

УДК 551.509.68+551.588.2

## **ПОЖАРЫ В АЛТАЕ-САЯНСКОМ РЕГИОНЕ: ЛАНДШАФТНО-ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ПРИУРОЧЕННОСТЬ**

© 2015 г. **Е.И. Пономарев, Е.Г. Швецов, В.И. Харук**

Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, г. Красноярск, Россия

Рассмотрены пространственно-временные закономерности возникновения пожаров растительности на территории российской части Алтае-Саянского региона за период инструментальных спутниковых наблюдений (1996–2014 гг.). Представлено распределение пожаров по ландшафтным категориям, природным зонам, высотным поясам и формам профиля рельефа. Дана оценка приуроченности возникновения пожаров в лесах с доминированием темнохвойных, светлохвойных и лиственных насаждений. Результаты нормированы с учетом соотношения площадей проективного покрытия выделяемых категорий, классов и зон на территории региона. Установлено экспоненциальное снижение числа пожаров при переходе от равнин и низкогорий к высокогорьям. Площади, пройденные пожарами, максимальны в среднегорьях. До 50 % всех пожаров регистрируется на северных и прилегающих к ним склонах. Частота возникновения пожаров на склонах вогнутой формы на 40 % выше, чем на склонах выпуклой формы. Для всех природных зон (лес, степь, лесостепь) отмечен логарифмический рост горимости и частоты пожаров; наибольшая вариабельность частоты пожаров и горимости наблюдается в лесостепной зоне региона. Показано, что пространственное распределение пожаров согласуется с выделяемыми климатическими фациями. Многолетняя динамика горимости лесов Алтае-Саянского региона и территории Сибири в целом имеет высокую степень связи с вариацией метеорологических показателей, характеризующих климатические изменения.

*Ключевые слова:* Алтае-Саянский регион, лесные пожары, рельеф, климат.

PACS 92.70.Kb, 92.70.Mn

### **Введение**

Проблема лесных пожаров актуальна для многих регионов мира, в частности для бореальной зоны Евразии и Северной Америки, где расположено до 30 % всех лесов планеты [Fire in..., 1997]. Здесь отмечается стабильно высокий уровень частоты возникновения пожаров и показателя горимости лесов, усилившийся на рубеже XX–XXI вв. [Gil-

lett et al., 2004; Kharuk et al., 2008; Sukhinin, 2008; Kasischke et al., 2010]. По оценкам [Conard et al., 2002; Швиденко и др., 2011], ежегодная площадь лесных пожаров только в России составляет 2–17 млн га, а эмиссии углерода от пожаров – 121–137 Тг/год. Леса на территории российской части Алтае-Саянского региона, функционирующие как сток для углерода из атмосферы, в результате пожаров дают вклад в эмиссии в диапазоне 2.6–27.4 Тг/год [Стратегия..., 2013]. В условиях повышения показателей горимости следует прогнозировать и рост эмиссий.

На территории Алтае-Саянского региона по официальным данным в последней трети XX в. зафиксировано более 50 тыс. пожаров на площади 2.3 млн га [Основные..., 2008]. Данные спутникового мониторинга показали, что в начале XXI в. количественные показатели горимости региона возросли. Площади, пройденные огнем в 2000–2009 гг., оцениваются в 8.3 млн га [Стратегия..., 2013]. При всей условности этих оценок, полученных различными методами, и сложности их сопряженного анализа качественно ситуация с пожарами растительности в регионе имеет тенденцию к их увеличению.

В предлагаемых сценариях изменения климата на среднесрочную перспективу зафиксирована тенденция к повышению температур и перераспределению осадков [Изменение..., 2011; IPCC..., 2013], и эти прогнозы относятся непосредственно к территории Алтае-Саянского региона. Такое развитие ситуации не может не отразиться на изменении режима горимости региона и отдельных его областей, выделяемых по климатическим характеристикам.

Статистика пожаров за 1970-е–1990-е гг. позволила отнести территорию Алтае-Саянского региона к зоне умеренной горимости [Валендик, 1990]. Древесно-кольцевые реконструкции климата показали изменчивость частоты пожаров, в том числе в горной тайге, прогнозируя возможность роста показателей горимости [Валендик и др., 1993; Арбатская, Ваганов, 1997]. При этом отмечается варьирование в широких пределах показателей частоты пожаров и горимости лесов региона [Фурьев и др., 2007; Стратегия..., 2013].

С учетом особенностей рельефа на территории Алтае-Саянского региона выделены орографически обособленные области, отличающиеся положением в пределах горной страны, степенью континентальности климата и структурой высотной поясности [Михайлов, 1961; Смагин и др., 1980; Поликарпов и др., 1986; Дробушевская, Назимова, 2006; Харламова, Остина, 2013].

Рельеф, форма профиля, экспозиция склонов и их крутизна во многом определяют пространственную структуру лесов, а также пространственное и временное распределение пожаров по территории. Так, юго-западные склоны территории Центральной Сибири характеризуются более короткими межпожарными интервалами [Kharuk et al., 2008, 2010]. В лесах о. Сахалин большинство пожаров регистрировалось на восточных склонах на высотах до 300 м [Kharuk et al., 2007]. В горных районах Южной Сибири влияние рельефа и наличие высотной поясности выражается в смещении сроков наступления пожарного «созревания» участков, варьировании параметров динамики пожара и количественных характеристиках воздействия огня на растительность [Софронов, 1967; Софронов и др., 2008]. Ранее на территории региона основная часть пожаров фиксировалась в сосновых насаждениях нижних частей склонов, где межпожарный интервал составлял 15–24 года, в то время как в темнохвойных лесах региона он существенно выше – 90–120 лет [Валендик и др., 2001].

В данной работе проведен многофакторный анализ пространственных закономерностей возникновения и распространения пожаров на территории региона, оценены параметры горимости отдельных областей и установлены особенности горимости и ее связь с характеристиками природных зон и высотных поясов. Отличие нашей работы от дру-

гих подобных работ в том, что были использованы данные о пожарах с высокой степенью информационно-атрибутивного наполнения, полученные по результатам дистанционного мониторинга и представленные в формате векторного полигонального покрытия в ГИС. Констатируя фактическую ситуацию с лесными пожарами на рубеже XX–XXI вв., унифицированные спутниковые данные объективно отражают влияние современного изменения метеорологических показателей в регионе.

Цель работы – анализ частоты пожаров и горимости территории Алтае-Саянского региона за период инструментальных спутниковых наблюдений 1996–2014 гг. и ее распределение по природным зонам и преобладающим древостоям и по элементам рельефа (высотные пояса, экспозиция, форма профиля склона).

Для всех результатов геопространственного анализа проводилась процедура нормирования, учитывающая соотношение площадей проективного покрытия выделяемых категорий, классов и зон в Алтае-Саянском регионе, в границах которых определялись рассматриваемые характеристики.

