

Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным

Е. И. ПОНОМАРЕВ^{1,2}, Т. В. ПОНОМАРЕВА^{1,2}

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН –
обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: evg@ksc.krasn.ru

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

Статья поступила 23.01.2018

Принята к печати 02.02.2018

АННОТАЦИЯ

Представлены результаты анализа динамики тепловых полей на участках, пройденных пожарами, выполненного по материалам дистанционных спутниковых съемок. Для послепожарных участков мерзлотной зоны показано присутствие характерного “фона” в тепловом диапазоне (10,780–11,280 мкм), вызванного изменениями параметров древостоя, напочвенного покрова и подстилки. Инструментально зафиксировано повышение средней температуры поверхности послепожарных участков в листовенничках относительно фоновых значений на величину до $\Delta T = 7,2 \pm 1,3$ °C в летний период, что на 20–40 % выше, чем температура фоновых ненарушенных участков. Аномалии температурного фона в условиях естественного восстановления напочвенного покрова сохраняются более 10 лет. Установлено, что скорость их восстановления ниже в 2,5 раза по сравнению с динамикой вегетационного индекса NDVI. Численными методами показано, что аномалии температуры на поверхности могут приводить к увеличению глубины протаивания почвенного слоя на величину до 20 % больше, чем среднестатистическая норма.

Ключевые слова: дистанционные данные, температура, послепожарные участки, мерзлотная зона, листовенничные леса, сезоннотальный слой.

В современных условиях для многих регионов мира выявлена тенденция ужесточения пожарных режимов, повышения уровня горимости лесов, увеличения частоты возникновения пожаров и их площадей [Flannigan et al., 2009; Kharuk et al., 2016; Пономарев, Харук, 2016]. В бореальной зоне Сибири фиксируется не менее 70 % общего количества пожаров растительности, и, по некоторым оценкам [Барталев и др., 2015], это сопро-

вождается гибелью лесов на площадях до 1,5–3 млн га ежегодно.

Наиболее значимые послепожарные изменения наблюдаются в мерзлотной зоне Сибири [Forkel et al., 2012] в древостоях различной степени разреженности, где на 70 % территории преобладают насаждения листовенницы (*Larix* spp.) [Абаимов и др., 1997; Коропачинский, Встовская, 2002]. Наряду с климатическими процессами, пожары в эко-

системах криолитозоны могут ускорять развитие негативных последствий. В частности, актуальные вопросы, такие как изменения в распределении и деградация приповерхностных слоев мерзлоты, вариации температурного, водного балансов и т. д., вызванные нарушениями растительных покровов, активно обсуждаются в публикациях [Анисимова, Шерстюков, 2016; Brown et al., 2016; Безкоровайная и др., 2017]. Послепожарные изменения теплового баланса способны провоцировать нарушение “переходного слоя”, выполняющего защитную функцию предохранения от нагрева верхней части многолетнемерзлых пород ледового комплекса [Десяткин Р. В., Десяткин А. Р., 2017].

В настоящее время и при современных масштабах пожарных процессов изучение влияния лесных пожаров на состояние, функционирование и динамику экосистем требует использования объективных средств контроля, долговременного мониторинга и точной пространственно-временной привязки данных на больших территориях, что может осуществляться только на основе использования спутниковых мониторинговых комплексов. В данной работе использован большой задел данных спутниковых съемок в широком спектральном диапазоне для анализа и моделирования масштабов нарушения и послепожарной динамики на территории мерзлотной зоны Сибири.

Основная цель данной работы – количественное описание изменений температурных режимов на послепожарных участках в лиственничниках мерзлотной зоны Сибири. Рассматривалась рабочая гипотеза о том, что массовые послепожарные нарушения растительных покровов севера Сибири оказывают значимое влияние на тепловой режим пограничного слоя “напочвенный покров” – “почва” – “зона залегания мерзлоты”.

Рассмотрены следующие аспекты вопроса:

1) относительная оценка нарушенности лиственничников района исследований пожарами за период инструментальных спутниковых наблюдений 1996–2017 гг.;

2) динамика тепловых режимов гарей в сравнении с фоновыми участками посезонно и в течение рассматриваемого временного интервала;

3) влияние нарушенности растительного покрова на мощность сезонноталого слоя и численные подходы в оценке вариации глубины протаивания мерзлотного слоя на поврежденных участках леса.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований. Исследуемый регион – территория Средней Сибири в границах 57–67° с. ш., 85–110° в. д., включая при-тундровые леса и редкостойную тайгу Среднесибирского плоскогорно-таежного лесного района (рис. 1). Общая площадь рассматриваемой территории 113,9 млн га. Древостой сформированы лиственницами сибирской (*Larix sibirica*) и Гмелина (*Larix gmelinii*).

Почвенный покров представлен криоземами, криометаморфическими почвами, подбурами, на крутых склонах и на вершинах выше границы леса распространены петроземы и литоземы. Почвы развиваются в условиях резко континентального климата, многолетней мерзлоты, криогенных процессов, которые, взаимодействуя, определяют генетическую специфику почв. Они характеризуются малой мощностью от 20 до 100 см и слабой дифференциацией почвенного профиля [Безкоровайная и др., 2017]. Многолетняя мерзлота распространена повсеместно на выровненных элементах рельефа, в меньшей степени выражена на дренированных участках склонов и долин с глубоким снежным покровом. Уровень залегания мерзлоты сильно отличается в зависимости от рельефа от 5 до 150 см.

