

Дистанционный мониторинг послепожарных эффектов в криолитозоне Средней Сибири

Е. И. Пономарев, Т. В. Пономарева

*Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mail: evg@ksc.krasn.ru*

*Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия
E-mail: bashkova_t@mail.ru*

В работе анализируется динамика отражательной способности и тепловых аномалий постпирогенных участков в условиях криолитозоны, исследованная по материалам съёмки Terra/MODIS. Рассматриваются долговременные последствия «фона» в тепловом диапазоне 10,780–11,280 мкм, влияющие на температурный и водный режимы почв. Инструментально зафиксировано повышение средней температуры поверхности послепожарных участков в лиственничниках криолитозоны Сибири относительно фоновых значений на величину до $\Delta T = 7,2 \pm 1,3$ °C в летний период, что на 20–40 % выше фоновых температур ненарушенных участков. Аномалии температурного фона в условиях естественного восстановления напочвенного покрова сохраняются более 10 лет. Численными методами показано, что избыточный прогрев поверхности может приводить к увеличению глубины протаивания сезонно-талого слоя на дополнительные 20 % относительно среднестатистической нормы. Также проверена гипотеза о корреляционной связи между показателем горимости лесов в бассейнах рек бореальной зоны и многолетними рядами объёмов речных стоков. В отдельные сезоны зафиксирован отклик на пирогенное воздействие, выражающийся в аномально низком стоке в летний период ($r \sim -0,57 \dots -0,83$, $p < 0,05$).

Ключевые слова: дистанционные данные, Terra/MODIS, температура, послепожарные участки, криолитозона, сезонно-талый слой, сток рек

Одобрена к печати: 08.08.2018

DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-85-95

Введение

В современных условиях пожары растительности — наиболее значимый фактор нарушения лесов криолитозоны. По разным оценкам (Лупян и др., 2017; Швиденко, Щепашенко, 2013; Forkel et al., 2012) ежегодно площади лесных пожаров в России достигают 2–15 млн га, при этом большая часть (более 70 %) пирогенных повреждений фиксируется в лесах бореальной зоны Сибири. Констатируя масштабы пирогенного фактора, необходимо разрабатывать подходы к прогнозированию возможных постпирогенных последствий, не только сказывающихся на состоянии растительности, лесной подстилки и напочвенного покрова, но и опосредованно определяющих устойчивость функционирования экосистем криолитозоны в целом. В частности, актуальным является целый ряд вопросов, таких как изменения в распределении и деградация приповерхностных слоёв мерзлоты, вариации температурного, водного балансов, изменение режимов стока малых и средних рек и т. д. Изменения отражательной способности и теплового баланса, вызванные нарушением растительных покровов, способны провоцировать деградацию «переходного слоя», выполняющего функцию защиты от нагрева верхней части многолетнемерзлых пород ледового комплекса (Анисимова, Шерстюков, 2016; Аржанов и др., 2007; Десяткин и др., 2012; Gabysheva, Isaev, 2015).

Решение таких комплексных задач требует, наряду с развитием системы наземного обследования, привлечения широких возможностей многоспектрального спутникового мониторинга. Сегодня не вызывает сомнений эффективность работы со спутниковыми данными как для мониторинга растительности и пожаров (Барталев и др., 2016; Лупян и др., 2017), так и для оценки послепожарного состояния лесов (Барталев и др., 2015). Однако спутниковые методы, применимые для мониторинга масштабных комплексных постпирогенных эффектов

в криолитозоне, обсуждаются лишь в единичных публикациях (Корниенко, 2017; Скрыбин, Варламов, 2013). В отдельных работах приводятся результаты дистанционного мониторинга аномалий почвенной влаги как фактора, определяющего пожароопасное состояние и пожарные режимы в лесах (Bartsch et al., 2009; Forkel et al., 2012).

Цель настоящей работы — количественный анализ вариации температурного режима на постпирогенных участках мерзлотной зоны Сибири; дополнительно проверялась гипотеза об опосредованном влиянии горимости лесов на аномальные снижения стоков рек криолитозоны Сибири.

Материалы и методы

В качестве исходных данных были использованы ретроспективные материалы многоспектральной спутниковой съёмки за период 2002–2017 гг., а также сведения о пожарах растительности, представленные в формате геоинформационного полигонального покрытия (Пономарев, Швецов, 2015). Съёмки среднего пространственного разрешения (15–30 м) Landsat/ETM/OLI (Enhanced Thematic Mapper/ Operational Land Imager) использовались для сверки и коррекции площадных и геометрических параметров пирогенно нарушенных участков.

Мониторинг многолетней динамики спектральных признаков при восстановительных сукцессиях выполнялся по данным со спутников Terra и Aqua/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с пространственным разрешением 250 и 1000 м. Использовались стандартные продукты MODIS уровня обработки L2G и L3 (https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/modis). Ежедневные калиброванные данные об альбедо поверхности в диапазонах $\lambda_1 = 0,620–0,670$ мкм (канал 1 MODIS) и $\lambda_2 = 0,841–0,876$ мкм (канал 2) были получены из стандартного продукта MOD09GQ (Vermote, Wolfe, 2015); ежедневные попиксельные данные о температуре поверхности в диапазоне $\lambda_3 = 10,780–11,280$ мкм (31-й, 32-й каналы) вычислялись из продукта MOD11A1 (Wan et al., 2015). Оба стандартных продукта определены для безоблачных условий (clear sky) для поверхности Земли.

