

Послепожарные эффекты в лиственничниках Сибири на многоспектральных спутниковых данных

Е. Г. ШВЕЦОВ^{1, 2}, Е. И. ПОНОМАРЕВ^{1, 2}

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН 660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

²Сибирский федеральный университет 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79
E-mail: eugeneshvetsov11@yandex.ru

Статья поступила 01.08.2019

После доработки 23.09.2019

Принята к печати 23.09.2019

АННОТАЦИЯ

В работе рассматривается динамика вегетационных индексов и температуры подстилающей поверхности на разновозрастных послепожарных участках в лиственничниках мерзлотной зоны Сибири, обобщенные по материалам многолетней спутниковой съемки радиометра Terra/MODIS. Предварительно выполнялась классификация спутниковых изображений Landsat/ ETM, OLI с целью анализа степени пирогенной нарушенности выборки послепожарных участков. Зафиксировано превышение средней температуры подстилающей поверхности постпирогенных участков на 3,9–4,6 °С в зависимости от степени нарушенности подстилки, что составляет 15–30 % относительно среднестатистических фоновых значений. Величина отклонений (снижения) вегетационного индекса NDVI от фона в следующий после пожара год составила 22 %, для индекса NBR – 72 %. Восстановление индекса NDVI до фоновых значений наблюдалось в течение 7–10-летнего периода после пожара. Сроки восстановления аномалий температуры подстилающей поверхности и индекса NBR существенно выше – 15 лет и более. При этом в течение 15–20 лет после пожара фиксируемые аномалии температуры подстилающей поверхности остаются значимыми.

Ключевые слова: дистанционные данные, вегетационный индекс, температура поверхности, Сибирь, данные Terra/MODIS.

Горимость лесов бореальной зоны, включая лиственничники Сибири, имеет устойчивый тренд роста, что отмечается во многих работах последних лет [Flannigan et al., 2009; Швиденко, Щепаченко, 2013; Барталев и др., 2015; Харук, Пономарев, 2017]. Пожары растительности являются наиболее значимым фактором нарушенности лесов мерзлотной зоны Сибири в современных условиях. Мониторинг

с привлечением спутниковых средств позволяет оценить фактические масштабы пожарных процессов на территории Сибири, что является необходимой основой для дальнейшего изучения состояния лесных экосистем бореальной зоны и прогнозирования их стабильности в условиях меняющегося климата.

Уже в течение времени действия пожара фиксируются изменения поверхностного

энергетического баланса и увеличение исходящего теплового потока через слой почвы [Jiang et al., 2012]. Но наиболее значимы – долговременные эффекты, вызванные последующими изменениями отражательной способности поверхности, долговременными аномалиями теплового баланса [Jin et al., 2012], повышением среднегодовой температуры верхних горизонтов почвы, а также увеличением глубины протаивания сезонно-талого слоя почвы, что отмечается для сходных условий Сибири [Скрябин, Варламов, 2013; Пономарев, Пономарева, 2018] и Аляски [Brown et al., 2015]. Показано, что температура почвы существенно варьирует вследствие нарушения термоизолирующих свойств подстилки и напочвенного покрова [Анисимов, Белолуцкая, 2004], что может приводить к деградации приповерхностных слоев многолетней мерзлоты [Десяткин и др., 2012; Анисимов, Шерстюков, 2016]. При этом многообразии условий и параметров пожаров, а также масштабы и тренды пирогенной нарушенности лиственничников в Сибири актуализируют задачу прогнозирования изменений отражательной способности подстилающей поверхности и теплового баланса на послепожарных участках на больших территориях, что можно выполнять инструментально с использованием спутниковых данных. Дополнительно степень пирогенной нарушенности, определяемая видом и интенсивностью пожара, может быть классифицирована по данным многоспектральной съемки [French et al., 2008]. В этих целях применимы индексы, использующие коротковолновую инфракрасную (ИК) область спектра, например, NBR [French et al., 2008], эффективность которых показана в ряде работ [Барталев и др., 2010; Chu et al., 2016].

Основная цель данной работы – количественная оценка динамики восстановительных процессов на послепожарных участках лиственничников, выполняемая на основе дистанционных измерений величины аномалий вегетационных индексов и температуры подстилающей поверхности. Рассмотрелись следующие аспекты: 1) многолетняя вариативность временных рядов вегетационных индексов (NDVI, NBR) и температуры поверхности; 2) зависимость исследуемых величин от степени пирогенной нарушенности,

классифицируемой по материалам спутниковых съемок среднего пространственного разрешения.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Район исследований. Исследования выполнены для трех лесорастительных районов – Среднесибирского плоскогорного таежного района, Восточно-Сибирского таежного мерзлотного района и Восточно-Сибирского района притундровых лесов и редкостойной тайги [Приказ..., 2014], в границах 60–70° с. ш., 90–140° в. д. (рис. 1). Общая площадь 2,4 млн км². Согласно векторным картам Национального центра данных по снегу и льду (National Snow and Ice Data Center) [Brown et al., 2002] территория находится в зоне многолетней мерзлоты, включая более 80 % сплошного распространения многолетней мерзлоты.

В составе древостоев преобладающей породой является лиственница (*Larix sibirica*, *Larix gmelinii*), покрытие которой достигает 80–90 % лесной площади [Растительность СССР..., 1990]. Из остальных пород около 5 % приходится на сосновые леса и по 3 % – на лиственные и темнохвойные породы [Там же]. Почвенный покров на территории исследования формируется в условиях резко-континентального, относительно сухого и холодного климата и распространения многолетней мерзлоты. Господствуют таежные мерзлотные и глее-мерзлотные почвы, а также палевые мерзлотные почвы [Урусевская и др., 2011].

Исходные данные и методы. В работе использованы многолетние архивы съемки радиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). В качестве источника данных об отражательной способности поверхности и для последующего расчета вегетационных индексов использовался продукт MOD09A1 коллекции 6 [Vermote, 2015] с пространственным разрешением 500 м, диапазоном длин волн 0,46–2,15 мкм (каналы 1–7), с применением атмосферной коррекции. Кроме измерений, сделанных в спектральных каналах, продукт содержит показатели качества полученных данных.