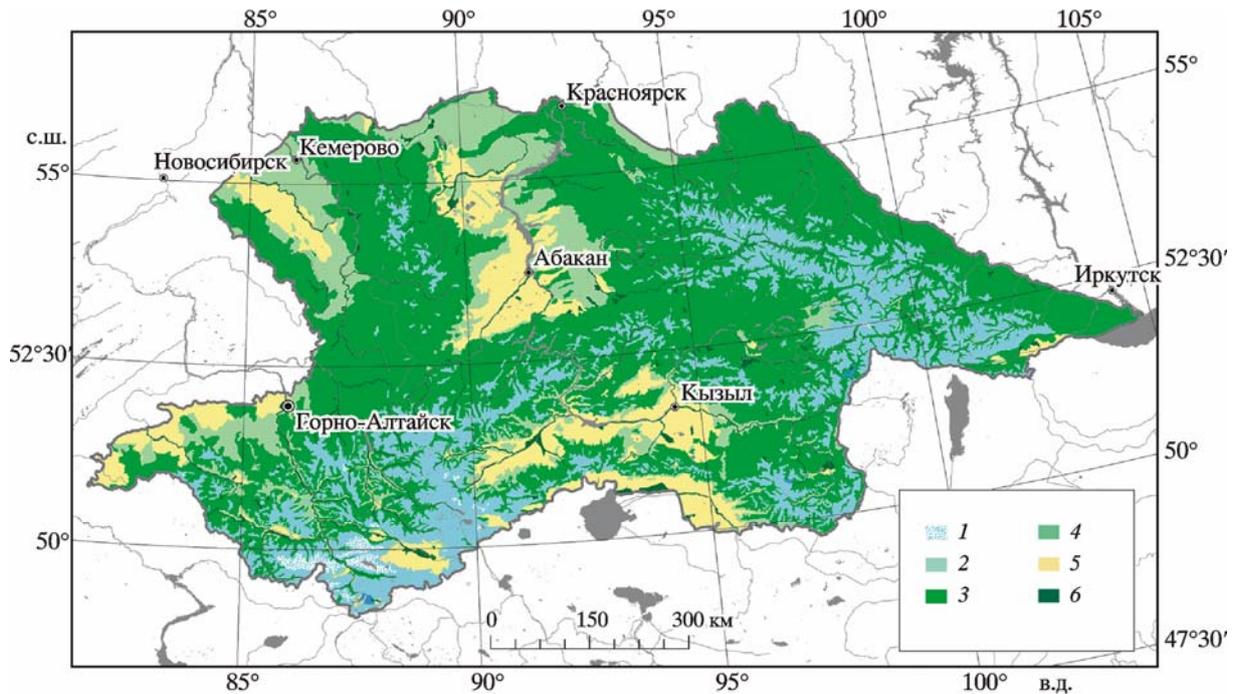
Кроме того, показано, что пространственное распределение пожаров согласуется с границами выделяемых географо-климатических фаций, а многолетняя динамика горимости Алтае-Саянского региона и территории Сибири в целом имеет высокую степень связи с инструментально зафиксированной вариацией метеорологических параметров и показателей, характеризующих изменение климата региона.

### Район исследований

Сложившиеся на территории Алтае-Саянского региона гипсометрические, инсоляционные, циркуляционные и барьерно-орографические условия способствуют разнообразию здесь мезо- и микроклиматов [Харламова, Остина, 2013]. Уникальное сочетание разнообразных климатических режимов сформировало специфический спектр ландшафтов и экосистем. Согласно [Самойлова и др., 2003], на территории Алтае-Саянского региона выделяется 191 тип ландшафтов. Избыточно влажные (пергумидные), влажные (гумидные) и умеренно влажные (семигумидные) группы районов соседствуют с областями, характеризующимися регулярными засушливыми периодами.

Согласно существующей классификации [Самойлова и др., 2003; Изменение..., 2011; Стратегия..., 2013], леса, занимающие большую часть территории региона, представлены темнохвойной горной тайгой (более 29 %), подтайгой (20 %), светлохвойной горной тайгой (до 15 %), субальпийскими и подгольцовыми редколесьями (до 13 %), черневой тайгой (около 7 %). Общее соотношение выделенных природных зон, согласно используемому векторному информационному слою, следующее: до 56 % – леса; 11 и 13 % – соответственно степи и лесостепи; до 17 % территории отнесено к горным тундрам в сочетании с альпийскими лугами. Менее 4 % территории составляют ледники и долинные комплексы (рис. 1).

При обработке векторных карт рельефа и описания групп типов леса и преобладающих древостоев была получена геопространственная статистика категорий высот и классов природной пожарной опасности (табл. 1). Высотные зоны в диапазоне 650–2085 м над ур. моря с делением на интервалы по 350 м занимают площади примерно одного порядка (12–16 % от общей). Доля высокогорных (от 2085 м и выше) областей составляет не более 10 % территории, а территорий с высотами до 650 м над ур. моря – до 33 %. При переходах между высотными поясами средний класс природной пожарной опасности (ППО) снижается от 2.3 (повышенного) до 5 (наименьшего). Степень вариации класса ППО по ландшафтным категориям в границах класса высоты отражает значение стандартного отклонения  $\sigma_{\text{класс ППО}}$  (см. табл. 1).



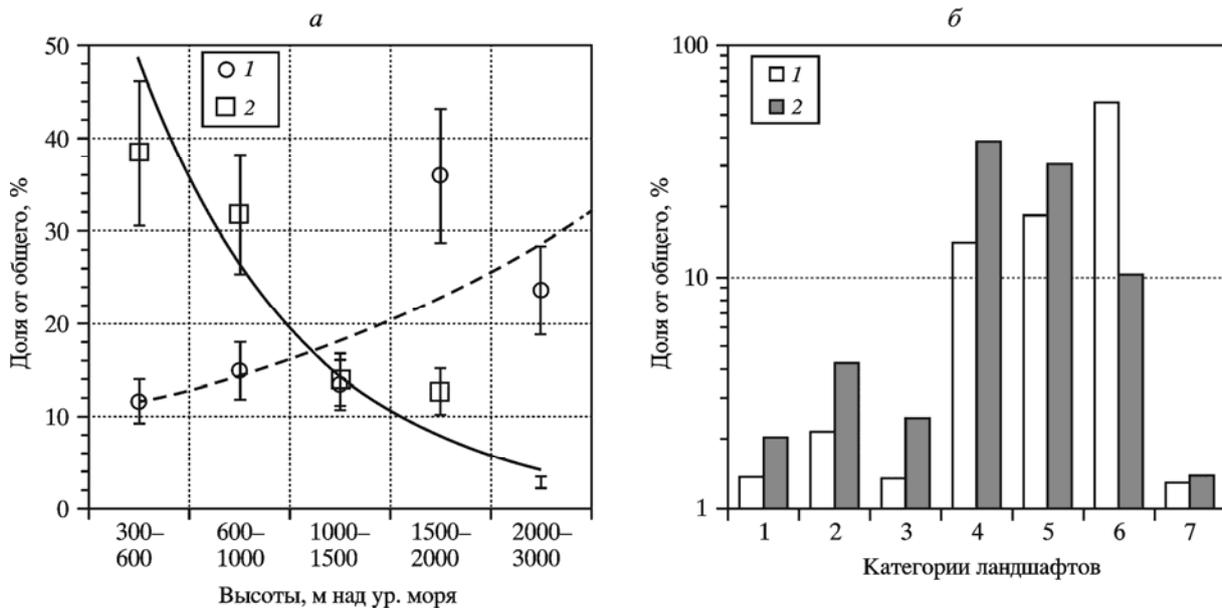
**Рис. 1.** Карта природных зон в границах российской части Алтае-Саянского региона (по: [Самойлова и др., 2003])

1 – ледники; 2 – горные тундры и луга; 3 – леса; 4 – лесостепь; 5 – степь; 6 – долинные комплексы

**Таблица 1.** Распределение территории Алтае-Саянского региона по категориям высот и классу природной пожарной опасности

Категория	Диапазоны высот, м над ур. моря	Площадь, млн га	Доля общей площади, %	Средний класс ППО	$\sigma_{\text{класс ППО}}$
1	300–650	21.7	32.7	2.3	1.15
2	650–1000	10.4	15.7	2.8	1.29
3	1000–1370	10.9	16.4	3.2	1.27
4	1370–1730	9.3	14.0	3.5	1.25
5	1730–2085	7.7	11.6	3.9	1.2
6	2085–2444	5	7.5	4.0	1.26
7	2444–2800	1.2	1.8	4.7	0.7
8	2800–3160	0.2	0.3	5.0	0.1
9	3160–3516	0.009	0.01	5.0	0
В целом по региону		66.4	100.0	3.4	1.35

Вариация уровня природной пожарной опасности территории Алтае-Саянского региона обусловлена распределением преобладающих типов ландшафтов [Самойлов и др., 2003] в рассматриваемых высотных поясах. В высокогорных поясах (категории 7–9, см. табл. 1, рис. 2) низкую вероятность возникновения пожаров и 5-й класс ППО определяют преобладающие мохово-лишайниковые кустарниковые тундры и редкостойные кедровые насаждения. В категориях средних высот (4–6, см. табл. 1) наиболее распространены лиственничники и сочетания темнохвойных пород, включая кедр. В поясе 3 преобладают лиственничные, кедрово-пихтовые и кедрово-еловые и смешанные березово-лиственничные насаждения. В низкогорьях (категории 1–2) доминирующими являются подтаежные осиново-пихтовые мелколиственно-лиственничные насаждения и луговые степи.