Количественные характеристики состояния послепожарных участков восстанавливали на основе значений вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) по данным в диапазонах длин волн λ_1, λ_2 . Наряду с изменениями спектров растительности после пожарного воздействия присутствует также характерный «фон» (Gabysheva, Isaev, 2015) нарушенных участков криолитозоны и в тепловом диапазоне (λ_3). Послепожарные аномалии NDVI и температуры ($T_{\text{тест}}, \text{NDVI}_{\text{тест}}$) рассматривали в отношении к усреднённым значениям для фоновых ненарушенных полигонов ($T_{\text{фон}}, \text{NDVI}_{\text{фон}}$). При численном моделировании использовали абсолютные значения аномалии температуры поверхности.

На первом этапе обработки была подобрана серия изображений Terra/MODIS за июнь–сентябрь 2016 и 2017 гг., имеющих максимальную информативность (съёмка близко к надиру, отсутствие облачности) для анализа динамики пирогенных нарушений в районе исследований. На исходных изображениях экспертно были отобраны 26 постпирогенных участков (рис. 1, см. с. 87), находящихся на стадии первого года послепожарной сукцессии, 10 участков, пройденных пожарами в 2012 г. (5-й год послепожарной сукцессии) и 7 участков с пирогенными нарушениями 2006 г. — 10-й год восстановительной сукцессии. Даты пожаров контролировались по атрибутивной информации банка данных спутникового мониторинга пожаров (Пономарев, Швецов, 2015).

Для определения усреднённых значений альбедо и температуры на нарушенных и фоновых участках рассматривали выборку пикселей, расположенных внутри пожарных полигонов (не менее 7 пикселей) и по периметру в непосредственной близости от постпирогенных участков (не менее 10 пикселей).

Временное усреднение выполняли для следующих декад месяцев: 1-я декада июня, 3-я декада июня, 1-я декада июля, 2-я декада июля, 1-я декада августа, 1-я декада сентября. Сложность получения более полной серии подекадных усреднений состояла в отсутствии информативных серий снимков на пропущенные в данном ряду декады.

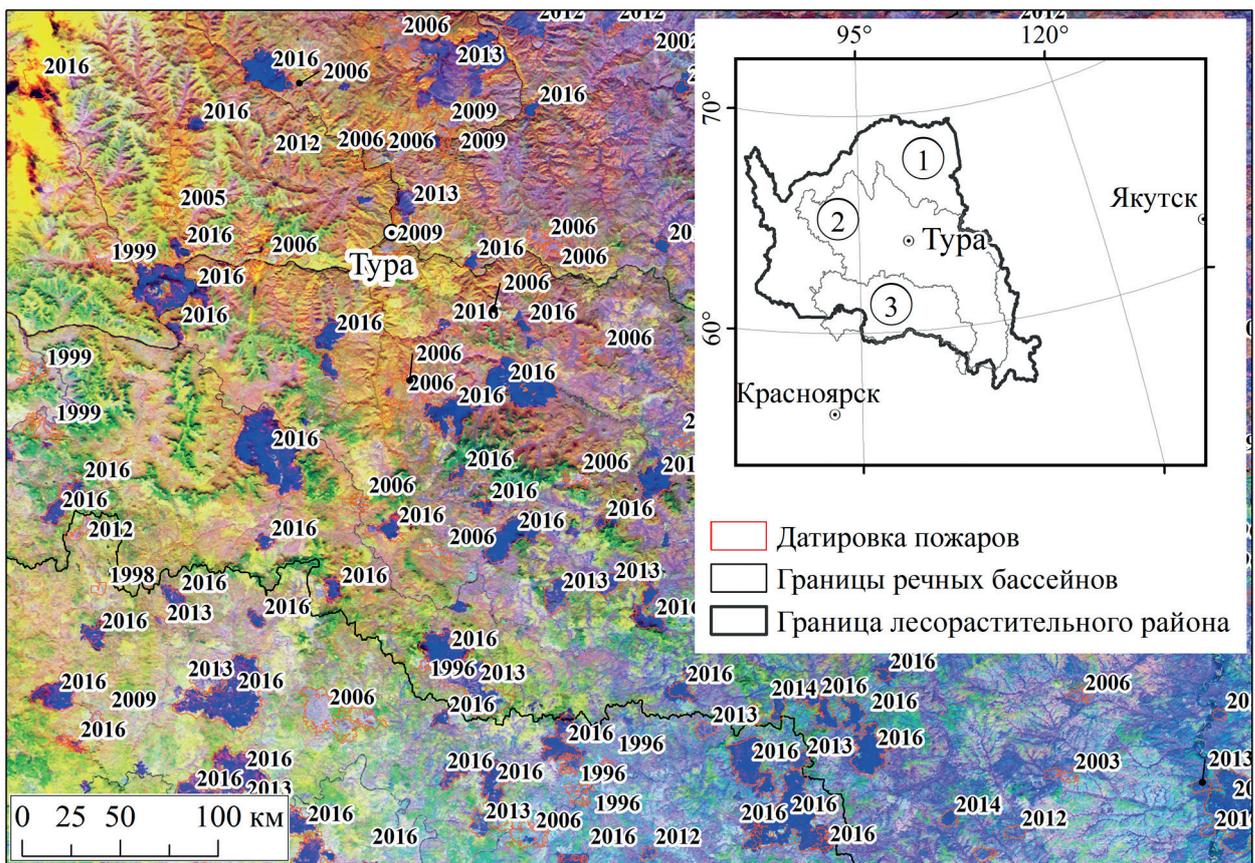


Рис. 1. Район исследований: Среднесибирский плоскогорно-таёжный лесной район (1), бассейн р. Нижняя Тунгуска (2), бассейн р. Подкаменная Тунгуска (3). Мозаичность растительного покрова на снимке Terra/MODIS, RGB-композит, синтезирован из 1-го (R), 2-го (G) и 31-го (B) каналов. Послепожарные тепловые аномалии (синий цвет) на участках различного срока давности в спектральном диапазоне $\lambda = 10,780-11,280$ мкм