Большинство пожаров происходит в северных лиственничниках естественного происхождения, что позволяет в определенном смысле рассматривать их как индикатор климатических изменений. Экстремальные пожароопасные сезоны в зоне их доминирования до начала XX в. повторялись не чаще 2–3 раз в столетие [Ваганов, Арбатская, 1996; Иванова, 1996; Kharuk et al., 2016]. В современных условиях массовые пожары, относимые к категории ландшафтных [Валендик и др., 2014], фиксируются до 2 раз в десятилетие. Основная особенность лиственничников – накопление больших запасов (4–8 кг/м²) лесных горючих материалов (ЛГМ) в подстил-

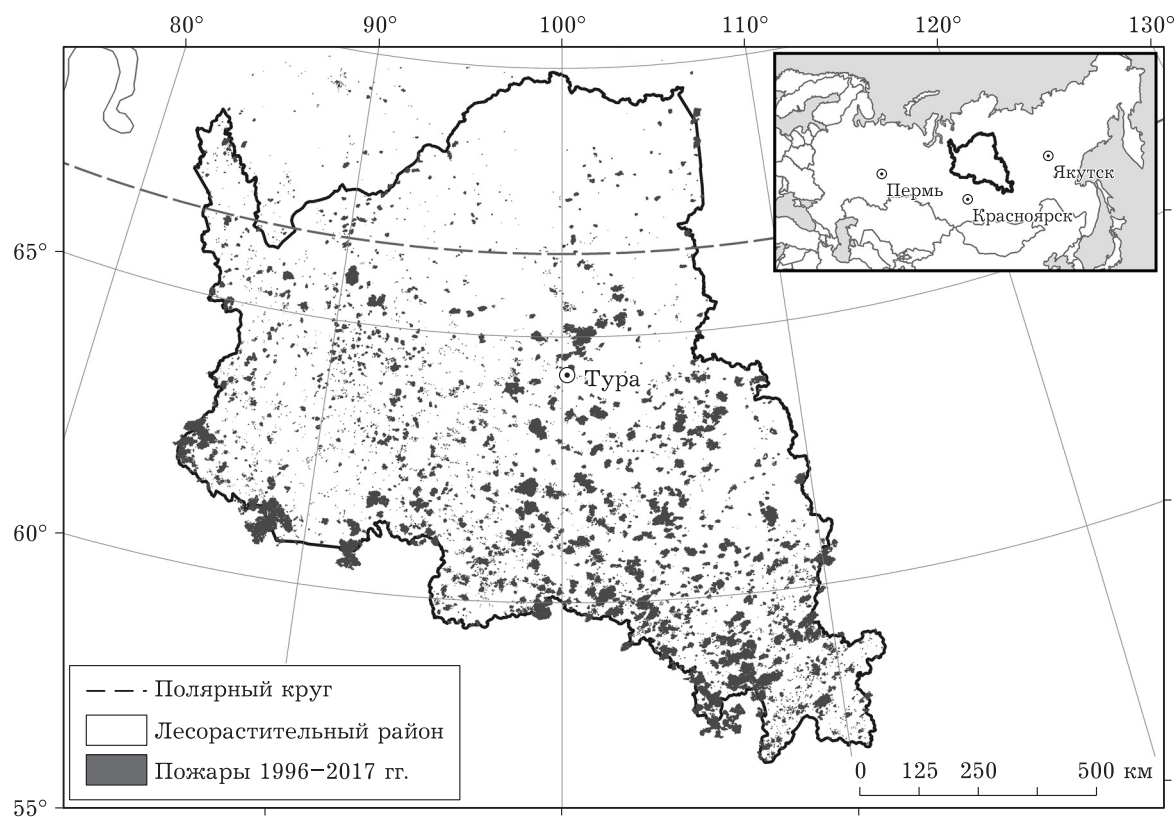


Рис. 1. Район исследований – Среднесибирский плоскогорно-таежный лесной район. Выборка пожаров выполнена по данным спутникового мониторинга 1996–2017 гг.

ке [Цветков, 2005]. Процессы аккумуляции органического вещества наиболее выражены на выровненных участках рельефа в нижних частях склонов.

Процесс горения в лиственничниках характеризуется низкой скоростью продвижения кромки, глубиной прогорания в диапазоне до 20 см [Цветков, 2005] и высокой интенсивностью тепловыделения [Пономарев, 2013]. Отмечается, что пожары и пожарные нарушения растительного покрова способствуют ускорению негативных процессов в криолитозоне, включая изменение баланса теплового режима, глубины протаивания почвы и деградацию мерзлотного слоя, появление избыточного увлажнения поверхностного корнеобитаемого слоя, изменение физических свойств и структуры почвы.

Температурный градиент между участком после пожара и фоном определяется изменением в состоянии растительности (рис. 2). Величина градиента (или относительной аномалии) определяется нарушенностью расти-

тельного покрова (уровнем дефолиации, изменением напочвенного покрова, мохово-лишайникового яруса). Количественные характеристики изменений температурного режима послепожарных участков позволили оценить вариацию уровня сезонного протаивания мерзлотного слоя с использованием численных методов.