Температура поверхности оценивалась с помощью продукта MOD11A2 коллекции 6 [Wan et al., 2015]. Продукт содержит усред-

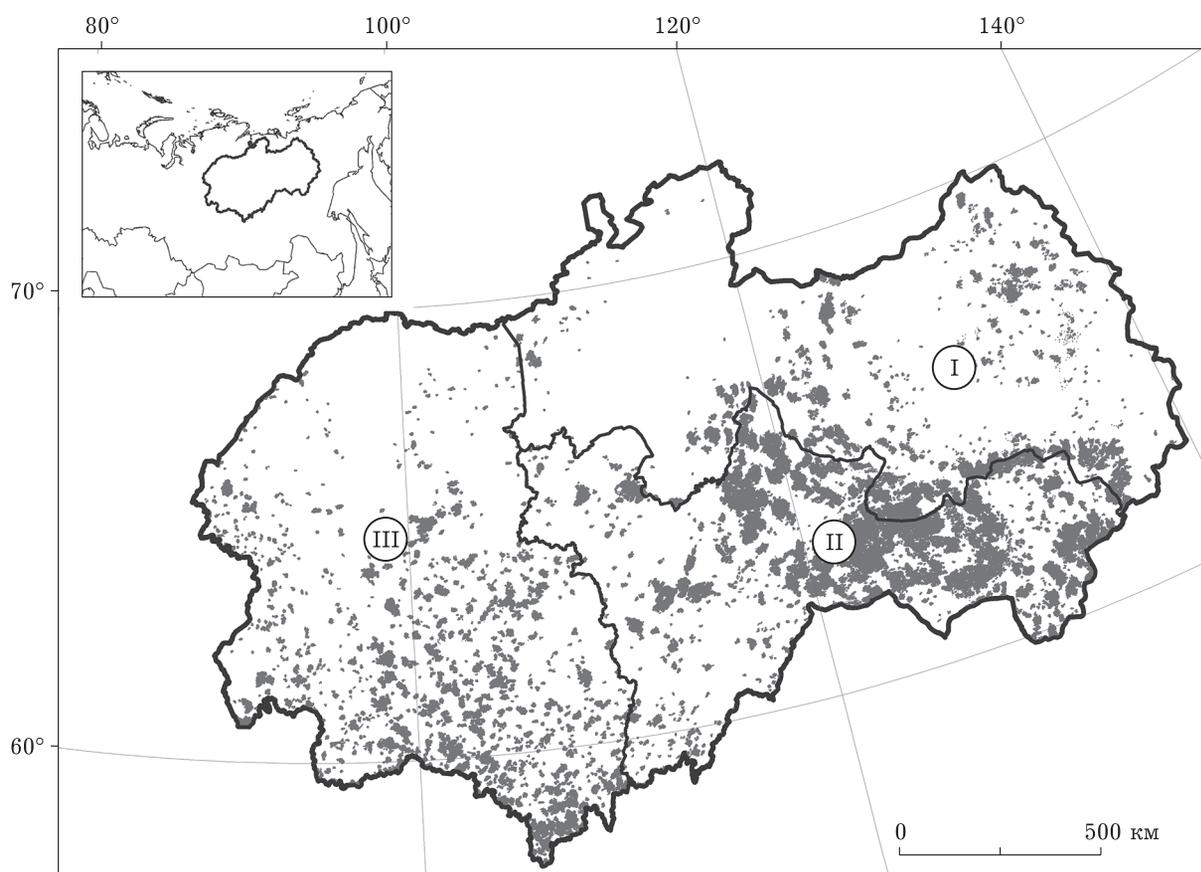


Рис. 1. Район исследований. Серым цветом показаны пожары площадью более 1500 га, по материалам [Пономарев, Швецов, 2015] спутникового мониторинга 2000–2018 гг. Лесорастительные районы [Приказ ..., 2014]: I – Восточно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги, II – Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район, III – Среднесибирский плоскогорный таежный район

ненные за 8 дней измерения температуры подстилающей поверхности, а также информацию о качестве полученных данных. Исходное пространственное разрешение продукта – 1000 м, однако для использования этих данных совместно с продуктом MOD09A1 исходные материалы были приведены к пространственному разрешению 500 м.

Для выделения лесных участков, пройденных огнем, использовался продукт MCD64A1 коллекции 6 [Giglio et al., 2016]. Продукт формируется по данным со спутников Terra и Aqua, имеет пространственное разрешение 500 м, содержит попиксельную маску участков, пройденных огнем. Даты пожаров, координатная привязка и размер пожарных полигонов контролировались по базе данных пожаров Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН [Пономарев, Швецов, 2015].

Все продукты MODIS, использованные в работе, распространяются в синусоидальной проекции.

В качестве дополнительных данных использован векторный слой растительности на территории Сибири, полученный на основе карты растительности СССР [Растительность СССР..., 1990]. Для данного слоя была проведена процедура перепроецирования и растеризации с тем, чтобы перевести его в формат, пригодный для совместной обработки с тематическими продуктами MODIS. В результате каждому пикселю в продуктах MODIS был поставлен в соответствие полигон векторной карты растительности (м-б 1 : 1 000 000) с указанием преобладающего древостоя.

В качестве индикатора состояния растительности в данной работе использовался нормализованный разностный вегетационный индекс (NDVI), а также нормализованный индекс

гарей (Normalized Burn Ratio, NBR). Значение индекса NDVI рассчитывалось по измерениям отражательной способности поверхности в диапазонах 0,62–0,67 и 0,841–0,876 мкм (1 и 2 каналы MODIS соответственно):

$$NDVI = \frac{R2 - R1}{R2 + R1};$$

индекс NBR рассчитывался как нормализованная разность каналов 2 и 7 (2,105–2,155 мкм):

$$NBR = \frac{R2 - R7}{R2 + R7},$$

где R1, R2, R7 – значения отражательной способности в 1-м, 2-м и 7-м каналах MODIS соответственно.