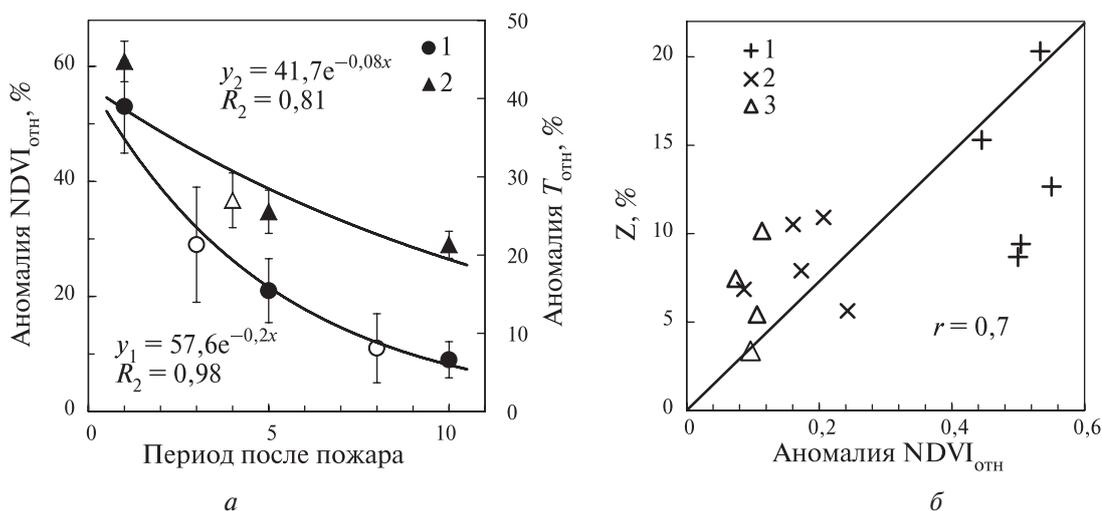


Рис. 2. Динамика относительных аномалий индекса NDVI, усреднённых за вегетационный период с июня по август (1), и усреднённые максимумы превышения температуры относительно фона в первой/второй декадах июля (2) на послепожарных участках в течение 1-, 5- и 10-летнего срока восстановления растительного покрова. Символами без заливки цветом выделены дополнительные измерения в другие сроки восстановления (а). Оценка численными методами приращения относительной глубины протаивания (Z) в зависимости от динамики послепожарного состояния растительности и почвенного покрова по индексу NDVI через один год после пожара (1), 5 лет после пожара (2), 10 лет после пожара (3) (б)

По этой же причине анализ характеристик для других сроков постпирогенного восстановления (2, 3, 4, 8 лет) был возможен лишь для единичных случаев пожаров. Эти данные не были использованы в статистической обработке и приводятся как дополнительные, но тем не менее вписывающиеся в общую динамику (рис. 2, см. с. 87). В целом объём обработанной выборки составил более 3500 значений.

Рассмотренная в работе выборка постпирогенных участков находилась на территории Среднесибирского плоскогорно-таёжного лесного района (см. рис. 1), где в сходных условиях произрастания доминируют (более 75 % лесов) разреженные лиственничные древостои. Таким образом, влияние различий древостоев и напочвенного покрова на формирование спектральных характеристик, обобщённых в рассмотренных рядах данных, по мнению авторов, незначительно. Также использование для характеристики послепожарной динамики относительных значений аномалии NDVI и температуры позволяет говорить об исключении ошибок такого рода в полученных результатах.

Далее численными методами выполняли оценки относительного изменения глубины протаивания мерзлотного слоя в зависимости от аномалии температуры поверхности. Использовали решение уравнения теплопроводности в частных производных (Аржанов и др., 2007; Виноградов и др., 2015):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$$

с граничными условиями Стефана фазовых переходов на границе слоёв:

$$\lambda_1 \left. \frac{\partial T_1}{\partial x} \right|_{x=x_{12}} - \lambda_2 \left. \frac{\partial T_2}{\partial x} \right|_{x=x_{12}} = lu\rho \frac{\partial x_{12}}{\partial t},$$

где ρ — плотность породы ($\text{кг}/\text{м}^3$); c — удельная теплоёмкость ($\text{Дж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$); T — температура для талого (T_1) и мёрзлого (T_2) слоёв; x — глубина слоя (м); λ — коэффициент теплопроводности ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$) для талого (λ_1) и мёрзлого (λ_2) слоёв; l — удельная теплота плавления ($\text{Дж}/\text{кг}$); u — объёмная влажность почвы (%); x_{12} — глубина пограничного слоя мерзлотных и талых горизонтов (м).

Решение Стефана для глубины слоя (Z) сезонного протаивания пород имеет вид:

$$Z = \sqrt{\frac{2\lambda_f(T_s - T_f)\tau}{lu\rho}}, \quad (1)$$

где T_s — температура поверхности; T_f — начальная температура в точке промерзания; λ_f — коэффициент теплопроводности мёрзлой почвы ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$); τ — продолжительность периода прогрева. Используя данный подход, мы провели расчёты вариаций глубины протаивания мерзлотного слоя в летний период в условиях избыточного прогрева поверхности.

Пирогенные процессы способны вызывать значительное изменение водно-физических свойств поверхностных горизонтов почв, снижая их влагоёмкость, увеличивая гидрофобность. Как следствие таких трансформаций почвенных свойств, в частности в сезонно-талом слое криолитозоны, возможно уменьшение доли грунтового питания рек, составляющей в разных речных бассейнах от 10 до 25 %. Однако в доступной литературе такие вопросы практически не обсуждаются.