Исходные данные. В работе использованы данные спутникового мониторинга за период 1996–2017 гг., представленные в формате геоинформационного банка данных полигонов пожаров [Пономарев, Швецов, 2015]. Исходными материалами служили спутниковые съемки NOAA/AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), TERRA и AQUA/MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с пространственным разрешением 1000 м. Съемки среднего разрешения (Landsat/ETM/OLI, 15–30 м) использовались для валидации участков, пройденных огнем. Для привязки полигонов пожаров к преобладающим древостоям применялся векторный по-

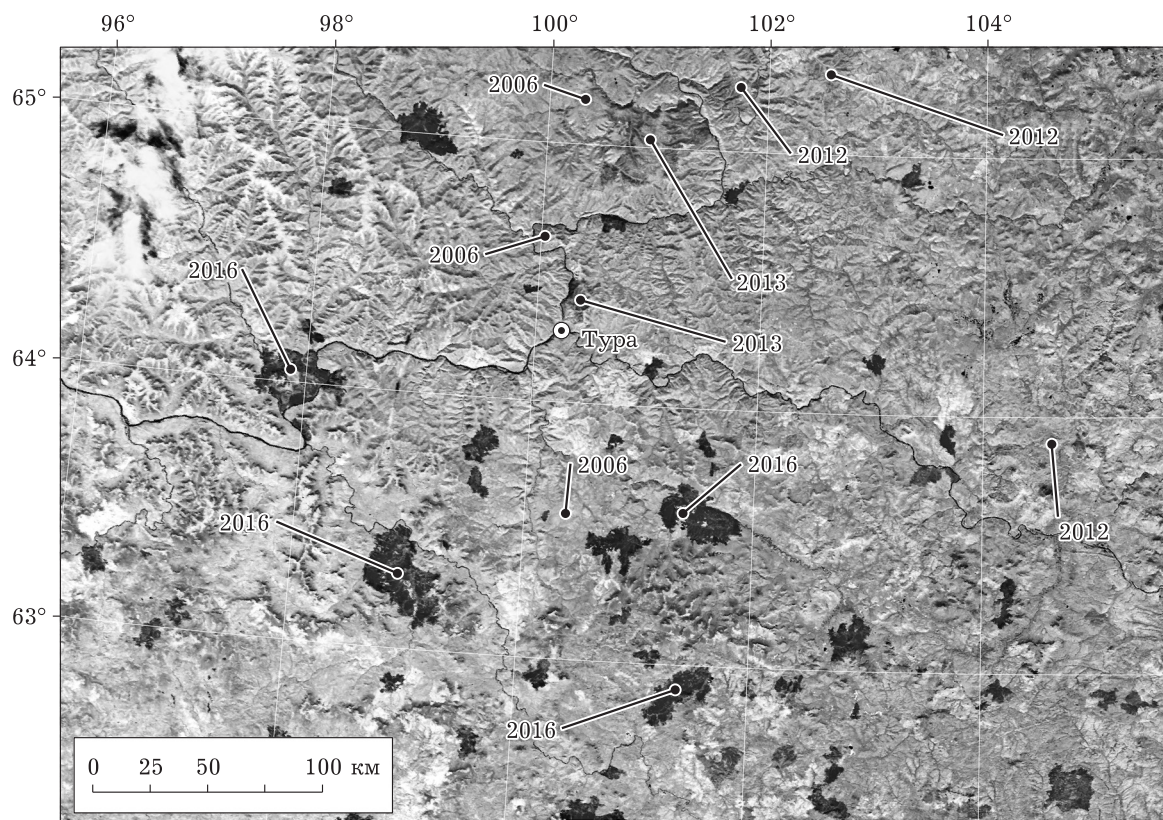


Рис. 2. Мозаичность растительного покрова на снимке TERRA/MODIS. Послепожарные тепловые аномалии (черный цвет) на участках различного срока давности (с 2006, 2012, 2013 и 2016 гг.) выделяются в спектральном диапазоне $\lambda = 10,780\text{--}11,280$ мкм

лигональный слой карты растительности. Реализована процедура геопространственного пересечения векторного слоя полигонов пожаров и подкласса “лиственничники” векторного слоя растительности.

Характеристики послепожарных участков получены на основе анализа спектральных признаков с использованием ретроспективных материалов съемки TERRA и AQUA (см. рис. 2) в диапазонах длин волн $\lambda_1 = 0,620\text{--}0,670$ мкм, $\lambda_2 = 0,841\text{--}0,876$ мкм и $\lambda_3 = 10,780\text{--}11,280$ мкм. Калиброванные значения в указанных диапазонах спектра позволили сформировать исходные ряды данных об альбедо поверхности (%), инвариантном показателе “вегетационный индекс” (NDVI), а также о значениях температуры ($^{\circ}\text{C}$) интегрированных с поверхностью пикселя изображения.

