigations of larch forest in criolitic zone of Siberia: brief history, recent results and possible changes under global warming // Eurasian J. Forest Research. 2002. V. 7 № 2. P. 95–106.
- Bessie W.C., Johnson E.A. The relative importance of fuels and weather on fire behavior in subalpine forests. // Ecology. 1995. V. 76. P. 747–762.
- Gordon C., Cooper C., Senior C. et al. The simulation of SST, sea-ice extents and ocean heat transport in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments // Climate Dynamics. 2000. V. 16. P. 147–168.
- <http://www.gvm.sai.jrc.it/glc2000/Products/fullproduct.asp>.
- <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/topo/globeget.sht>.
- IPCC third Assessment Report. V. 1. Climate change 2001. The Scientific Basis. Cambridge University Press, 2001. 881 p.
- Kharuk V.I., Fedotova E.V. Forest-tundra ecotone dynamics // Arctic environment variability in the context of global change / K.Y. Kondratyev, O.M. Johannessen, L.P. Bobylev (eds.). Heidelberg: Springer-Practice, 2003. P. 281–299.
- Mann M.E., Jones P.D. Global Surface Temperatures over the Past Two Millennia // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. № 15. P. 1820.
- Panyushkina I.P., Huges M.K., Vaganov E.A. et al. Summer temperature in northeastern Siberia since 1642 reconstructed from tracheid dimensions and cell numbers of *Larix cajanderi* // Can. J. Forest Research. 2003. V. 33. P. 1905–1914.
- Sofronov M.A., Volokitina A.V., Kajimoto T. Ecology of wildland fires and permafrost: their interdependence in the Northern part of Siberia // Proceedings of the eighth symposium on the joint Siberian permafrost studies between Japan and Russia in 1999. Sapporo: Hokkaido University Forests, 1999. P. 211–218.
- StatSoft, Inc., 2003. Nonparametric Statistics. <http://www.statsoft.com/textbook/stnonpar.html>
- Swetnam T.W. Fire and Climate History in the Central Yenisey Region, Siberia // Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia / J.G. Goldammer, V.V. Furyaev. Eds. Dordrecht, Netherlands: Cluver Academic Publisher, P. 90–104.
- Swetnam T.W., Baisan C.H. Historical fire regime patterns in the southwestern United States since AD 1700 // Proceedings of the Second La Mesa Fire Symposium: Fire Effects in Southwestern Forests, Los Alamos, N.M. (29–31 March 1994) Ed. C.D. Allen. U.S. Dep. Agric. For. Serv. Gen. Tech., 1996. Rep. RM-GTR-286. P. 11–32.