Нормализованный индекс гарей и разностный нормализованный индекс гарей (dNBR) [Key, Benson, 2006] достаточно часто используются при оценке степени пирогенной нарушенности в различных лесных экосистемах по спутниковым данным [Escuin et al., 2008; French et al., 2008]. Разностный индекс dNBR, рассчитываемый как $(NBR_{\text{prefire}} - NBR_{\text{postfire}})$, где NBR_{prefire} – значение NBR до пожара, а NBR_{postfire} – после пожара соответственно, использовался в работе для классификации степени пирогенной нарушенности территории. В качестве порогового использовалось значение индекса dNBR, равное 75-му перцентиллю. Пиксели, для которых значение dNBR было меньше этой величины, классифицированы как слабо или умеренно нарушенные. Участки, для которых величина dNBR была выше этого порогового значения, характеризовались сильной степенью нарушенности. Для расчета индекса dNBR в качестве допожарного значения индекса NBR использовалось значение, полученное для сезона, предшествовавшего пожару, а в качестве послепожарного значения индекса – полученное в летний сезон, следующий за пожарным.

В работе использовалась выборка послепожарных участков, на которых были зафиксированы пожары растительности в 2001, 2002 и 2006 гг. В эти сезоны зарегистрировано большое количество (от 60 до 140) крупных пожаров (более 1500 га) в каждом из рассмотренных лесорастительных районов. Для каждого сезона с 2000 по 2018 г. формировались временные ряды вегетационных индексов и температуры поверхности за период с середины июня по конец августа (161–233 дни

года). Используя флаги контроля качества стандартных продуктов MODIS, из рассмотрения исключались некорректные измерения, связанные с влиянием облачности или дыма. Для полученных таким образом временных рядов рассчитывалось среднее значение за сезон. Таким образом, для каждого пикселя в пределах рассматриваемой области имелось 19 итоговых значений индексов NDVI, NBR, а также температуры подстилающей поверхности. За каждый из трех пожароопасных сезонов 2001, 2002 и 2006 гг. сформированы маски гарей, объединявшие все пройденные огнем участки. С помощью этих масок гарей определялись участки, для которых выполнялся анализ пост-пирогенной динамики.

Полученные данные рассматривались в сравнении с характеристиками для ненарушенных (фоновых) участков в сходных физико-географических, лесорастительных и метеорологических условиях. Для расчета “фоновых” значений полученные композитные изображения области исследования разбивались на фрагменты размером 100×100 пикселей ($\sim 50 \times 50$ км). Для каждого из полученных фрагментов формировалась выборка из пикселей, которые, согласно продукту MCD64A1, не были отнесены к пирогенно нарушенным. Для таких выборок рассчитывались средние значения и стандартные отклонения для обоих вегетационных индексов и температуры.

Выполнялся попиксельный анализ отклонений от фоновых значений. Величина отклонения индекса от фона определялась с помощью Z-оценок из соотношения

$$z = \frac{\sqrt{(V - V_b)^2}}{\sigma_b},$$

где V и V_b – представляют послепожарное и фоновое значения рассматриваемой величины (вегетационного индекса или температуры), а σ_b – стандартное отклонение фонового значения.

Таким образом, величина Z характеризует количество стандартных отклонений, на которое значение величины на нарушенном пожарном участке отличается от фонового.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Согласно результатам спутникового мониторинга общая площадь, пройденная ог-

нем в районе исследований за период с 2000 по 2018 г., превысила 26 млн га. Суммарный накопительный эффект нарушения лиственничников района исследований составляет более 10 % общей площади лесов региона. Межгодовые площади пожаров имеют значительные вариации – от 4 тыс. до 3 млн га и более, в среднем – 2,5 млн га в год. Наибольшие пройденные огнем площади регистрировались на территории Восточно-Сибирского таежного мерзлотного района (Республика Якутия) – более 12 млн га или 45 % общей площади пожаров в регионе. Для рассматриваемой территории характерен возрастающий тренд площадей пожаров (рис. 2).

На послепожарных участках максимумы отклонения вегетационных индексов и температур подстилающей поверхности от фоновых значений наблюдались на следующий год после воздействия огня. Наиболее значительные амплитуды отклонения от фона фиксировались в случае использования в качестве дешифровочного спектрального признака нормализованного индекса гарей, NBR (табл. 1).

Динамика восстановительных трендов имела выраженные различия между участками с сильной и умеренной степенью нарушения (согласно индексу dNBR). Величина первоначальной аномалии, зафиксированной в первый после пожара год наблюдений, отличалась почти в 2 раза для этих классов нарушения. Так, для индекса NBR средняя величина относительного отклонения Z составляла 7 (в случае участков с сильной степенью нарушения растительности и напочвенного покрова) и 4 (в случае умеренно нарушенных участков) соответственно (рис. 3). Для индекса NDVI и температуры различия в величине отклонения на первый год после пожара были менее выраженными – участки с высокой степенью нарушения характеризовались в 1,5–2 раза более высокими зна-

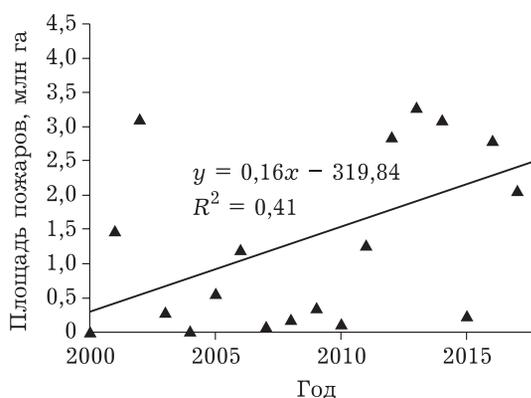


Рис. 2. Динамика площади пожаров на территории исследования за 2000–2018 гг. по данным спутниковых наблюдений. Учитывались только пожары площадью более 1500 га

чениями аномалий по сравнению с участками с умеренной степенью нарушения.