В сочетании данных диапазонов в наибольшей степени проявляются дешифровочные признаки послепожарных участков, контрастирующие с фоновыми значениями. При

этом для лиственничников мерзлотной зоны отмечено, что наряду с изменениями спектров растительности после пожаров, гари имеют характерный “фон” также и в тепловом диапазоне (10,780–11,280 мкм). Для примера на рис. 2 показан фрагмент изображения TERRA/MODIS, на котором тепловые аномалии (черные полигоны) соответствуют послепожарным участкам одно-, пяти- и десятилетнего срока.

Аномалии характеристик послепожарных участков. Геоинформационными средствами выявлено число пожаров в районе исследований за весь рассматриваемый период. Общая площадь, пройденная огнем, вычислялась с учетом возможных перекрытий полигонов пожаров при повторном горении одного и того же участка. Стандартными методами, принятыми в лесной пирологии, вычисляли относительный показатель горимости $\left(\gamma = \frac{\sum S_{\text{пж}}}{S} \times 100 \text{ \%} \right)$, как отношение сум-

марной площади пожаров за сезон к общей площади рассматриваемой территории.

Рассмотрена статистически значимая выборка участков, соответствующих 100 наиболее крупным пожарам ($S > 1000$ га). Для каждого из них отобраны материалы съемок, начиная с момента регистрации пожара. В границах каждого полигона пожара определяли значения альbedo подстилающей поверхности, индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и температуры в 5–10 пикселях изображения TERRA/MODIS в зависимости от размера послепожарного участка. Далее для характеристики рассматриваемого полигона пожара выполняли процедуру усреднения значений. Временную динамику восстанавливали для вегетационного периода, а также для послепожарного периода с 5-летним интервалом. Использованный массив данных содержал более 1000 измерений. Для контроля использовали аналогично полученные данные, зарегистрированные для фоновых (неповрежденных) участков в непосредственной близости от гарей.

Послепожарные аномалии NDVI и температуры определяли и в абсолютных значениях, и как относительную величину отличий послепожарных участков ($T_{\text{тест}}$, $\text{NDVI}_{\text{тест}}$) от неповрежденных участков ($T_{\text{фон}}$, $\text{NDVI}_{\text{фон}}$):

$$\Delta T_{\text{отн}} = \frac{\bar{T}_{\text{тест}} - \bar{T}_{\text{фон}}}{\bar{T}_{\text{фон}}} \times 100 \%,$$

$$\Delta \text{NDVI}_{\text{отн}} = \frac{\overline{\text{NDVI}_{\text{тест}}} - \overline{\text{NDVI}_{\text{фон}}}}{\overline{\text{NDVI}_{\text{фон}}}} \times 100 \%.$$

Численное моделирование глубины протаивания. Численными методами выполняли оценки относительного изменения глубины протаивания мерзлотного слоя в зависимости от аномалии теплового поля поверхности исследуемого участка. Расчеты динамики тепловой энергии в почве основаны на использовании решения уравнения теплопроводности в частных производных [Аржанов и др., 2007; Виноградов и др., 2015]

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

с граничными условиями Стефана фазовых переходов на границе слоев

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

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

Решение Стефана для глубины слоя (x) сезонного протаивания пород имеет вид [Аржанов и др., 2007]:

$$x = \sqrt{\frac{2\lambda_f(T_s - T_f)\tau}{l \cdot u \cdot \rho}}, \quad (1)$$

где T_s – температура поверхности; T_f – начальная температура в точке промерзания; λ_f – коэффициент теплопроводности мерзлой почвы, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$; τ – продолжительность периода прогрева.

Зафиксировав температуру в слое промерзания $T_f = 0$ °C, получили зависимость $x(T_s)|_{T_f=0} = \alpha \cdot \sqrt{T_s}$, где $\alpha = \text{const}$. Оценка относительной вариации глубины (Z) залегания мерзлотного слоя в условиях аномального прогрева поверхности по отношению к фону определяли как

$$Z = \frac{\Delta x}{x_{\text{фон}}} = \frac{\alpha \cdot (\sqrt{T_{\text{тест}}} - \sqrt{T_{\text{фон}}})}{\alpha \cdot \sqrt{T_{\text{фон}}}} = \sqrt{\frac{T_{\text{тест}}}{T_{\text{фон}}}} - 1, \quad (2)$$

где $T_{\text{тест}}$ – усредненные значения температуры на поверхности нарушенного участка; $T_{\text{фон}}$ – температурный фон ненарушенного участка.

На основе предложенного подхода проведены расчеты вариаций глубины протаивания мерзлотного слоя в летний период времени в условиях аномального прогрева поверхности. Полученные результаты существенно дополняют исследования в этом направлении, проводимые на основе натуральных экспериментов и модельных подходов [Sofronov et al., 1999; Огородникова, Федорова, 2011; Анисимов и др., 2015; Лебедева и др., 2015; Безкоровая и др., 2017]. Кроме того, использование дистанционных данных и численных методов позволяет дать качественную и количественную характеристику масштабам процессов, наблюдающихся после пожаров в зоне мерзлоты севера Сибири.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Степень нарушенности территории. Получены и обобщены среднеголетние показатели горимости лесов района исследований. За 22 года доступных инструментальных наблюдений на исследуемой территории зафиксированы пожары на общей площади более 12,743 млн га (табл. 1), что составляет 10,9 % всей территории, средняя горимость в год $\gamma = 0,51 \pm 0,18$ %. Количественные показатели горимости и числа пожаров в течение пожароопасного периода года варьируют в широких пределах, стандартное отклонение по всем характеристикам составляло 80–90 % от среднего.