**Рис. 2.** Распределение числа (2) и площади (1) пожаров на территории Алтае-Саянского региона по высотным поясам (а) и ландшафтными категориями (б) по спутниковым данным

1–7 – категории ландшафтов: 1 – предгорья на высотах 0.3–0.6 тыс. м; 2 – межгорные котловины на высотах 0.3–0.9 тыс. м; 3 – мелкосопочки на высотах 0.6–1.2 тыс. м; 4 – равнины межгорных котловин (высоты 0.6–1.8 тыс. м); 5 – низкогорья высотного пояса 0.9–1.8 тыс. м; 6 – среднегорья (высоты 1.2–2.4 тыс. м); 7 – высокогорные ландшафты на высотах 2.0–3.3 тыс. м

Полученные о районе исследования данные являются определяющими для понимания распределения пожаров по территории и интерпретации пространственно-временных закономерностей горимости локальных областей Алтае-Саянского региона. Ряд иных важных критериев (таких как локальные отличия метеорологических и климатических условий, уровень антропогенного влияния или уровень противопожарной охраны) при выполнении данной работы не учитывались.

### Исходные данные и методы

Использовалась база данных Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, созданная на основе спутникового мониторинга пожаров на территории региона за период с 1996 по 2014 г. [Пономарев, Швецов, 2013]. Эта база сформирована по наблюдениям очагов активного горения в среднем инфракрасном диапазоне спутниковыми радиометрами (AVHRR, MODIS). Зафиксированные тепловые аномалии были агрегированы в полигоны пожаров, представляемые в формате векторного полигонального слоя для ГИС. Помимо координатной привязки и данных о пространственном расположении пожаров, в базе содержится атрибутивная информация, включающая время действия пожара, динамику площади горения, преобладающий тип растительности в зоне действия пожара, оценку мощности тепловыделения от активной зоны и т.д.

Пожары с привязкой к природным зонам Алтае-Саянского региона были разделены на четыре категории (в пределах соответствующих полигонов векторной карты растительности): лесные, лесостепные, степные, а также возгорания в горных тундрах и альпийских лугах.

Сопряженный геоинформационный анализ проводился с использованием векторных информационных слоев: цифровой модели рельефа (М. 1 : 500 000), ландшафтной кар-

ты Алтае-Саянского региона (М. 1 : 2 000 000) [Самойлова и др., 2003], карты растительности [Bartalev et al., 2004; Барталев и др., 2011] и карты преобладающих пород древостоев [Stolbovoi, McCallum, 2002], векторной карты климатических фаций, выполненной на основе данных о распределении лесных экосистем региона в параметрическом пространстве факторов увлажнения и обеспеченности теплом [Поликарпов и др., 1986; Дробушевская, Назимова, 2006].

Дополнительно средствами ГИС (программный пакет ArcGIS) были реализованы следующие информационные основы:

- слой высотных поясов и соответствующих им типов ландшафтов и описание преобладающих древостоев;
- слой формы профиля рельефа (вогнутость, выпуклость, крутизна склона);
- слой экспозиции склонов.

Для процедуры сопряжения указанных слоев с полигональными данными о пожарах средствами ГИС был выработан унифицированный комплекс правил для однозначного соотнесения данных. Так, полигон пожара при пространственном сопряжении был отнесен к данной зоне или классу на «слое-подложке» (например, полигональный слой ландшафтов) в случае его полного попадания во внутреннее пространство границ класса. В некоторых случаях, когда полигон пожара выходил за границы рассматриваемого полигона «слоя-подложки», дополнительно рассматривался критерий локализации центра полигона пожара. Кроме того, использовалось правило деления площади полигона пожара между двумя классами, если рассматриваемый пожар фиксировался на границе классов «слоя-подложки». Такой подход позволил снизить уровень неопределенности при реализации сопряженного анализа, при этом вклад каждого пожар рассматривался с учетом его геометрии и пространственных характеристик.

Нормализация данных о числе и площадях пожаров выполнялась в соответствии с общепринятыми методиками [Мокеев, 1965; Софронов, Волокитина, 1990]:

частота пожаров – число пожаров за пожароопасный сезон, приведенных к единице площади, рассматриваемой зоны или области:

$$v = n / (S / 10^5), \quad (1)$$

где  $v$  – показатель частоты пожаров;  $n$  – зафиксированное количество пожаров; безразмерный коэффициент  $S/10^5$  – площадь рассматриваемой области или зоны, нормированная на 100 тыс. га;

горимость – отношение площади пожаров к площади рассматриваемой области или зоны, выраженное в процентах в среднем за сезон:

$$\gamma = \frac{S_{\text{пож}}}{S} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где  $\gamma$  – показатель горимости, %;  $S_{\text{пож}}$  – общая площадь пожаров, га;  $S$  – площадь рассматриваемой области или зоны, га.

Принимая во внимание, что площади различных элементов ландшафта (высотных поясов, природных зон и т.д.) в пределах рассматриваемого района существенно различались, нами применялась процедура нормировки, аналогичная приведенной в работе В.И. Харука с соавторами [Kharuk et al., 2007]:

$$k_{c(i)} = S_{c(i)f} / S_{c(i)l}, \quad (3)$$

где  $k$  – нормировочный коэффициент;  $c(i)$  –  $i$ -я категория элемента ландшафта  $c$ ;  $S_{c(i)f}$  – площадь, пройденная огнем в пределах  $i$ -й категории элемента ландшафта  $c$ ;  $S_{c(i)l}$  – общая площадь  $i$ -й категории элемента ландшафта  $c$  в пределах всего района исследования.

Кроме того, были проанализированы данные о мощности теплоизлучения от активной зоны пожара с привязкой к преобладающим древостоям. Ранее технология дистанционной оценки мощности теплоизлучения [Kaufman et al., 1998] нами была адаптирована применительно к характеристике пожаров в лесах Сибири [Shvetsov, Ponomarev, 2015].

### Результаты и их обсуждение

В период с 1996 по 2014 г. на территории Алтае-Саянского региона было зафиксировано более 32.5 тыс. пожаров общей площадью около 12.2 млн га. Обобщенные данные о пожарах по природным зонам региона приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Данные о пожарах на территории Алтае-Саянского региона (по материалам инструментальных спутниковых наблюдений Института леса им. В.Н. Сукачева СО РАН)

Год	Число пожаров				Общая площадь, тыс. га			
	Лес	Лесо- степь	Степь	Горная тундра	Лес	Лесо- степь	Степь	Горная тундра
1996	138	162	73	4	94.5	36.9	19.7	11.5
1997	406	380	286	63	154.1	98.2	74.4	23.4
1998	264	250	234	26	129.3	67.8	73.9	38.8
1999	424	686	356	16	546.9	401.8	210.6	11.4
2000	199	238	219	17	131.1	112.6	102.9	5.5
2001	228	274	231	24	128.2	90.6	102.2	11.6
2002*	802	979	590	26	9070.7	2023.2	685.6	127.4
2003	411	512	512	42	494.3	214.1	316.8	38.4
2004	171	800	381	12	159.4	650.9	204.5	5.7
2005	233	1292	877	8	107.2	506.6	429.4	1.7
2006	206	722	342	2	115.4	318.1	161.6	0.5
2007	777	1357	1151	39	701.9	769.4	659.7	17.1
2008	521	1168	876	22	524.1	678.6	577.8	13.5
2009	194	999	482	2	86.5	495.1	229.7	0.8
2010	119	701	350	4	66.3	241.7	135.3	1.4
2011	380	1466	850	12	336.7	1174.5	605.5	8.0
2012	313	1032	479	24	338.8	751.1	332.0	25.0
2013	146	236	177	6	163.3	159.9	132.1	2.9
2014	542	1367	786	28	509.4	996.3	660.5	12.58

\* Данные о площадях пожаров не использовались в анализе усредненных значений.