В случае умеренно нарушенных участков значения рассмотренных показателей через 10–15 лет восстановления были ближе к фоновым значениям (отклонения не более 1 σ_b) по сравнению с сильно нарушенными участками. Минимальный временной лаг, за который достигались отклонения 1 σ_b относительно фонового значения, наблюдался для вариации индекса NDVI (~5 лет после пожара). В то же время аномалии температуры подстилающей поверхности регистрировались в течение, по крайней мере, 15–20 лет после пирогенного воздействия (см. рис. 3).

Анализ снимков среднего пространственного разрешения (Landsat 7) показал, что области с наибольшей пирогенной нарушением (оцененной с помощью индекса NBR) характеризуются и наибольшими аномалиями температуры подстилающей поверхности. Например, на рис. 4 показано пространственное распределение индекса NBR и температуры поверхности по данным спутника Landsat 7 для пожара 2002 г. Снимок сделан спустя 1–2

Т а б л и ц а 1
Значения аномального отклонения от фона в первый год и через 10 лет после пожара

Показатель	1-й год после пожара				10 лет после пожара				Временной лаг восстановления, лет
	Среднее значение	σ	σ_b	Z (min-max)	Среднее значение	σ	σ_b	Z (min-max)	
NBR	0,32	0,08	0,03	3–8	0,11	0,08	0,03	1,7–2,8	>20
NDVI	0,13	0,06	0,04	2–3	0,03	0,07	0,04	0,9–1,1	7–10
Температура, °C	3,9	1,2	1,1	2–4	1,4	1,9	1,2	1,1–1,6	>20

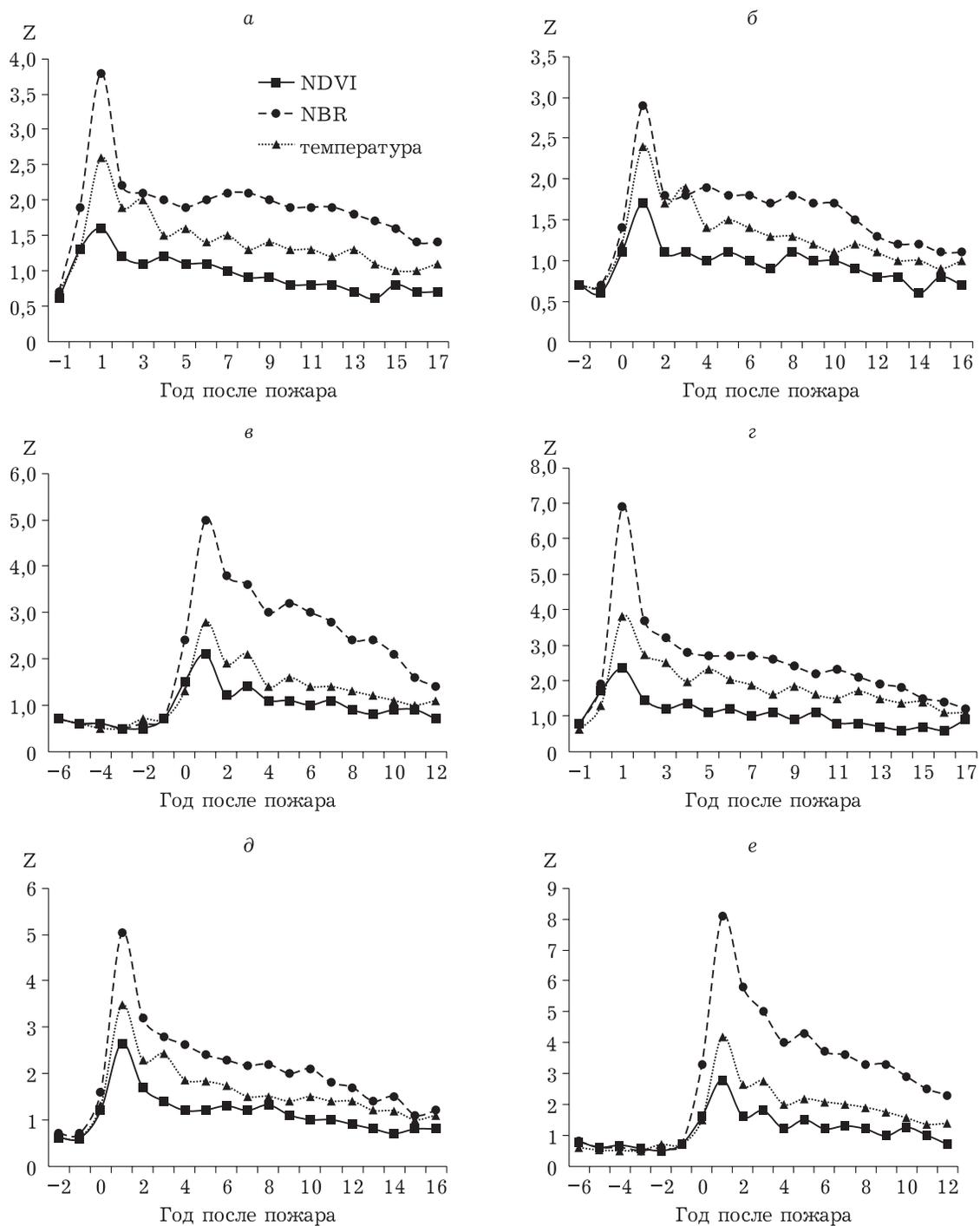


Рис. 3. Усредненные временные ряды относительных отклонений вегетационных индексов и температур от фоновых значений для трех лесорастительных районов: а, г – Восточно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги; б, д – Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район; в, е – Среднесибирский плоскогорный таежный район. Временные ряды а-в соответствуют участкам с умеренной степенью пирогенной нарушенности, ряды г-е – участкам с сильной степенью пирогенной нарушенности