Послепожарные участки и их спектральные отличия от характеристик фоновых участков определяют мозаичность территории при многоспектральной съемке со спутника. Характерные отличия, так называемые спектральные признаки, прослеживаются на долговременных данных съемки в течение 10 лет и более. Это позволило далее провести ана-

лиз послепожарной динамики исследуемых характеристик для трех сроков давности 10, 5 и один год, используя материалы съемки TERRA/MODIS, выполненной в 2017 г.

Аномалии температуры и индекса NDVI.

Для послепожарных участков получены количественные оценки аномалии вегетационного индекса NDVI (снижение на 61 %) и температуры поверхности (повышение на 47 %) в сравнении с фоновыми значениями.

На послепожарных участках однолетней давности значения показателя NDVI составили 53 ± 8 % от уровня фоновых участков ($NDVI_{фон} = 0,65 \pm 0,06$). При этом максимум температурной аномалии, зафиксированный в первой декаде июля, $-7,2 \pm 1,3$ °C (рис. 3). В среднем, в летний период (июль – начало августа) аномалия температурного поля варьировала на уровне $6,0 \pm 0,9$ °C.

За пятилетний срок отклонения значений NDVI на послепожарных участках снизились вдвое и составляли не более 21 ± 7 % от уровня фоновых значений. Аномалии температуры поверхности проявлялись так же в

Т а б л и ц а 1

Пожары (ЛП) в районе исследований за 1996–2017 гг.

Характеристика	Число ЛП	Площадь ЛП, млн га	Горимость (γ), %
В целом за 22 года	7614	12,743	10,90
В среднем в год	346	0,579	0,51
Стандартное отклонение (σ)	279	0,56	0,49
Доверительный интервал, $\alpha = 0,1$	98	0,199	0,175

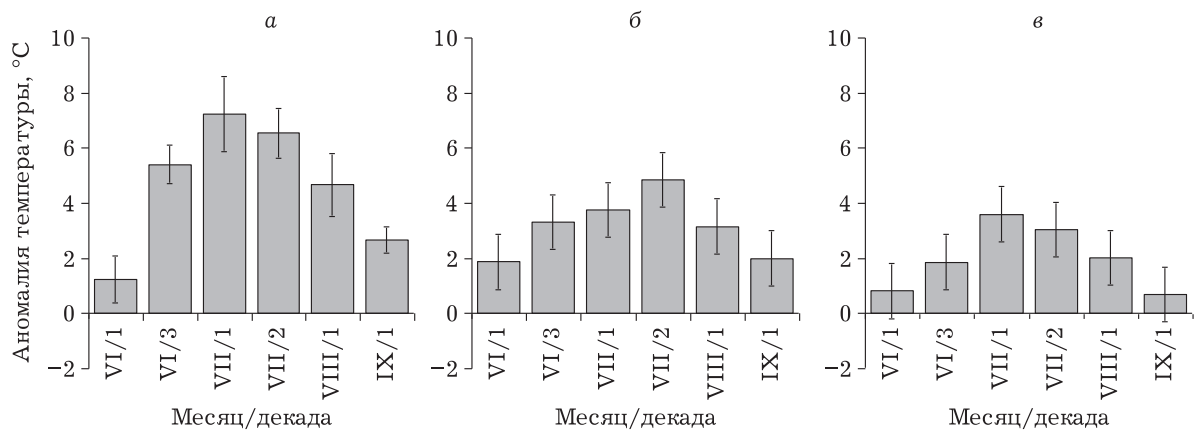


Рис. 3. Распределение абсолютных аномалий температуры поверхности в сравнении с фоном в течение сезона на послепожарных участках однолетнего (а), 5-летнего (б) и 10-летнего срока давности (в). По данным измерений радиометром TERRA/MODIS. Доверительный интервал для уровня надежности $\alpha = 0,05$

Усредненные характеристики послепожарных участков в период максимума тепловой аномалии (1–2 декады июля).

Год после пожара	$\Delta\text{NDVI}_{\text{отн}}, \%$	Диапазон абсолютных максимумов температурной аномалии (ΔT), °С	Z, %
1	$53,5 \pm 10,7$	6,5–7,2	15,2–20,3
5	$21,0 \pm 7,8$	3,8–4,9	10,5–10,9
10	$9,0 \pm 5,0$	3,4–4,6	7,4–10,1

течение всего теплого периода, варьируя от 1,9 °С в начале и в конце вегетационного сезона до 4,9 °С во второй декаде июля (среднее 2,8 °С, $\sigma = 1,1$ °С).

Через десять лет послепожарные участки фактически не отличаются от фоновых по индексу NDVI (рис. 4), что определяется динамикой восстановления растительного покрова. Зафиксированное отклонение от фоновых значений в среднем не превышало 9 % при существенной дисперсии $\sigma = 5$ %. При этом аномалии теплового фона оставались значимыми, достигая максимума 3,6 °С в первой декаде июля, при среднем за вегетационный период $\sim 1,8 \pm 0,9$ °С.