Для проверки гипотезы о корреляционной связи между вариацией показателя горимости лесов в бассейнах рек бореальной зоны и многолетними рядами речных стоков мы рассмотрели связь пирогенных нарушений за период 2002–2015 гг. с аномалиями стока в течение вегетационного периода (март–август), а также внутрисезонные изменения. Были обобщены многолетние данные о величине расхода воды ($\text{м}^3/\text{с}$) и объёмах стока (км^3) рек Сибири, взятые из открытых баз данных (Bring et al., 2017; Holmes et al., 2015). Полученные результаты базируются на анализе данных для бассейнов рек Нижняя Тунгуска и Подкаменная Тунгуска Енисейского бассейнового округа (см. рис. 1).

Для территории каждого бассейна средствами геопространственных запросов были реализованы выборки пожаров из базы данных за каждый год рассматриваемого периода. Обработанная выборка в бассейне р. Нижняя Тунгуска содержала 2369 пожаров, в бассейне р. Подкаменная Тунгуска — 1997 пожаров. Показатель горимости γ (Мокеев, 1965) вычисляли как отношение суммарной за год (или помесечно) площади пожаров к общей площади речного бассейна. Анализ более полной (с 1939 г.) хронологии экстремальных пожарных событий в Средней и Восточной Сибири выполняли по доступным материалам (Валендик, Иванова, 1996; Ivanova, 1999; Харук и др., 2005) в привязке к восстановленным рядам сезонного стока рек.

Результаты и их обсуждение

За 15 лет инструментальных наблюдений в криолитозоне Средней Сибири были зафиксированы пожары на общей площади более 12 млн га. Это составляет около 10 % всей территории, средняя горимость в год $\gamma = 0,76 \pm 0,17$ % (табл. 1). Количественные показатели горимости и числа пожаров в течение пожароопасного периода года варьируют в широких пределах, стандартное отклонение по всем характеристикам — на уровне 20–40 % от среднего. По нашим расчётам, площадь пирогенного воздействия в различных субрегионах криолитозоны Сибири варьирует ежегодно на уровне 0,45–0,76 %, что по классификации горимости Г.А. Мокеева (1965) соответствует высокому уровню (диапазон значений 0,1–1 %), а спорадические максимумы горимости в отдельные сезоны существенно выше (2–4 %) (см. табл. 1).

Таблица 1. Среднегодовая статистика пожаров (ЛП) в субрегионах Средней Сибири за 2002–2017 гг. (доверительный интервал для уровня надёжности $\alpha = 0,05$)

Субрегион	Площадь, млн га	Среднегодовые показатели		Горимость в год (γ), %	
		Число ЛП	$S_{\text{ЛП}}$, млн га	средняя	максимальная
Среднесибирский плоскогорно-таёжный лесной район	113,97	453±98	0,862±0,199	0,76±0,17	3,33
Бассейн р. Нижняя Тунгуска	45,6	160±69	0,179±0,016	0,45±0,27	2,25
Бассейн р. Подкаменная Тунгуска	23,8	142±87	0,121±0,091	0,72±0,64	4,12

Полученная статистика подтверждает значительные масштабы пожарного воздействия в криолитозоне Средней Сибири как в ежегодном аспекте, так и суммарно в аспекте многолетнего накопления постпирогенных участков. Послепожарные участки и их спектральные отличия от характерных фоновых значений определяют мозаичность территории при многоспектральной съёмке со спутника (см. рис. 1). Характерные отличия, так называемые спектральные признаки, прослеживаются на долговременных данных съёмки в течение 10 и более лет. В связи с этим, используя материалы съёмки Terra/MODIS, выполненной в 2017 г., мы смогли проанализировать послепожарную динамику исследуемых характеристик для трёх сроков восстановительной сукцессии: один год, пять и десять лет после пожара.

На рис. 2 представлены обобщённые результаты, характеризующие долговременную динамику относительных аномалий температуры и вегетационного индекса в процентах от фоновых значений. Аномалии NDVI усреднены по всем значениям восстановленного ряда за вегетационный период с июня по август (доверительный интервал варьирует на уровне 3–8 % при уровне надёжности $\alpha = 0,1$). Приведённые аномалии температуры также усреднены по всему исходному набору данных с выборкой максимальных значений, которые фиксировались в 1–2-й декадах июля (доверительный интервал 2,0–3,5 %, $\alpha = 0,05$).

Для послепожарных участков зафиксировано резкое снижение более чем на 60 % вегетационного индекса NDVI и повышение (в среднем на 47 %) температуры поверхности в сравнении с фоновыми значениями. В течение десятилетнего срока после пирогенного воздействия исследуемые аномалии снижались экспоненциально (см. рис. 2а). Через десять лет

послепожарные участки фактически не отличаются от фоновых по индексу NDVI, что определяется динамикой восстановления растительного покрова. Зафиксированное отклонение от фоновых значений в среднем не превышало 9 % при существенной дисперсии $\sigma = 5 \%$.

Напротив, аномалии теплового фона оставались значимыми и после десяти лет восстановительных сукцессий — превышение относительно фоновых значений зафиксировано на уровне $\sim 20 \%$. Фиксируемые в первой/второй декадах июля абсолютные максимумы превышения температуры над фоновыми значениями составляли в первый год $7,2 \pm 1,3 \text{ }^\circ\text{C}$, через пять лет — не менее $4,9 \text{ }^\circ\text{C}$, через десять лет восстановления — не менее $3,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Коэффициенты аппроксимирующих функций, представленных в явном виде на *рис. 2а*, позволяют говорить о том, что скорость выравнивания тепловых аномалий относительно фоновых значений температуры поверхности в 2,5 раза ниже, чем скорость восстановления характеристик альbedo и индекса NDVI. Полученные результаты согласуются с данными, приводимыми в литературе и для других районов (Gabysheva, Isaev, 2015).