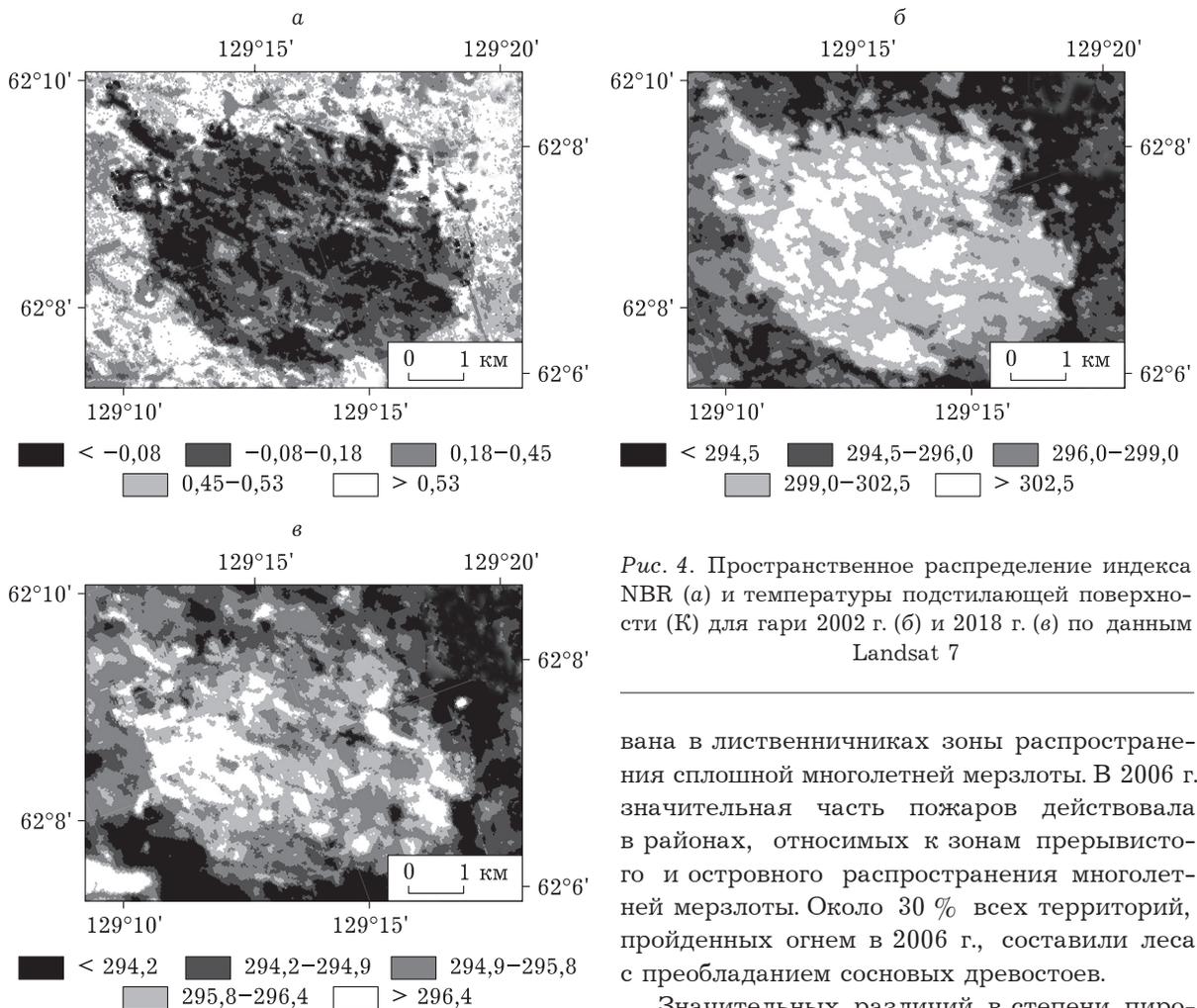


Рис. 4. Пространственное распределение индекса NBR (а) и температуры подстилающей поверхности (К) для гари 2002 г. (б) и 2018 г. (в) по данным Landsat 7

недели (для разных частей гари) после прекращения активного горения. Видно, что, например, аномальные значения NBR (ниже 10 перцентиля) хорошо соотносятся с аномальными значениями температуры поверхности (выше 90 перцентиля). При этом даже спустя 16 лет после пожара (август 2018 г.) на участках сильной пирогенной нарушенности (низкие значения NBR) наблюдаются температурные аномалии по сравнению с фоном и частично восстановившимися участками гари (см. рис. 4, в).

ОБСУЖДЕНИЕ

Пирогенная нарушенность территории исследования. Как уже показано на основе спутниковых данных [Барталев и др., 2015; Харук, Пономарев, 2017], большая часть пожаров в сезоны 2001 и 2002 гг. зарегистриро-

вана в лиственничниках зоны распространения сплошной многолетней мерзлоты. В 2006 г. значительная часть пожаров действовала в районах, относимых к зонам прерывистого и островного распространения многолетней мерзлоты. Около 30 % всех территорий, пройденных огнем в 2006 г., составили леса с преобладанием сосновых древостоев.