В целом установлено, что скорость восстановления аномалий температуры по сравнению с динамикой NDVI ниже в 2,5 раза, коэффициенты экспоненциальной функции равны $-0,08$ и $-0,2$ соответственно (см. рис. 4).

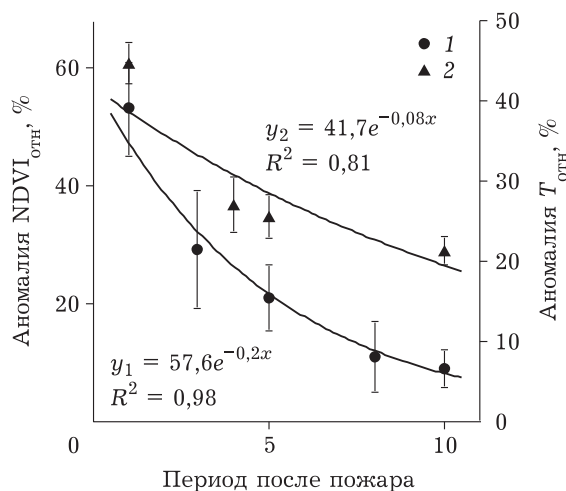


Рис. 4. Динамика относительной аномалии индекса NDVI (1) и температуры (2) на послепожарных участках в течение 10-летнего срока восстановления растительного покрова. По данным спутниковых измерений

Относительная вариация глубины протаивания. Аномальный прогрев значительных участков является причиной того, что глубина протаивания (Z) в среднем на 10–20 % (табл. 2; рис. 5) больше, чем среднестатистическая норма, что следует из проведенного численного моделирования на основе (2). Решение Стефана для глубины слоя сезонного протаивания пород (1) в качестве параметра содержит τ – длительность периода нагрева. В условиях устойчивого антициклона, как правило, действующего в районе исследований 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 м. С учетом запазды-

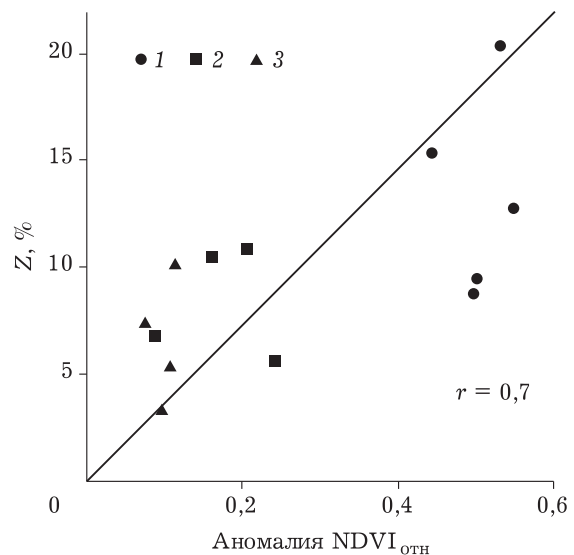


Рис. 5. Оценки численными методами приращение относительной глубины протаивания (Z) в течение теплого периода в зависимости от динамики послепожарного состояния растительности и почвенного покрова по индексу NDVI. Через один год после пожара (1), пять лет после пожара (2), десять лет после пожара (3)

вания температурной динамики с глубиной профиля до 10–20 дней [Десяткин и др., 2012], и времени фиксируемых максимумов температуры на поверхности (см. табл. 2; рис. 3) периодом максимального протаивания в исследуемом районе является третья декада июля – начало августа.

ОБСУЖДЕНИЕ

Большая часть (до 90 %) всех площадей пожарных повреждений за последние два десятилетия зафиксированы в течение четырех пожароопасных сезонов 2006, 2012, 2013, 2016 гг., когда горимость составляла 2,04 %, 1,67, 1,86, 3,79 % соответственно. Это превышает как среднюю горимость по Сибири (1,19 %) [Ponomarev et al., 2016], так и показатель (0,56 %), характерный для лесов запада Канады [de Groot et al., 2013]. В целом полученный результат характеризует значимость масштаба нарушения лиственничников пожарами, так как более 10 % всей площади региона подвергалось воздействию огня. При этом на этапе геопространственного анализа в ГИС исключены возможные завышения общей площади, которые связаны с многократным учетом пожаров на одной и той же территории, а также вызванные низким пространственным разрешением исходных спутниковых данных [Пономарев, Швецов, 2015].

Основываясь на результатах анализа динамики характеристик исследованных участков, можно констатировать, что частичное восстановление растительных покровов на послепожарных участках не компенсирует изменения, последствием которых является аномалия теплового поля поверхности. Согласно результатам натурных экспериментов, полное восстановление запасов подстилки приближается к фоновым значениям не ранее 24-летнего срока после пожара [Безкоровайная и др., 2017]. В этих условиях избыточный тепловой поток длительное время может оказывать влияние на состояние приповерхностных слоев почвы, обеспечивая изменение температуры в различных горизонтах, включая мерзлотный слой. Подобный эффект зафиксирован, в частности, на Аляске [Brown et al., 2016]. Полученные результаты согласуются также с механизмом влияния мохово-лишайникового покрова на мно-

голетнемерзлотные грунты, который описан в ряде работ [Лебедева и др., 2015; Анисимова, Шерстюков, 2016]. Несомненно, это определяет и динамику процессов лесовосстановления, что необходимо учитывать при выполнении оценок состояния, гибели или мониторинга восстановительных процессов в лесах мерзлотной зоны, выполняемых спутниковыми методами [Барталев и др., 2015].