### *Распределение пожаров по категориям рельефа*

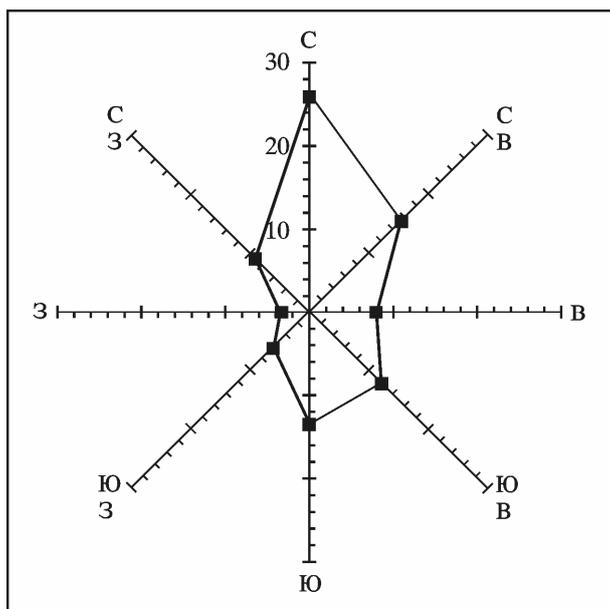
Переходы между высотными поясами от равнин и низкогорий к высокогорьям сопровождались уменьшением количества пожаров. В качестве аппроксимирующей функции в первом приближении была использована экспонента (см. рис. 2, а). Соотношение площадей пожаров с повышением высоты изменялось противоположным образом. Распределение суммарной площади пожаров по высотам имеет, хотя и не так ярко выраженное, экспоненциальное распределение (см. рис. 2, б). До 50 % всех пожаров зафиксированы на равнинах межгорных котловин и низкогорьях высотного пояса 0.9–1.2 тыс. м, что согласуется с данными для более раннего периода для ландшафтных групп региона [Фуряев и др., 2007].

Такое распределение пожаров в горных лесах закономерно и определяется, вероятно, особенностями развития и распространения пожаров по склонам. Как отмечалось, скорость распространения пожара при определенных углах крутизны склонов может существенно увеличиваться за счет эффекта «положительной обратной связи», наличие которой определяет конвекция и дополнительный приток воздуха в зону горения, а также дополнительный прогрев лесных горючих материалов [Софронов, 1967; Валендик и др., 2001].

Нет противоречия и в том, что суммарная площадь пожаров снижается в высотном (выше 2000 м над ур. моря) поясе. Это соответствует распределению растительных горючих материалов и согласуется с классом природной пожарной опасности территории (см. табл. 1).

Данные, результирующие приуроченность пожаров к экспозиции склонов (рис. 3), позволяют констатировать преобладание возгораний на северных макросклонах (до 26 % общего количества пожаров). До 50 % (суммарно) общего числа случаев пожаров были зафиксированы на северо-западных, северных и северо-восточных склонах. Склоны южной экспозиции подвержены пожарам вдвое реже (до 13 % общего числа пожаров). Распределение площадей пожаров по экспозициям имеет аналогичный характер. Было учтено, что вычисленное средствами ГИС соотношение склонов северной и южной экспозиции составляло 19 и 14 % территории соответственно, а доля западных и восточных склонов – по 8 % общей площади региона. Результаты, свидетельствующие о преобладании пожаров на северных и восточных склонах, получены также и для о. Сахалин [Kharuk et al., 2007]. В то же время на территории Центральной Сибири северо-восточные склоны характеризуются большими межпожарными интервалами и, вероятно, меньшей частотой возникновения пожаров [Kharuk et al., 2008].

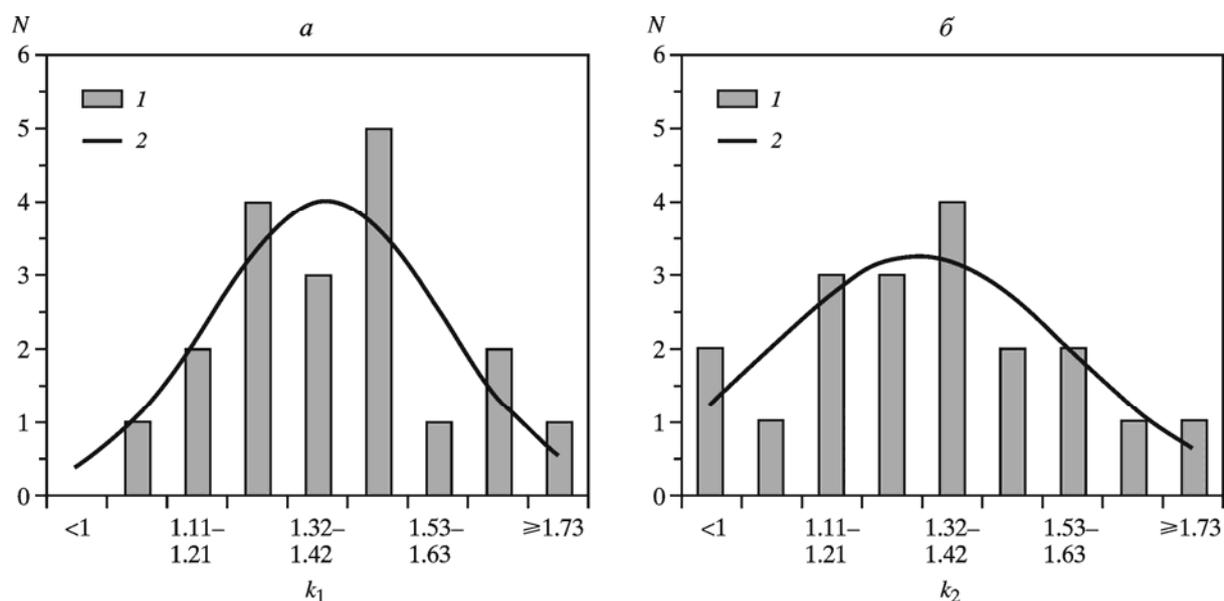
Анализ распределения пожаров по категориям «форма профиля рельефа» и «крутизна склонов» представлял определенную сложность, так как площадь пожара, как правило, захватывает несколько категорий. Таким образом, приходилось рассматривать описанные выше дополнительные критерии отнесения полигона пожара к заданному



**Рис. 3.** Круговая диаграмма распределения пожаров на территории Алтае-Саянского региона в соответствии с экспозицией склонов в среднем за год за период 1996–2014 гг.

классу. В целом соотношение площадей склонов с вогнутым и выпуклым профилем составило 1.06, т.е. оно фактически одинаково.

Статистику показателей горимости с привязкой к форме профиля склонов удобно представить как отношение количества пожаров на склонах вогнутой формы к количеству пожаров на выпуклых склонах ( $k$ ). На рис. 4 представлена гистограмма показателя  $k$ , построенная по данным за весь рассматриваемый период. В среднем же для количества пожаров на территории Алтае-Саянского региона этот показатель равен  $k_1 = 1.42$  (стандартное отклонение 0.21), а для площадей –  $k_2 = 1.35$  (стандартное отклонение 0.32). Таким образом, на склонах вогнутого профиля по сравнению со склонами выпуклой формы количество пожаров в отдельные годы было выше на 40 %, а суммарные площади, пройденные пожарами, выше на  $18 \pm 8$  %.