Значительных различий в степени пирогенной нарушенности для трех лесорастительных районов на территории исследования не наблюдалось. На рис. 5 представлены гистограммы распределения числа “пожарных” пикселей (пиксели изображения, детектируемые как зона активного горения) в зависимости от степени пирогенной нарушенности, выраженной индексом dNBR. Так, для Восточно-Сибирского таежного мерзлотного района и Среднесибирского плоскогорного таежного района значения индекса dNBR имели близкие значения (табл. 2). Более низкое среднее значение для выборки в Восточно-Сибирском районе притундровых лесов и редкостойной тайги обусловлено высокой долей “пожарных” пикселей с низкими значениями dNBR (0,1 и менее). Такие пиксели составляют около 25 % от общего числа. Причиной этого, вероятно, является тот факт, что на территориях, занятых редколесьями, индекс dNBR демонстрирует небольшие измене-

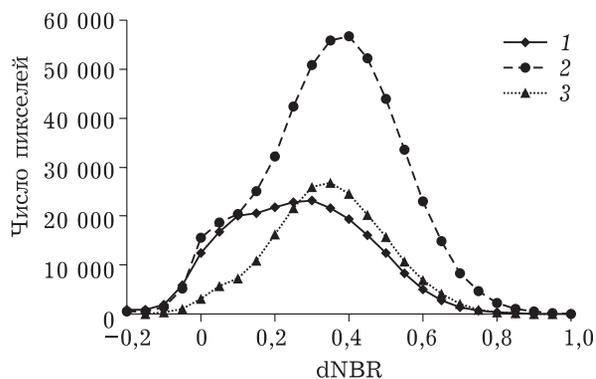


Рис. 5. Гистограммы индекса dNBR для пикселей изображения, соответствующих послепожарным участкам, за период 2000–2018 гг. 1 – Восточно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги; 2 – Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район; 3 – Среднесибирский плоскогорный таежный район

ния даже в случае сильного пирогенного воздействия [Miller, Thode, 2007].

Для выборки послепожарных участков вне зависимости от лесорастительного района основная доля вариации dNBR ($R^2 \sim 0,69–0,75$) объяснялась вариациями послепожарных значений NBR. В то же время допожарное значение NBR объясняло долю вариации индекса dNBR на уровне $R^2 \sim 0,05–0,09$. Результат согласуется с описанными ранее, в частности, для послепожарных территорий в североамериканских бореальных лесах [Jin et al., 2012]. Фиксируемые значения dNBR оказываются в наибольшей степени чувствительны к послепожарному состоянию лесного полога и подстилки.

Постпирогенная динамика вегетационных индексов и температуры подстилающей поверхности. Тот факт, что вегетационные индексы, основанные на измерениях в ближнем и среднем ИК-диапазонах, характеризуются

более значительными пирогенными изменениями по сравнению с NDVI, описан и другими авторами [Gerard et al., 2003; Cuevas-Gonzalez et al., 2009].

Применение дисперсионного анализа показало, что в течение 12–18 лет после пожара (по материалам съемки Terra/MODIS, выполненной в 2018 г.) остаются статистически значимые различия между средними значениями NBR, NDVI и температуры подстилающей поверхности для выборок фоновых и “пожарных” пикселей при уровне достоверности 95 % ($p < 0,001$). Отдельно следует отметить, что до воздействия пожара значимых различий данных показателей для исследуемых участков зафиксировано не было.

Вегетационные индексы, использующие коротковолновый ИК-диапазон длин волн (NBR), чувствительны к структуре и состоянию полога древостоя и его влагосодержанию. Они демонстрируют большую амплитуду послепожарных изменений и требуют большего периода восстановления для достижения допожарных значений по сравнению с NDVI [Gerard et al., 2003]. Так, в случае пожаров 2001 г. индекс NBR приблизился к отклонению в $(1,4–1,5) \sigma_b$ от фонового значения только через 12–15 лет (рис. 6). На данных съемки 2018 г. отмечены минимальные отклонения для пожаров 2002 г., которые составили $1,1 \sigma_b$, т. е. среднее значение NBR для пройденных огнем пикселей примерно на 8 % ниже фонового значения. Для сравнения, индекс NDVI приблизился к фоновым значениям (отклонения составили не более $1\sigma_b$) к 2008, 2012 и 2014 гг. для пожаров 2001, 2002 и 2006 гг. соответственно. Это лишь на 2 % ниже фоновых значений и находится в пределах относительной ошибки измерения. Таким образом, индексу NDVI требуется порядка 7–10 лет,

Т а б л и ц а 2
Средние значения индекса dNBR на послепожарных участках по лесным районам (стандартное отклонение для уровня значимости $p < 0,05$)

Лесной район	Количество рассмотренных послепожарных участков	Количество рассмотренных “пожарных” пикселей	dNBR	σ
Восточно-Сибирский таежно-мерзлотный	63	178236	0,33	0,18
Среднесибирский плоскогорно-таежный	147	78976	0,32	0,16
Восточно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги	102	67644	0,24	0,18

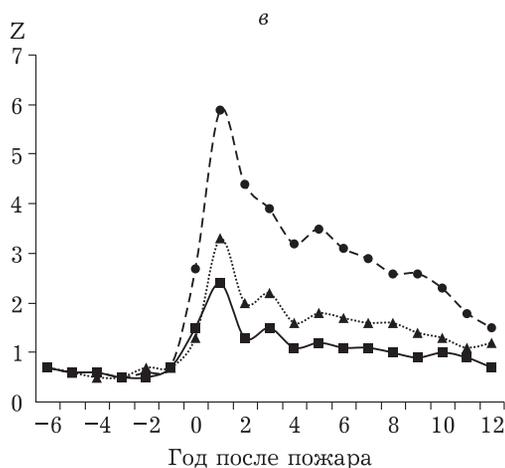
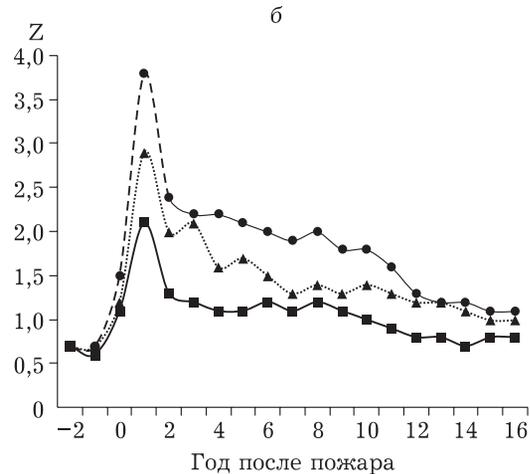
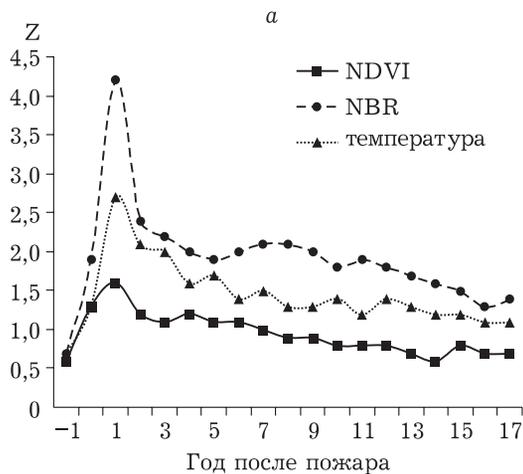