Расчеты и натурные измерения, которые обсуждаются в публикациях по теме [Десяткин и др., 2012; Лебедева и др., 2015], фиксируют среднестатистическую норму сезонного протаивания мерзлотных почв в условиях, схожих с районом исследований на уровне 0,6–2,0 м. Вариация определяется внешними условиями, характеристиками растительности, включая древостой, мощностью мохово-лишайникового покрова и интенсивностью естественного нагрева поверхности. В соответствии с полученными результатами, послепожарные участки севера Средней Сибири в летний период характеризуются еще и аномальным прогревом поверхности, когда температура в среднем на 20–40 % выше, чем фоновая. Влияние таких аномалий теплового баланса территорий также следует учитывать при моделировании состояния “переходного слоя”, выполняющего защитную функцию предохранения от нагрева верхней части многолетнемерзлых пород [Десяткин Р. В., Десяткин А. Р., 2017], в оценках глубины сезонно-талого слоя [Огородникова, Федорова, 2011; Лебедева и др., 2015] или при построении карт уязвимости мерзлоты [Анисимова, Шерстюков, 2016]. Низкая скорость выравнивания тепловой аномалии, особенно в первые 10 лет после пожара, позволяет рассматривать этот фактор долговременного влияния на состояние почвы и мерзлотного слоя как один из значимых. На фоне прогнозируемых изменений климата, ужесточения пожарных режимов [Ваганов, Арбатская, 1996; Flannigan et al., 2009; Валендик и др., 2014] и повышения горимости северной тайги [Kharuk et al., 2016; Ponomarev et al., 2016] значение данного фактора будет увеличиваться и, вероятно, приобретать все большие масштабы. Таким образом, пожарные нарушения растительного покрова, фиксируемые в лиственничниках Сибири, формируют условия для значимого изменения существующе-

го теплового баланса на локальных территориях. Однако с учетом значительной доли суммарной площади повреждений это может определять последующую динамику мерзлоты всего региона, что требует дальнейшего изучения и мониторинга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения температурного режима на послепожарных участках в Среднесибирском плоскогорно-таежном лесном районе проявляются в аномальном повышении средней температуры поверхности по сравнению с фоновыми значениями на величину до $\Delta T = 7,2 \pm 1,3$ °С в летний период. Это на 20–40 % выше, чем температура ненарушенной территории.

Значения индекса NDVI, которые определяются скоростью восстановления растительности, выравниваются в течение 3–5 лет после пожара, а частичное восстановление растительных покровов не компенсирует изменения, последствием которых являются долговременные температурные аномалии. Тепловой фон на участках с нарушениями растительного покрова сохраняется на значимом уровне более 10 лет.

Численно показано, что аномальный прогрев значительных участков в мерзлотной зоне может вести к сезонному увеличению глубины протаивания почвенного профиля в среднем на 10–20 % (см. рис. 5) больше, чем среднестатистическая норма.

Работа выполнена при поддержке РФФИ № 17-04-00589, 18-05-00432, а также Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 17-41-240475.

В работе использованы технические возможности приемных комплексов Центра коллективного пользования, а также лаборатории дистанционного зондирования ФИЦ КНЦ СО РАН, г. Красноярск.

ЛИТЕРАТУРА

Абаимов А. П., Бондарев А. И., Зырянова О. А., Шитов С. А. Леса Красноярского Заполярья. Новосибирск: Наука, 1997. 208 с.
Анисимов О. А., Жирков А. Ф., Шерстюков А. Б. Современные изменения криосферы и природной среды