Как показывают расчёты и натурные измерения (Десяткин и др., 2012; Лебедева и др., 2015; Скрябин, Варламов, 2013), среднестатистическая норма сезонного протаивания мерзлотных почв в условиях, схожих с районом исследований, фиксируется на уровне $0,6\text{--}2,0 \text{ м}$. На постпирогенных участках избыточный прогрев поверхности является причиной увеличения глубины протаивания (Z) в среднем на $10\text{--}20 \%$ относительно среднестатистической нормы. Об этом можно судить по измерениям, полученным в натуральных экспериментах (Gabysheva, Isaev, 2015). Такой же диапазон аномальной глубины протаивания сезонно-талого слоя получен по результатам проведённого численного моделирования на основе уравнения (1): на начальных этапах лесовосстановления — до 20% , после десятилетнего периода — $5\text{--}10 \%$. Обобщённый график линейной зависимости представлен на *рис. 2б*. Решение Стефана для глубины слоя сезонного протаивания пород в качестве параметра содержит τ — длительность периода нагрева. В условиях устойчивых антициклонов, действующих, как правило, в Средней Сибири в летний период до 20 и более дней (Валендик и др., 2014), и избыточного количества теплового излучения на поверхность протаивание почвенного профиля возможно на дополнительные $0,5 \text{ м}$. С учётом времени, необходимого для распространения теплового потока по почвенному профилю, а это до $10\text{--}20$ дней (Десяткин и др., 2012), и сроков фиксируемых экстремумов температурной аномалии на поверхности можно прогнозировать, что максимум протаивания сезонно-талых слоёв наступает в третьей декаде июля — в начале августа.

Низкая скорость выравнивания тепловой аномалии, по крайней мере в первые десять лет после пожара, позволяет рассматривать этот фактор долговременного влияния на состояние сезонного талого слоя почвы как один из значимых, определяющих стабильное функционирование экосистем.

Эффект от масштабных пирогенных воздействий удалось проследить и на рядах внутри- и межсезонной динамики стока рек криолитозоны Сибири. Отклик на пирогенное воздействие выражался в аномально низком объёме стока после массовых пожаров в лесах в границах бассейнов рек. При анализе внутрисезонных вариаций было зафиксировано, что дефицит стока может достигать $20\text{--}25 \%$ от среднестатистической нормы (*рис. 3*, см. с. 91). При этом высокая горимость лесов в первой половине лета имеет тесную корреляцию не только со стоком соответствующего сезона (например, май — июль), но и с объёмами стока за послепожарный период (август — октябрь) (*табл. 2*).

Таблица 2. Внутрисезонная корреляции между аномалиями стока и горимостью лесов в бассейнах рек

Бассейн	Коэффициент корреляции			
	ноябрь — февраль	март — апрель	май — июль	август — октябрь
Подкаменная Тунгуска	-0,43	-0,25	-0,83	-0,77
Нижняя Тунгуска	-0,20	-0,24	-0,66	-0,57

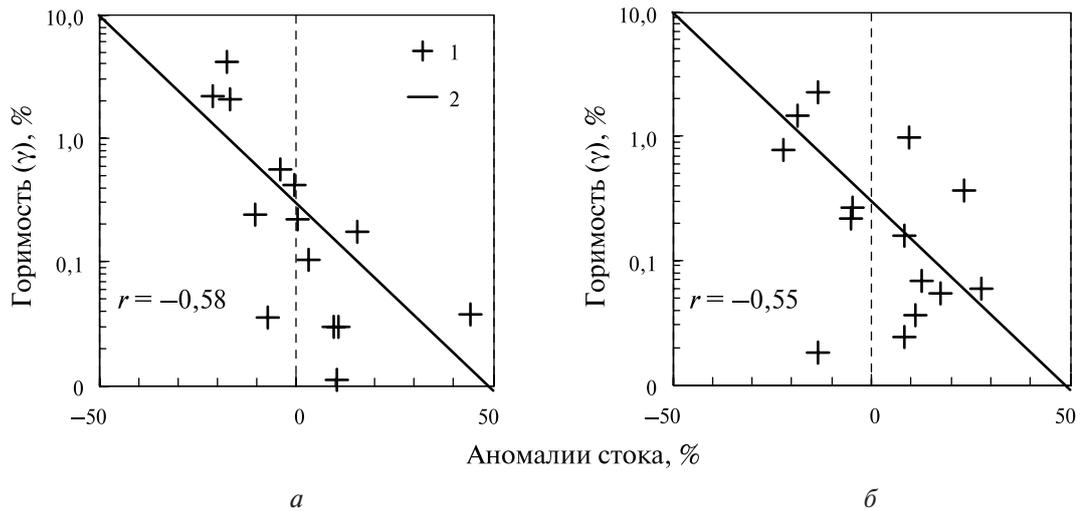


Рис. 3. Корреляционное поле на основе многолетних данных горимости лесов в границах бассейнов рек (%) и аномалий объёма стока за первую половину вегетационного периода (март – июль): а — Подкаменная Тунгуска; б — Нижняя Тунгуска. 1 — экспериментальные данные, 2 — модель

Корреляционная связь между рядами горимости (рассмотрены как многолетние вариации, так и внутрисезонная динамика) и стоком летнего периода была зафиксирована на уровне $r \sim -0,57 \dots -0,83$ ($p < 0,05$). Уровень значимости этой связи, по нашему мнению, определяется внешними условиями, состоянием и послепожарными изменениями почвенно-грунтовых условий в бассейнах рек криолитозоны, в том числе степенью аномального протаивания мерзлотных слоёв.