Рис. 6. Усредненные временные ряды относительных отклонений вегетационных индексов и температур от фоновых значений для трех лесорастительных районов: а – Восточно-Сибирский район притундровых лесов и редкостойной тайги; б – Восточно-Сибирский таежный мерзлотный район; в – Среднесибирский плоскогорный таежный район

чтобы восстановиться до фоновых значений (отклонение не более $1\sigma_b$).

Оценки времени, необходимого для достижения вегетационными индексами фоновых значений после пирогенного воздействия, существенно различаются в зависимости от региона. Так, для бореальных лесов Северной Америки сообщается о 9-летнем периоде восстановления [Hicke et al., 2003]. В то же время для территории Средней Сибири понадобится более длительный период восстановления – более 13 лет [Cuevas-Gonzalez et al., 2009]. Эти оценки, вероятно, будут ближе к результатам, полученным нами.

Что касается температуры подстилающей поверхности, то время, необходимое для возврата к фоновым значениям, составляет более 15–20 лет, т. е. примерно в 2 раза превышает период восстановления для индекса NDVI (см. табл. 1), что подтверждает аналогичные исследования для рассматриваемого региона [Пономарев, Пономарева, 2018]. Так,

в случае пожаров 2002 г. отклонение температуры от фона достигло значения в $1\sigma_b$ только к 2017 г. Для пожаров 2001 и 2006 гг. значение отклонения от фона в $1\sigma_b$ к 2018 г. достигнуто не было. В абсолютных значениях величина температурных аномалий через 15 лет восстановительной сукцессии превышала средние значения на $1,2 \pm 0,4$ °C, что составляло 7–10 %.

Вариации исследуемых индексов в зависимости от степени пирогенной нарушенности. На участках, где классифицировалась высокая степень нарушенности, рассмотренным показателям требовалось значительно большее время для достижения фоновых значений. Так, в случае нормализованного индекса гарей (NBR) даже спустя 10–12 лет после пожара отклонения составляли более $2\sigma_b$. По материалам съемки 2018 г. индекс NDVI для гарей отличался от фоновых участков на величину порядка $1\sigma_b$, т. е. время восстановления здесь составило порядка 12 лет. В то же время средние значения температуры по-прежнему отличались от фона на величину $(1,1–1,4)\sigma_b$ (или около $1,3–1,6$ °C). Таким образом, на участках, пройденных пожаром высокой интенсивности, температурные аномалии сохраняются на протяжении более 15 лет (см.

рис. 3), что существенно отличает район исследования. Например, в условиях средиземноморья пост-пирогенные температурные аномалии слабо проявляются уже через 2–3 года после пожара [Lopez-Garcia, Caselles, 1991; Veraverbeke et al., 2012]. Кроме этого величина послепожарного изменения температуры (следующий год после пожара) для участков с сильной пирогенной нарушенностью составляла $4,6 \pm 1,1$ °C (превышение над фоновыми значениями около 30 %). Для сравнения, средняя величина температурной аномалии для всех участков составила $3,9 \pm 1,2$ °C.

Изменения параметров лесной подстилки, происходящие в результате пирогенного воздействия, вызывают увеличение ее теплопроводности, а снижение альбедо пройденных огнем участков в сочетании с усилившейся из-за воздействия огня инсоляцией отражается на температурном режиме верхнего слоя почвы [Тарасов и др., 2008]. Так, по нашим оценкам, в последующие несколько недель после пирогенного воздействия наблюдалось увеличение средней температуры поверхности на величину $6,4$ °C. Данный результат близок к соответствующим оценкам в $5–8$ °C, приведенных в других работах [Lopez-Garcia, Caselles, 1991; Amiro et al., 1999; Veraverbeke et al., 2012; Пономарев, Пономарева, 2018]. При этом максимальные температуры на отдельных послепожарных участках могли достигать 41 °C, что примерно на 20 °C превышали средние фоновые значения.

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 температурного поля поверхности. Согласно результатам натурных экспериментов, полное восстановление запасов подстилки приближается к фоновым значениям только к 24-летнему сроку 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. Несомненно, это определяет и динамику процессов лесовосстановления, что необходимо учитывать при вы-

полнении оценок состояния, гибели или мониторинга восстановительных процессов в лесах мерзлотной зоны, выполняемых спутниковыми методами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ временных рядов показал, что наиболее чувствительным к пирогенному воздействию является нормализованный индекс гарей (NBR), что, вероятно, связано с его чувствительностью к влагосодержанию растительных покровов. Этот индекс характеризуется наибольшей величиной послепожарного изменения и наибольшим временным лагом, необходимым для восстановления до фоновых значений (в пределах одного стандартного отклонения). Так, для пожаров на рассмотренной территории этот период, вероятно, составляет около 20 лет и увеличивается в зависимости от степени первоначальной послепожарной нарушенности участка. В то же время для индекса NDVI, чувствительного к фотосинтетической активности растительности, период восстановления составляет порядка 7–10 лет, а в случае пожаров, характеризующихся умеренной степенью воздействия на напочвенный покров и растительность, – около 5 лет.