**Рис. 4.** Частота пожарных сезонов на территории Алтае-Саянского региона за период 1996–2014 гг. по показателю отношения количества (а) и площадей (б) пожаров на вогнутых и на выпуклых склонах

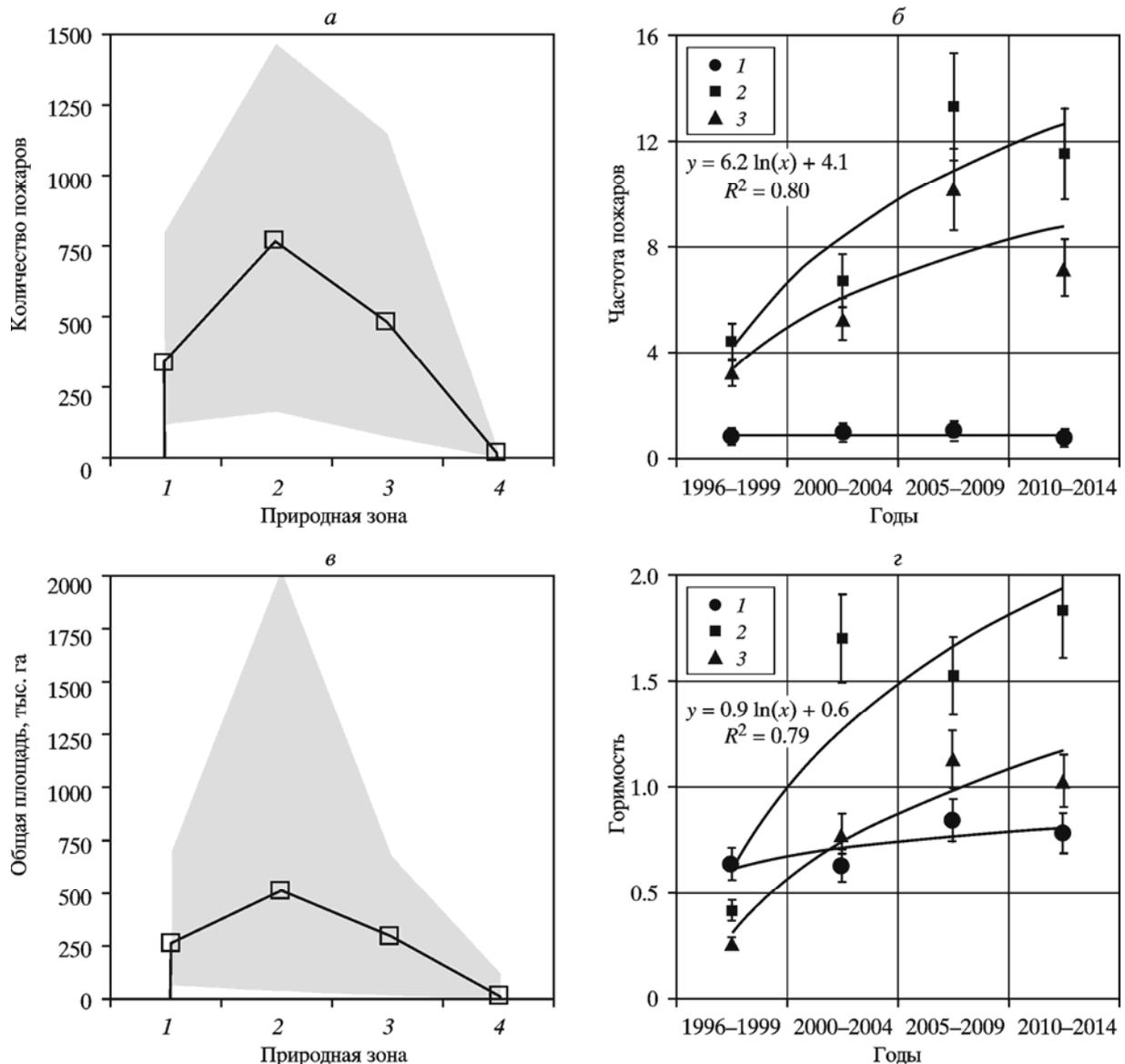
1 – экспериментальное распределение; 2 – его аппроксимация функцией нормального распределения с коэффициентом достоверности  $R^2 \sim 0.69$

### Зональное распределение пожаров

Как видно из данных, приведенных в табл. 2, из общего количества пожаров в Алтае-Саянском регионе до 72.6 % составляют пожары в степной и лесостепной зонах; на лесные пожары приходится до 18.5 % общего количества пожаров. При этом среднее количество возгораний в течение пожароопасного сезона в лиственных и сосново-лиственных лесах – более 170 случаев в год, в темнохвойных лесах – до 70 случаев в год, в лиственных и смешанных лесах – до 140 случаев в год.

Количественные показатели горимости существенно варьируют в различных природных зонах региона. Значимы и различия, связанные с особенностями пожароопасного сезона. Усредненные значения для четырех природных зон, расположенных на территории Алтае-Саянского региона, представлены на рис. 5. Наибольшая вариабельность соответствует зоне лесостепи (2 на рис. 5).

Частота пожаров и горимость по природным зонам рассчитаны и нормированы по формулам (1)–(3) согласно площадям зон (см. рис. 1), определенным методом геопространственной статистики, и соответствующим литературным данным [Изменение..., 2011; Стратегия..., 2013].

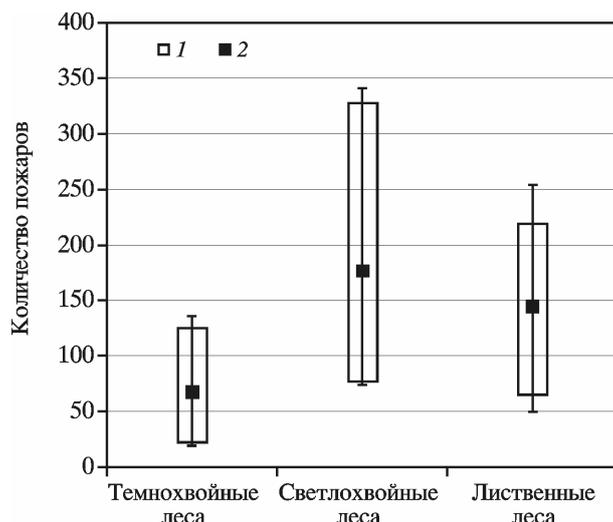


**Рис. 5.** Обобщенные за период 1996–2014 гг. данные о лесных пожарах на территории Алтае-Саянского региона

1–4 – природные зоны: 1 – лес; 2 – лесостепь; 3 – степь; 4 – горная тундра и альпийские луга. Пределы вариаций количества (а) и площадей (в) пожаров показаны тоном. Данные о частоте пожаров (б) и горимости лесов (з) усреднены по пятилетним интервалам

Частота возникновения пожаров в темнохвойных лесах региона (около 30 % всей территории), светлохвойных насаждениях (18 %) и лиственных лесах (9.2 %), выделяемых при сопряженной обработке имеющихся векторных карт [Stolbovoi, McCallum, 2002; Самойлова и др., 2003; Bartalev et al., 2004], существенно различается (рис. 6). В соответствии со шкалой М.А. Софронова [Софронов, Волокитина, 1990] в темнохвойных насаждениях она низкая ( $v = 0.36$ ), в светлохвойных – умеренная ( $v = 1.61$ ), а в лиственных лесах – повышенная ( $v = 2.40$ ).

По абсолютным значениям наибольшее количество пожаров приходится на подзону светлохвойных лесов, где 78–328 случаев/год – диапазон варьирования в различные сезоны (на уровне 10–90 перцентилей). Суммарная площадь повреждений в светлохвойных насаждениях также в 2–2.5 раза превышает площади пожаров в зонах с преобладанием темнохвойных и лиственных насаждений.



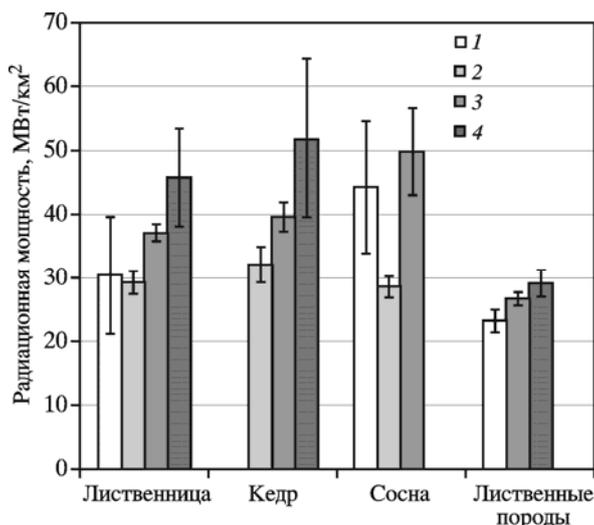
**Рис. 6.** Статистика числа пожаров в темнохвойных, светлохвойных и лиственных лесах Алтае-Саянского региона

1 – вариация значений на уровне 10–90 перцентилей; 2 – среднее значение и соответствующие минимум и максимум за период наблюдений

### Радиационная мощность излучения

В светлохвойных лесах наибольшие значения средней радиационной мощности излучения от активных зон горения, зарегистрированные с помощью спутниковых методов, составляли 28–36 МВт/км<sup>2</sup>. В темнохвойных лесах с преобладанием кедра эта величина составляла около 30 МВт/км<sup>2</sup>, а в лиственных лесах – 25 МВт/км<sup>2</sup>.