При анализе более широких доступных хронологий (1939–2017) экстремальных пожарных событий в границах бассейнов рек Средней Сибири (Валендик, Иванова, 1996; Ivanova, 1999; Харук и др., 2005) удалось сопоставить аномально низкий сток с максимумами горимости лесов криолитозоны Сибири (например, в 1942, 1947, 1963, 1969, 1986, 2012, 2013 гг.). Период повторения экстремальных понижений стока, составляющий от 18 до 25 лет, согласуется, например, с приводимыми данными об изменчивости ширины годичных колец в лиственных лесах (Панюшкина, Арбатская, 1999), что, в свою очередь, определяется режимом увлажнения и температурным режимом. Таким образом, значимая отрицательная корреляция аномалий стока и экстремальных пожарных событий (горимости) в регионе вполне ожидаема и может быть формализована модельным соотношением вида (см. рис. 3, модель):

$$\gamma = 0,3 \cdot e^{-0,07D},$$

где γ — безразмерная величина показателя горимости (Мокеев, 1965), вычисляемая как отношение суммарной за год (или помесечно) площади пожаров к общей площади речного бассейна; D — численное значение аномалии стока внутри сезона по отношению к среднелетней норме.

Дальнейшее детальное изучение послепожарных тепловых аномалий, их влияния на сезонно-талый слой почвы и варьирование стоков рек важно для реализации подходов к прогнозированию отклика экосистем бореальной зоны на пирогенное воздействие, которое в современных условиях имеет тенденцию к усилению. На фоне прогнозируемых изменений климата, ужесточения пожарных режимов и повышения горимости лесов криолитозоны (Харук и др., 2005; Швиденко, Щепашенко, 2013; Ponomarev et al., 2016) интегральный эффект постпирогенных тепловых аномалий будет увеличиваться и, вероятно, приобретать всё большие масштабы. Области распространения многолетнемерзлых пород очень чутко реагируют на любые природные или техногенные вмешательства. Один из возможных сценариев изменения теплового режима в поверхностной части криолитозоны — протаивание отдельных участков грунта, вытаивание сегрегационных и жильных льдов, просадка грунта

и возникновение специфических форм термокарстового, отрицательного рельефа в арктическом и субарктическом поясах, чаще всего занятых озёрами. С учётом уровня пирогенного воздействия в современных условиях подобные сценарии могут определять долговременную динамику сезонно-талых слоёв всей криолитозоны Сибири, что требует дальнейшего изучения, в первую очередь с привлечением адаптированных методов спутникового мониторинга.

Работа выполнена по темам № 0356–2016–0707 (0356-2017-0739), 0356–2016–0706 (0356-2017-0738) и при поддержке РФФИ (проект № 17-04-00589), а также Правительства Красноярского края и Красноярского краевого фонда науки (№ 18-41-242003). Использовано техническое обеспечение Центра коллективного пользования и Единого регионального центра ДЗ ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск. Авторы благодарны за предоставленную информацию Центру глобального мониторинга речных стоков (The Global Runoff Data Centre, 56068 Koblenz, Germany).

Литература

1. Анисимова О. А., Шерстюков А. Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 2. С. 90–99.
2. Аржанов М. М., Елисеев А. В., Демченко П. Ф., Мохов И. И. Моделирование изменений температурного и гидрологического режимов приповерхностной мерзлоты с использованием климатических данных (реанализа) // Криосфера Земли. 2007. Т. 11. № 4. С. 65–69.
3. Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Луян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
4. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Луян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
5. Валендик Э. Н., Иванова Г. А. Экстремальные пожароопасные сезоны в бореальных лесах Средней Сибири // Лесоведение. 1996. № 4. С. 12–19.
6. Валендик Э. Н., Киселяхов Е. К., Рыжкова В. А., Пономарев Е. И., Данилова И. В. Крупные пожары в таежных ландшафтах Центральной Сибири // География и природные ресурсы. 2014. № 1. С. 52–59. DOI: 10.1134/S1875372814010065.
7. Виноградов Ю. Б., Семенова О. М., Виноградова Т. А. Гидрологическое моделирование: методы расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 1. С. 11–21.
8. Десяткин Р. В., Десяткин А. Р., Федоров П. П. Температурный режим мерзлотно-таежных почв Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2012. Т. 16. № 2. С. 70–78.
9. Корниенко С. Г. Изучение трансформации тундрового напочвенного покрова на участках пирогенного поражения по данным спутников Landsat // Криосфера Земли. 2017. Т. 21. № 1. С. 93–104. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(93-104).
10. Лебедева Л. С., Семенова О. М., Виноградова Т. А. Расчет глубины сезонноталого слоя в условиях различных ландшафтов колымской водно-балансовой станции на основе гидрологической модели «Гидрограф» // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 2. С. 35–44.
11. Луян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыценко Ф. В., Сычугов И. Г. Спутниковый мониторинг лесных пожаров в XX веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
12. 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.: Лесная промышленность, 1965. С. 26–37.
13. Панюшкина И. П., Арбатская М. К. Дендрохронологический подход в исследовании горимости лесов Эвенкии // Сибирский экологический журнал. 1999. № 2. С. 167–173.
14. Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исследования Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91. DOI: 10.7868/S0205961415010054.
15. Скрябин П. Н., Варламов С. П. Термический режим грунтов нарушенных ландшафтов Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 3. С. 44–49.