в Арктике // Арктика. XXI век. Естественные науки. 2015. № 2 (3). С. 24–47.
Анисимова О. А., Шерстюков А. Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // Криосфера Земли. 2016. Т. XX, № 2. С. 90–99.
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) // Там же. 2007. Т. XI, № 4. С. 65–69.
Барталев С. А., Стыценок Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
Безкоровая И. Н., Борисова И. В., Климченко А. В., Шабалина О. М., Захарченко Л. П., Ильин А. А., Бескровный А. К. Влияние пирогенного фактора на биологическую активность почв в условиях многолетней мерзлоты (Центральная Эвенкия) // Вестн. КрасГАУ. 2017. № 9. С. 181–189.
Ваганов Е. А., Арбатская М. К. История климата и частота пожаров в центральной части Красноярского края. 1. Климатические условия сезона и распределение пожаров в сезоне // Сиб. экол. журн. 1996. № 3 (1). С. 9–18.
Валендик Э. Н., Кисилыхов Е. К., Рыжкова В. А., Пономарев Е. И., Данилова И. В. Крупные пожары в таежных ландшафтах Центральной Сибири // Геогр. и прир. рес. 2014. № 1. С. 52–59. doi: 10.1134/S1875372814010065.
Виноградов Ю. Б., Семенова О. М., Виноградова Т. А. Гидрологическое моделирование: методы расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле // Криосфера Земли. 2015. Т. XIX, № 1. С. 11–21.
Десяткин Р. В., Десяткин А. Р. Термический режим мерзлотной лугово-черноземной солонцеватой почвы в многолетнем цикле // Почвоведение. 2017. № 11. С. 1344–1354. doi: 10.7868/S0032180X17090027 [Desyatkin R. V., Desyatkin A. R. Temperature regime of solonchic meadow-chernozemic permafrost-affected soil in a long-term cycle // Eurasian Soil Sci. 2017. N 50. P. 1301–1310. doi: 10.1134/S1064229317090022].
Десяткин Р. В., Десяткин А. Р., Федоров П. П. Температурный режим мерзлотно-таежных почв Центральной Якутии // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI, № 2. С. 70–78.
Иванова Г. А. Экстремальные пожароопасные сезоны в лесах Эвенкии // Сиб. экол. журн. 1996. Т. 3, № 1. С. 29–34.
Коропачинский И. Ю., Встовская Т. Н. Древесные растения Азиатской России. Новосибирск: Гео, 2002. 707 с.
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. XIX, № 2. С. 35–44.
Огородникова Н. Н., Федорова И. В. Расчеты глубины протаивания многолетнемерзлых пород на примере о. Самойловский (дельта реки Лена) // Водная среда и природно-территориальные комплексы: исследование, использование, охрана: мат-лы IV конф. молодых ученых с междунар. участием. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 2011. С. 29–33.

- Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона Сибири в условиях наблюдаемых изменений климата // Сиб. экол. журн. 2016. № 1. С. 38–46. doi: 10.15372/SEJ20160104. [Ponomarev E. I., Kharuk V. I. Wildfire occurrence in forests of the Altai-Sayan region under current climate changes // Contemporary Problem of Ecology. 2016. Vol. 9, N 1. P. 29–36. doi: 10.1134/S199542551601011X].
- Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 1. С. 84–91. doi: 10.7868/S0205961415010054.
- Цветков П. А. Адаптация лиственницы Гмелина к пожарам в северной тайге Средней Сибири // Сиб. экол. журн. 2005. № 1. С. 117–129.
- Brown D. R. N., Jorgenson M. T., Kielland K., Verbyla D. L., Prakash A., Koch J. C. Landscape effects of wildfire on permafrost distribution in interior Alaska derived from remote sensing // Remote Sens. 2016. N 8. (654). 22 p. doi: 10.3390/rs8080654.
- de Groot W. J., Cantin A. S., Flannigan M. D., Soja A. J., Gowman L. M., Newbery A. A comparison of Canadian and Russian boreal forest fire regimes // Forest Ecol. and Manage. 2013. Vol. 294. P. 23–34. doi:10.1016/j.foreco.2012.07.033.
- Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // Global Change Biol. 2009. Vol. 15, N 3. P. 549–560. doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x.
- 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 // Environ. Res. Lett. 2012. N 7 (044021). 9 p. doi:10.1088/1748-9326/7/4/044021.
- Kharuk V. I., Dvinskaya M. L., Petrov I. A., Im S. T., Ranson K. J. Larch forests of middle Siberia: Long-term trends in fire return intervals // Regional Environ. Change. 2016. N 8. P. 2389–2397.
- Ponomarev E. I. Radiative power of wildfires in Siberia on the basis of TERRA/Modis imagery processing // Folia Forestalia Polonica. Ser. A. 2013. Vol. 55 (2). P. 102–110. doi: 10.2478/ffp-2013-00011.
- Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Renson J. K. Wildfires dynamics in Siberian larch forests // Forests. 2016. Vol. 7, N 125. P. 1–9. doi:10.3390/f7060125.
- Sofronov M. A., Volokitina A. V., Kajimoto T. Ecology of wildland fires and permafrost: Their interdependence in the northern part of Siberia // Proc. of 8-th Symp. on the Joint Siberian Permafrost Studies. 1999. P. 211–218.

The Effect of Post-Fire Temperature Anomalies on Seasonal Thawing of Soils in the Permafrost Zone of Central Siberia Evaluated Using Remote Data

E. I. PONOMAREV^{1,2}, T. V. PONOMAREVA^{1,2}

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: evg@ksc.krasn.ru

² Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79

The results of the analysis of thermal field dynamics on post-fire areas performed using remote satellite imagery are presented in the paper. The presence of a characteristic “background” was observed in the thermal range (10.780–11.280 mm) for the post-fire areas in the permafrost zone caused by changes in the parameters of the stand, ground cover and litter. The average surface temperature of post-fire areas in larch forests is characterized by increasing up to $\Delta T = 7.2 \pm 1.3$ °C relative to the background values in summer, which is 20–40 % higher than the temperature of background undisturbed areas. Anomalies of the temperature background remain more than 10 years in the conditions of natural restoration of the ground cover. It is estimated that the rate of temperature anomalies recovery is 2.5 times lower than the dynamics of the vegetative index NDVI. It was evaluated numerically that temperature anomalies on the surface could lead to an increase in thawing depth of the soil layer by up to 20 % more than the average statistical rate.

Key words: remote data, temperature, post-fire areas, permafrost zone, larch forests, seasonally thawed layer.