Однако более информативно сравнение мощности излучения от пожаров с привязкой к древостоям и высотным зонам (рис. 7). Для рассматриваемых типов леса характерен рост средних значений мощности тепловыделения от активного пожара с высотой. В том же направлении возрастает также количество пожаров с экстремально высокими значениями мощности излучения. При горении лиственных лесов спорадических экстремально высоких значений радиационной мощности зафиксировано не было.



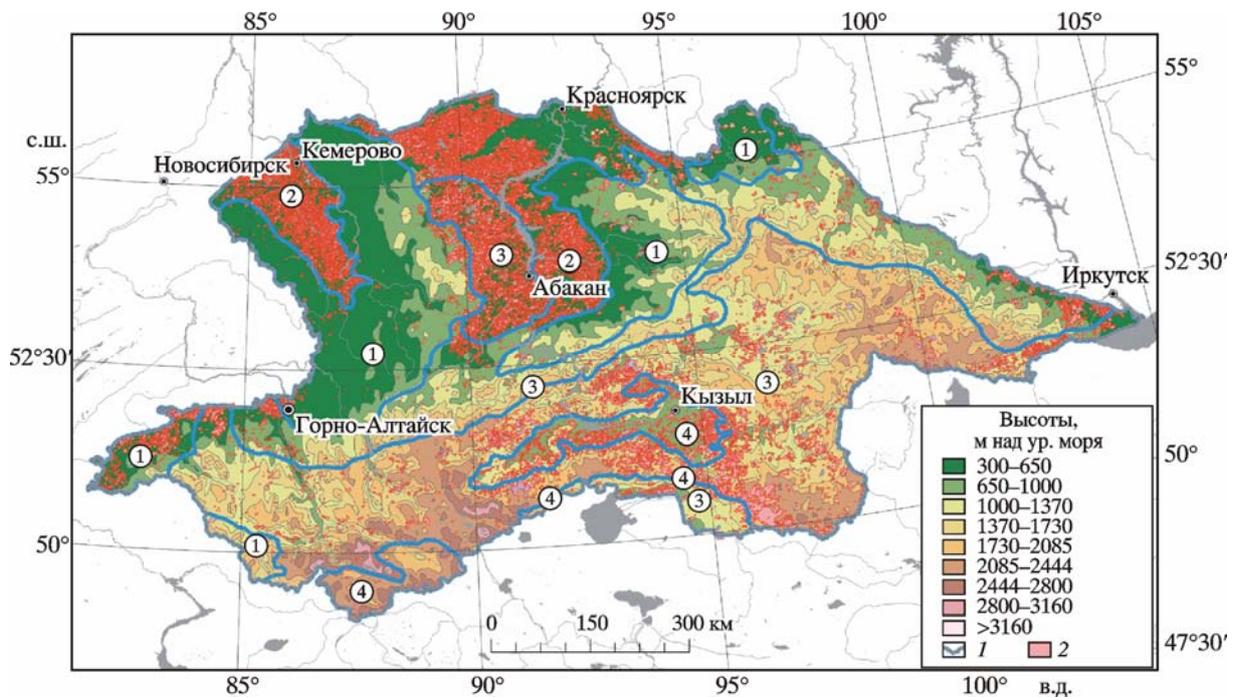
**Рис. 7.** Средняя радиационная мощность излучения от пожара, которая была зарегистрирована дистанционными методами в различных высотных поясах (в различных типах леса) на территории Алтае-Саянского региона

1–4 – высота, м над ур. моря: 1 – 0–300; 2 – 300–900; 3 – 900–2100; 4 – более 2100. Планки погрешности – разброс значений на уровне 2σ (доверительный интервал 95 %)

### Распределение пожаров в пределах климатических формаций

Проведенное в дополнение к вышеописанным исследованиям пространственное совмещение данных о локализации пожаров с картой климатических фаций позволяет констатировать, что особенности режимов увлажнения, характерные для выделенных фаций, во многом определяют вероятность возникновения и развития пожаров в соответствии с высотными зонами. Так, в равнинных и низкогорных областях региона (в основном в лесостепной и степной зонах) пожары преимущественно локализованы в границах циклонической влажной фации (2 на рис. 8) и антициклонической умеренно-влажной (3 на рис. 8).

В среднегорьях и высокогорьях южной части региона пожары (в основном лесные) сосредоточены в пределах и на границе антициклонической недостаточно влажной фации (4 на рис. 8). Большая часть территории, отнесенная к циклонической избыточно-влажной фации, имеет незначительное количество возгораний за рассматриваемый период, исключая участок на западе региона, что, вероятно, обусловлено разным уровнем антропогенного воздействия.



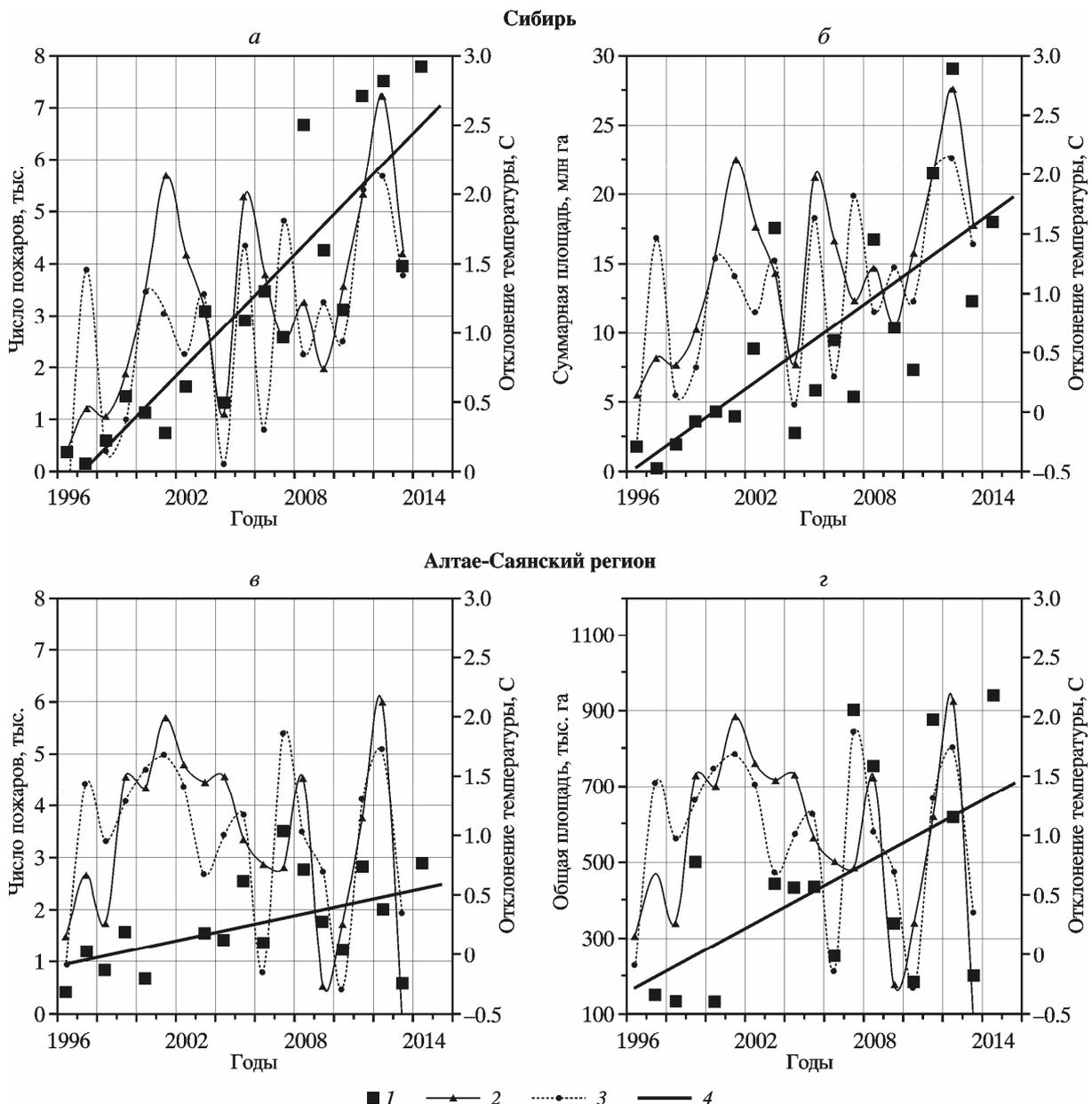
**Рис. 8.** Климатические фации (по [Дробушевская, Назимова, 2006]) и полигоны пожаров в их границах на территории Алтае-Саянского региона