16. Харук В. И., Двинская М. Л., Рэнсон К. Д. Пространственно-временная динамика пожаров в лиственничных лесах северной тайги Средней Сибири // Экология. 2005. № 5. С. 1–10.
17. Швиденко А. З., Шенащенко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. № 5. С. 50–61.
18. Bartsch A., Balzter H., George C. Influence of regional surface soil moisture anomalies on forest fires in Siberia observed from satellites // Environmental Research Letters. 2009. No. 4. 9 p. DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045021.
19. Bring A., Shiklomanov A., Lammers R. B. Pan-Arctic river discharge: Prioritizing monitoring of future climate change hot spots // Earth's Future. 2017. V. 5. No. 1. P. 72–92. DOI: 10.1002/2016EF000434.
20. Forkel M., Thonicke K., Beer C., Cramer W., Bartalev S., Schmullius C. Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia // Environmental Research Letters. 2012. No. 7. 9 p. DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044021.
21. Gabysheva L. P., Isaev A. P. Forest fires' impact on microclimatic and soil conditions in the forests of cryolithic zone (Yakutia, North-Eastern Russia) // Сибирский лесной журнал. 2015. №. 6. P. 96–111. DOI: 10.15372/SJFS20150609.
22. Holmes R. M., Shiklomanov A. I., Tank S. E., McClelland J. W., Tretyakov M. River Discharge // Arctic Report Card: Update for 2015. 2015. URL: <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2015/ArtMID/5037/ArticleID/227/River-Discharge>.
23. Ivanova G. A. The history of forest fire in Russia // Dendrochronologia. 1999. V. 16–17. P. 147–161.
24. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson J. K. Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests // Forests. 2016. V. 7. No. 125. P. 1–9. DOI: 10.3390/f7060125.
25. Vermote E., Wolfe R. MOD09GQ MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 250m SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD09GQ.006.
26. Wan Z., Hook S., Hulley G. MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC. 2015. DOI: 10.5067/MODIS/MOD11A1.006.

Remote monitoring of post-fire effects in the permafrost zone of Central Siberia

E. I. Ponomarev, T. V. Ponomareva

*Sukachev Institute of Forest SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia
E-mail: evg@ksc.krasn.ru*

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia
E-mail: bashkova_t@mail.ru*

The paper discusses the dynamics of reflectance and thermal anomalies in post-pyrogenic plots under cryolithozone conditions, studied using Terra/MODIS imagery. Long-term consequences of the “background” in the thermal range (10.780–11.280 μm) are considered, that effect the temperature and water regimes of soils. Rising of the average temperature has been instrumentally recorded for the post-fire plots in the larch forests of Siberia’s cryolithozone in relation to background values by up to $\Delta T = 7.2 \pm 1.3$ °C during the summer, which is 20–40 % higher than the temperature of the undisturbed plots. Temperature anomalies remain more than 10 years under the conditions of natural restoration of the ground cover. It has been shown that excessive surface heating can lead to an increase in the depth of thawing soil layer by 20 % deeper relative to the average statistical rate. The hypothesis has also been tested of a correlation between the relative forest burning index within the boreal river basins and long-term series of the river discharge. In some seasons, a response to pyrogenic effects is recorded, expressed as an abnormally low discharge during summer period ($r \sim -0.57 \dots -0.83$, $p < 0.05$).

Keywords: remote data, Terra/MODIS, temperature, post-fire areas, cryolithozone, seasonally thawed layer, river discharge

Accepted: 08.08.2018
DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-85-95