1 – границы климатических фаций. Цифры в кружках – климатические фации: 1 – циклоническая избыточно-влажная; 2 – циклоническая влажная; 3 – антициклоническая умеренно-влажная; 4 – антициклоническая недостаточно влажная; 2 – полигоны с пожарами за период наблюдений (1996–2014 гг.)

Очевидно, что климатические факторы, температурный режим и распределение осадков во многом критичны для формирования пожарных режимов и показателей ежегодной горимости. При этом в условиях прогнозируемых изменений климата необходимо иметь представление о вероятных сменах закономерностей возникновения и развития пожаров. Если оценить динамику климатических изменений в районе исследований с точки зрения формирования и прогнозирования пожарных режимов в перспективе, то значимость связи тренда показателей горимости с метеорологическими факторами приобретает первостепенное значение.

**Динамика пожаров в Алтае-Саянском регионе и Сибири**

По нашим оценкам, межсезонная вариация (рис. 9) числа лесных пожаров имеет фазовое совпадение с динамикой колебания аномалий температуры ( $r \sim 0.6$ ). Аномалии показателей осадков и индекса сухости SPEI [Vicente-Serrano et al., 2010], определенные по данным Центра по исследованию климата Университета Восточной Англии (Великобритания) [Harris et al., 2014] ожидаемо имеют менее значимую обратную корреляционную связь со статистикой горимости ( $r = -0.4$  и  $-0.55$  соответственно).



**Рис. 9.** Статистика пожаров за период спутниковых наблюдений и аномалии температуры для территории Сибири и Алтае-Саянского региона

1 – количество пожаров; 2 – усредненная температура за май–июль; 3 – усредненная температура за апрель–сентябрь; 4 – аппроксимации статистических данных о пожарах ( $R^2 \sim 0.5-0.71$ )

Рассмотренные в настоящей работе факторы, по нашему мнению, являются основными при формировании пожарных режимов региона на локальном уровне в границах природных зон, высотных поясов или категорий рельефа. В целом они являются комплексом условий, формирующих природную пожарную опасность региона.

### Выводы

Из изложенного в настоящей статье материала следует, что в наибольшей степени в Алтае-Саянском регионе воздействию пожаров подвергается зона лесостепи, для которой характерна высокая вариабельность количественных характеристик горимости (числа и площадей пожаров). Суммарная площадь повреждений пожарами в светлохвойных насаждениях также в 2–2.5 раза выше, чем в зонах с преобладанием темнохвойных и лиственных насаждений. Для всех природных зон (лес, степь, лесостепь) отмечен логарифмический рост горимости и частоты пожаров за период инструментального спутникового мониторинга (1996–2014 гг.).

Распределение пожаров по территории Алтае-Саянского региона связано с характеристиками рельефа. Количество пожаров экспоненциально снижается с переходом от равнин и низкогорий к высокогорьям, данные о площадях также описываются экспоненциальным распределением с ростом от низкогорий к поясу среднегорий (на уровне 1500–2000 м над ур. моря). При этом до 50 % всех случаев пожаров фиксируется на склонах северной экспозиции и на прилегающих к ним территориях. До 72.6 % количества всех пожаров было зарегистрировано в степной и лесостепной зонах; доля пожаров в лесах составила до 18.5 % от общего числа.

Наибольшее количество пожаров в среднем приходится на леса с преобладанием светлохвойных насаждений – более 170 случаев в год. На склонах вогнутого профиля количество пожаров в отдельные годы по сравнению с выпуклыми склонами было выше на 40 %, а суммарные площади пожаров за сезон – выше на  $18 \pm 8$  %. Повышенное значение нормированной частоты возникновения пожаров характерно для лиственных лесов региона ( $v = 2.40$  против 0.36 в темнохвойных лесах и 1.61 в светлохвойных). Однако их доля составляет не более 9 % общей площади лесов региона. Дистанционные оценки мощности тепловыделения от активных пожаров позволяют констатировать, что интенсивность пожаров в лиственных лесах, как правило, ниже, чем в темнохвойных и светлохвойных.

Пространственное распределение пожаров согласуется с выделяемыми в регионе климатическими фациями. Количественные показатели горимости на территории Алтае-Саянского региона на рубеже XX–XXI вв. имеют тренд к увеличению. Этот тренд имеет высокую корреляцию с наблюдаемыми аномалиями метеорологических характеристик, в частности с ростом температуры.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-24-00112).

### Литература

- Арбатская М.К., Ваганов Е.А. Многолетняя изменчивость частоты пожаров и прироста сосны в средней подзоне тайги Средней Сибири // Экология. 1997. № 5. С. 330–336.
- Бартелев С.А., Егоров В.А., Ершов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Уваров И.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектра-

- диометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 4. С. 258–302.
- Валендик Э.Н.* Борьба с крупными лесными пожарами. Новосибирск: Наука, 1990. 193 с.
- Валендик Э.Н., Грейбилл Д.А., Иванова Г.А., Шиятов С.Г.* Реконструкция климатических условий и хронология пожаров в горных лесах юга Средней Сибири // Лесоведение. 1993. № 3. С. 34–40.
- Валендик Э.Н., Векишин В.Н., Иванова Г.А., Кисляхов Е.К., Перевозникова В.Д., Брюханов А.В., Бычков В.А., Верховец С.В.* Контролируемые выжигания на вырубках в горных лесах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 172 с.
- Дробушевская О.В., Назимова Д.И.* Климатические варианты светлохвойной низкогорной подтайги Южной Сибири // География и природные ресурсы. 2006. № 2. С. 21–27.
- Изменение климата и его воздействие на экосистемы, население и хозяйство российской части Алтае-Саянского экорегиона: Оценочный доклад / Под ред. А.О. Кокорина. М.: Всемирный фонд дикой природы (WWF России), 2011. 168 с.
- Михайлов Н.И.* Горы Южной Сибири. М.: Географгиз, 1961. 238 с.
- Мокеев Г.А.* Влияние природных и экономических условий на горимость лесов и охрану их от пожаров // Современные вопросы охраны лесов от пожаров и борьбы с ними. М.: Лесн. пром-сть, 1965. С. 26–37.
- Основные показатели лесохозяйственной деятельности. Охрана и защита лесов / Рослесинфорг. 2008. Эл. ресурс.
- Поликарпов Н.П., Чебакова Н.М., Назимова Д.И.* Климат и горные леса Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1986. 225 с.
- Пономарев Е.И., Швецов Е.Г.* Характеристики категорий пожаров растительности в Сибири по данным спутниковых и других наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2013. № 5. С. 45–54.
- Самойлова Г.С., Веселовский А.В., Маханова Т.М., Платэ А.Н.* Ландшафтная карта Алтае-Саянского экорегиона. Масштаб 1 : 2 235 000. М., 2003.
- Смагин В.Н., Ильинская С.А., Назимова Д.И., Новосельцева И.Ф., Чередникова Ю.С.* Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.
- Софронов М.А.* Лесные пожары в горах Южной Сибири. М.: Наука, 1967. 149 с.
- Софронов М.А., Волокитина А.В.* Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука, 1990. 204 с.
- Софронов М.А., Волокитина А.В., Софронова Т.М.* Пожары в горных лесах. Красноярск, 2008. 388 с.
- Стратегия по снижению пожарной опасности на ООПТ Алтае-Саянского экорегиона / А.С. Шишкин [и др.]; отв. ред. А.А. Онучин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2013. 265 с.
- Фуряев В.В., Заблоцкий В.И., Черных В.А., Самсоненко С.Д., Злобина Л.П.* Проблема лесных и степных пожаров в Алтае-Саянском экорегионе. Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. 90 с. URL: <http://www.ustoichivo.ru/i/docs/60/23.doc>
- Харламова Н.Ф., Остина О.В.* Характеристика современного термического режима российской части Алтае-Саянского экорегиона // Изв. Алтайского гос. ун-та. 2013. Т. 1, вып. 3 (79). С. 117–122.
- Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г., Ваганов Е.А., Сухинин А.И., Максюттов Ш.Ш., МкКаллум И., Лакида И.П.* Влияние природных пожаров в России 1998–2010 гг. на экосистемы и глобальный углеродный бюджет // Докл. РАН. 2011. Т. 441, № 4. С. 544–548.
- Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Potapov P.V., Turubanova S.A., Yaroshenko A.Y.* Russia's forests. Dominant forest types and their canopy density. Map. scale 1 : 14 000 000. М.: Space Res. Inst. of the RAS, 2004.

- Conard S.G., Sukhinin A.I., Stocks B.J., Cahoon D.R., Davidenko E.P., Ivanova G.A. Determining effects of area burned and fire severity on carbon cycling and emissions in Siberia // *Climatic Change*. 2002. V. 55 (1/2). P. 197–211.
- Fire in ecosystems of boreal Eurasia: The bor forest island fire experiment / FIRESCAN Science Team // *Biomass burning and global change* / Ed. by J.S. Levine. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1997.
- Gillett N.P., Weaver A.J., Zwiers F.W., Flannigan M.D. Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires // *Geoph. Res. Lett.* 2004. V. 31. P. L18211. doi:10.1029/2004GL020876.
- Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset // *Intern. J. of Climatology*. 2014. N 34. P. 623–642. doi:10.1002/joc.3711.
- IPCC, 2013: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working group I to the Fifth Asses. Rep. of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley. Cambridge, UK; N.Y., USA: Cambridge University Press, 2013. 1535 p. doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Kasischke E.S., Verbyla D., Rupp T.S., McGuire A.D., Murphy K.A., Allen J.L. et al. Alaska's changing fire regime: Implications for the vulnerability of its boreal forests // *Canad. J. of Forest Res.* 2010. V. 40. P. 1313–1324.
- Kaufman Y.J., Kleidman R.G., King M.D. SCAR-B fires in the tropics: Properties and remote sensing from EOS-MODIS // *J. Geoph. Res.* 1998. V. 103. D24. P. 31955–31968.
- Kharuk V.I., Kasischke E.S., Yakubailik O.E. The spatial and temporal distribution of fires on Sakhalin Island, Russia // *Intern. J. of Wildland Fire*. 2007. N 16. 556–562.
- Kharuk V.I., Dvinskaya M.L., Im S.T., Ranson K.J. Tree vegetation of the forest–tundra ecotone in the Western Sayan Mountains and climatic trends // *Rus. J. of Ecology*. 2008. V. 39(1). P. 8–13.
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Dvinskaya M.L. Wildfires dynamic in the larch dominance zone // *Geoph. Res. Lett.* 2008. V. 35. P. L01402. doi:10.1029/2007GL032291.
- Kharuk V.I., Ranson K.J., Im S.T., Vdovin A.S. Spatial distribution and temporal dynamics of high-elevation forest stands in Southern Siberia // *Global Ecol. and Biogeogr.* 2010a. V. 19, is. 6. P. 822–830.
- Kharuk V.I., Im S.T., Dvinskaya M.L. Forest–tundra ecotone response to climate change in the Western Sayan Mountains, Siberia // *Scand. J. of Forest Res.* 2010b. V. 25, N 3. P. 224–233. doi: 10.1080/02827581003766959.
- Shvetsov E.G., Ponomarev E.I. Estimating the influence of external environmental factors on fire radiative power using satellite imagery // *Contemporary Problems of Ecology*. 2015. V. 8, N 3. P. 337–343. doi: 10.1134/S1995425515030142.
- Stolbovoi V., McCallum I. Land resources of Russia / Intern. Inst. for Appl. Systems Analysis and the Rus. Acad. of Sci. Laxenburg, Austria, 2002. CD-ROM.
- Sukhinin A.I. Space monitoring and analysis of catastrophic fires in Central Siberia and Far East // *North-East Asia: A la Carte*. Center for North-East Asian Studies; Tohoku University, 2008. V. 19. P. 19–23.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI // *J. of Climate*. 2010. N 23. P. 1696–1718.

*Сведения об авторах*

**ПОНОМАРЕВ Евгений Иванович** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 28. Тел.: +7 (391) 249-40-92. E-mail: evg@ksc.krasn.ru

**PONOMAREV Evgenii Ivanovich** – candidate of technical sciences, senior researcher, Sukachev Institute of Forest, SB RAS. Krasnoyarsk, Russia. Tel.: +7 (391) 249-40-92. E-mail: evg@ksc.krasn.ru

**ШВЕЦОВ Евгений Геннадьевич** – кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 28. Тел.: +7 (391) 249-40-92. E-mail: eugeneshvvetsov11@yandex.ru

**SHVETSOV Evgeny Gennadievich** – candidate of technical sciences, researcher, Sukachev Institute of Forest SB RAS. Krasnoyarsk, Russia. Tel.: +7 (391) 249-40-92. E-mail: eugeneshvvetsov11@yandex.ru

**ХАРУК Вячеслав Иванович** – доктор биологических наук, профессор, заместитель директора, заведующий лабораторией мониторинга леса, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50, стр. 28. Тел.: +7 (391) 243-88-25. E-mail: kharuk@ksc.krasn.ru

**KHARUK Vyacheslav Ivanovich** – professor, doctor of biological sciences, deputy director, head of Forest Monitoring Laboratory, Sukachev Institute of Forest SB RAS. Krasnoyarsk, Russia. Tel.: +7 (391) 243-88-25. E-mail: kharuk@ksc.krasn.ru

## **FIRES IN THE ALTAI-SAYAN REGION: LANDSCAPE AND ECOLOGICAL RELATEDNESS**

**E.I. Ponomarev, E.G. Shvetsov, V.I. Kharuk**

Sukachev Institute of Forest, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia

**Abstract.** Spatial and temporal patterns of vegetation fires in the Russian part of the Altai-Sayan region were studied for the period of 1996–2014 when satellite observations were available. The distribution of the fires by the landscape categories, natural zones, altitude zones and forms of the terrain profile is presented. We estimated the relatedness of fires in the forests with the dominance of dark conifer, light conifer and deciduous forests. The results are normalized considering the ratio between areas of the selected categories, classes and zones in the region. We found an exponential decrease in the number of fires from the plains and lowlands to highlands. Middle mountains are characterized by the largest burned areas. Up to 50 % of all fires are observed in the northern and adjacent slopes. The frequency of fire occurrence on the concave slopes is 40 % higher than on the convex slopes. For all natural areas (forest, steppe, forest-steppe) we found the logarithmic increase of burned areas and fires frequency, the greatest seasonal variation of fires frequency and burned areas is observed in the steppe zone of the region. It is shown that the spatial distribution of fires is in agreement with allocated climatic facies. Long-term burn dynamics of the Altai-Sayan region and Siberia as a whole is strongly related to the variation of meteorological parameters that characterize the climate change.

*Keywords:* Altai-Sayan region, forest fires, relief, climate.