References

1. Anisimova O. A., Sherstukov A. B., Otsenka roli prirodno-klimaticheskikh factorov v izmineniyakh kriolitozony Rossii (Assessment of the role of natural and climatic factors in the changes of the permafrost zone of Russia), *Kriosfera Zemli*, 2016, Vol. 20, No. 2, pp. 90–99.
2. Arzhanov M. M., Yeliseev A. V., Demchenko P. F., Mohov I. I., Modelirovanie izmenenii temperaturnogo i gidrologicheskogo rezhimov pri poverkhnostnoi merzloty s ispol'zovaniem klimaticheskikh dannykh (reanaliza) (Modeling changes in the temperature and hydrological regimes of near-surface permafrost using climate data (reanalysis)), *Kriosfera Zemli*, 2007, Vol. 11, No. 4, pp. 65–69.
3. Bartalev S. A., Stytsenko S. A., Yegorov V. A., Loupian E. A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite estimating of forest mortality after wildfires in Russia), *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
4. Bartalev S., Egorov V., Zharko V., Loupian E., Plotnikov D., Khvostikov S., Shabanov N., *Sputnikovoe kartografirovaniye rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI, 2016, 208 p.
5. Valendik E. N., Ivanova G. A., Ekstremal'nye pozharoopasnye sezony v boreal'nykh lesakh Srednei Sibiri (Extreme fire seasons in boreal forests of Central Siberia), *Lesovedenie*, 1996, No. 4, pp. 12–19.
6. Valendik E. N., Kisilyakhov E. K., Ryzhkova V. A., Ponomarev E. I., Danilova I. V., Conflagration Fires in Taiga Landscapes of Central Siberia, *Geography and Natural Resources*, 2014, Vol. 35, No. 1, pp. 41–47, DOI: 10.1134/S1875372814010065.
7. Vinogradov Y. B., Semenova O. M., Vinogradova T. A., Gidrologicheskoe modelirovanie: metody rascheta dinamiki teplovoi energii v pochvennom profile (Hydrological modeling: methods for calculating the dynamics of thermal energy in the soil profile), *Kriosfera Zemli*, 2015, Vol. 19, No. 1, pp. 11–21.
8. Desyatkin R. V., Desyatkin A. R., Fedorov P. P., Temperaturnyi rezhim merzlotno-taezhnykh pochv Tsentral'noi Yakutii (Temperature regime of cryogenic taiga soils of Central Yakutia), *Kriosfera Zemli*, 2012, Vol. 16, No. 2, pp. 70–78.
9. Kornienko S. G., Izuchenie transformatsii tundrovogo napochvennogo pokrova na uchastkakh pirogenogo porazheniya po dannym sputnikov Landsat (The study of the tundra ground cover transformation on the pyrogenic damaged sites using Landsat data), *Kriosfera Zemli*, 2017, Vol. 21, No. 1, pp. 93–104, DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2017-1(93-104).
10. Lebedeva L. S., Semenova O. M., Vinogradova T. A., Raschet glubiny sezonnotalogo sloya v usloviyakh razlichnykh landshaftov kolymskoi vodno-balansovoi stantsii na osnove gidrologicheskoi modeli "Gidrograf" (Calculation of the depth of seasonal melting layer under different landscapes conditions in the Kolyma water balance station on the basis of hydrological model Hydrograph), *Kriosfera Zemli*, 2015, Vol. 19, No. 2, pp. 35–44.
11. Loupian E. A., Bartalev S. A., Balashov I. V., Yegorov V. A., Ershov D. V., Kobets D. A., Sen'ko K. S., Stytsenko F. V., Sychugov I. G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v XX veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifry i facty po dannym detectirovaniya aktivnogo goreniya) (Satellite monitoring of forest fires in the 20th century on the territory of the Russian Federation (figures and facts based on the data of active burning detecting)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175, DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-158-175.
12. Mokeev G. A., Vliyaniye prirodnykh i ekonomicheskikh uslovii na gorimost' lesov i okhranu ikh ot pozharov (Natural and economic influence on forest burning and protecting of wildfires), *Sovremennye voprosy okhrany lesov ot pozharov i bor'ba s nimi*, Moscow: Lesnaya promyshlennost, 1965, pp. 26–37.
13. Panyushkina I. P., Arbatskaya M. K., Dendrokronologicheskii podkhod v issledovanii gorimosti lesov Evenkii (Dendrochronological approach in the study of the Evenkia forests burning), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 1999, No. 2, pp. 167–173.
14. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Sputnikovoe detectirovanie lesnykh pozharov i geoinformatsionnye metody kalibrovki dannykh (Satellite detection of forest fires and geoinformation methods for results calibrating), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84–91, DOI: 10.7868/S0205961415010054.
15. Skryabin P. N., Varlamov S. P., Termicheskii rezhim gruntov narushennykh landshaftov Tsentral'noi Yakutii (Thermal regime of soils of disturbed landscapes of Central Yakutia), *Kriosfera Zemli*, 2013, Vol. 17, No. 3, pp. 44–49.
16. Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Ranson J. K., Prostranstvenno-vremennaya dinamika pozharov v listvennichnykh lesakh severnoi taygi Srednei Sibiri (Spatial-temporal dynamics of fires in larch forests of the northern taiga of Central Siberia), *Ekologiya*, 2005, No. 5, pp. 1–10.
17. Shvidenko A. Z., Schepahchenko D. G., Climate Change and Wildfires in Russia, *Contemporary Problems of Ecology*, 2013, Vol. 6, No. 5, pp. 50–61, DOI: 10.1134/S199542551307010X.

18. Bartsch A., Balzter H., George C., Influence of regional surface soil moisture anomalies on forest fires in Siberia observed from satellites, *Environmental Research Letters*, 2009, No. 4, 9 p., DOI: 10.1088/1748-9326/4/4/045021.
19. Bring A., Shiklomanov A., Lammers R. B., Pan-Arctic river discharge: Prioritizing monitoring of future climate change hot spots, *Earth's Future*, 2017, Vol. 5, No. 1, pp. 72–92, DOI: 10.1002/2016EF000434.
20. Forkel M., Thonicke K., Beer C., Cramer W., Bartalev S., Schmillius C., Extreme fire events are related to previous-year surface moisture conditions in permafrost-underlain larch forests of Siberia, *Environmental Research Letters*, 2012, No. 7, 9 p., DOI: 10.1088/1748-9326/7/4/044021.
21. Gabysheva L. P., Isaev A. P., Forest fires' impact on microclimatic and soil conditions in the forests of cryolithic zone (Yakutia, North-Eastern Russia), *Sibirskij Lesnoj Zhurnal* (Siberian J. Forest Science), 2015, No. 6, pp. 96–111, DOI: 10.15372/SJFS20150609.
22. Holmes R. M., Shiklomanov A. I., Tank S. E., McClelland J. W., Tretiakov M., River Discharge, *Arctic Report Card: Update for 2015*, 2015, URL: <https://www.arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2015/ArtMID/5037/ArticleID/227/River-Discharge>.
23. Ivanova G. A., The history of forest fire in Russia, *Dendrochronologia*, 1999, Vol. 16–17, pp. 147–161.
24. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Ranson J. K., Wildfires Dynamics in Siberian Larch Forests, *Forests*, 2016, Vol. 7, No. 125, pp. 1–9, DOI: 10.3390/f7060125.
25. Vermote E., Wolfe R., *MOD09GQ MODIS/Terra Surface Reflectance Daily L2G Global 250m SIN Grid V006* [Data set]. NASA EOSDIS LP DAAC, 2015, DOI: 10.5067/MODIS/MOD09GQ.006.
26. Wan Z., Hook S., Hulley G., *MOD11A1 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity Daily L3 Global 1km SIN Grid V006* [Data set], NASA EOSDIS LP DAAC, 2015, DOI: 10.5067/MODIS/MOD11A1.006.