Аномалии температуры подстилающей поверхности, вызванные пирогенными воздействиями, также наблюдаются на протяжении более 15 лет после пожара. Величина температурной аномалии по отношению к фоновым значениям в первый год после пожара составляет около $3,9 \pm 1,2$ °C, а для участков с классифицируемым сильным уровнем нарушенности – более $4,6 \pm 1,1$ °C. Превышение температуры на послепожарных участках в сравнении с фоновыми значениями 15–25 %, спорадически достигая максимумов на уровне 30 %.

Работа выполнена в рамках государственного задания № 0356-2019-0009 при финансовой поддержке РФФИ, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности, проект № 18-41-242003 “Моделирование и спутниковый мониторинг эффектов от тепловых аномалий подстилающей поверхности в сезонно-талом слое почв криолитозоны Сибири”, а также проект № 18-05-00432 “Воздействие изменений климата на леса Сибири: анализ горимости лесных территорий, величины прироста хвойных пород, жизненного состояния и продуктивности древостоев”.

ЛИТЕРАТУРА

- Анисимов О. А., Белолуцкая М. А. Моделирование воздействия антропогенного потепления на вечную мерзлоту: учет влияния растительности // *Метеорология и гидрология*. 2004. № 11. С. 73–82.
- Анисимов О. А., Шерстюков А. Б. Оценка роли природно-климатических факторов в изменениях криолитозоны России // *Криосфера Земли*. 2016. Т. XX, № 2. С. 90–99.
- Барталев С. А., Егоров В. А., Крылов А. М., Стыценко Ф. В., Ховратович Т. С. Исследование возможностей оценки состояния поврежденных пожарами лесов по данным многоспектральных спутниковых измерений // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2010. Т. 7, № 3. С. 215–225.
- Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Лупян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // *Лесоведение*. 2015. № 2. С. 83–94.
- Безкоровайная 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.
- 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.
- Пономарев Е. И., Пономарева Т. В. Влияние послепожарных температурных аномалий на сезонное протаивание почв мерзлотной зоны Средней Сибири по дистанционным данным // *Сиб. экол. журн.* 2018. № 4. С. 477–486. <https://doi.org/10.15372/SEJ20180408> [Ponomarev E. I., Ponomareva T. V. The Effect of Postfire Temperature Anomalies on Seasonal Soil Thawing in the Permafrost Zone of Central Siberia Evaluated Using Remote Data // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11, N 4. P. 420–427].
- Пономарев Е. И., Швецов Е. Г. Спутниковое детектирование лесных пожаров и геоинформационные методы калибровки результатов // *Исследование Земли из космоса*. 2015. № 1. С. 84–91.
- Приказ Минприроды России “Об утверждении Перечня лесорастительных зон Российской Федерации и Перечня лесных районов Российской Федерации” № 367 от 18.08.2014 (ред. от 19.02.2019). М., 2014.
- Растительность СССР: карта для высших учебных заведений. М-6 1 : 4 000 000. Минск: ГУТК СССР, 1990.
- Скрябин П. Н., Варламов С. П. Термический режим грунтов нарушенных ландшафтов Центральной Якутии // *Криосфера Земли*. 2013. Т. XVII, № 3. С. 44–49.
- Тарасов П. А., Иванов В. А., Иванова Г. А. Особенности температурного режима почв в сосняках средней тайги, пройденных низовыми пожарами // *Хвойные бореальной зоны*. 2008. Т. XXV, № 3-4. С. 300–304.
- Харук В. И., Пономарев Е. И. Пространственно-временная горимость лиственничников Центральной Сибири // *Экология*. 2017. № 6. С. 413–419. https://doi.org/10.7868/S_0367059717060026
- Урусевская И. С., Маргынченко И. А., Алябина И. О. Почвенная карта // *Национальный атлас почв Российской Федерации* / под ред. И. О. Алябина, Г. В. Добровольского, И. С. Урусевской и др. М.: Астрель, 2011. С. 72–77 (Почвенная карта, м-6 1 : 15 млн. Поясн. зап.).
- Швиденко А. З., Шепашенко Д. Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // *Лесоведение*. 2013. № 5. С. 50–61.
- Amiro B. D., MacPherson J. I., Desjardins R. L. BOREAS flight measurements of forest-fire effects on carbon dioxide and energy fluxes // *Agricultural and Forest Meteorology*. 1999. Vol. 96. P. 199–208. [https://doi.org/10.1016/S_0168-1923\(99\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S_0168-1923(99)00050-7)
- Brown J., Ferrians O. J., Heginbottom J. A., Melnikov E. S. Circum-arctic map of permafrost and ground ice conditions, Version 2. Colorado USA: Boulder, 2002. National Snow and Ice Data Center. Digital media. <https://nsidc.org/data/ggd318>
- Brown D. R. N., Jorgenson M. T., Douglas T. A., Romanovsky V. E., Kielland K., Hiemstra C., Euskirchen E. S., Ruess R. W. Interactive effects of wildfire and climate on permafrost degradation in Alaskan lowland forests // *JGR: Biogeosciences*. 2015. Vol. 120. P. 1619–1637. <https://doi.org/10.1002/2015JG003033>
- Chu T., Guo X., Takeda K. Temporal dependence of burn severity assessment in Siberian larch (*larix sibirica*) forest of northern Mongolia using remotely sensed data // *Int. J. Wildland Fire*. 2016. Vol. 25. P. 685–698. <https://doi.org/10.1071/WF15182>
- Cuevas-Gonzalez M., Gerard F., Balzter H., Rianos D. Analysing forest recovery after wildfire disturbance in boreal Siberia using remotely sensed vegetation indices // *Global Change Biology*. 2009. Vol. 15. P. 561–577. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01784.x>
- Escuin S., Navarro R., Fernández P. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (normalized difference vegetation index) derived from LANDSAT/ETM images // *Int. J. Remote Sens.* 2008. Vol. 29. P. 1053–1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- Flannigan M., Stocks B., Turetsky M., Wotton M. Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest // *Global Change Biology*. 2009. Vol. 15, N 3. P. 549–560. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01660.x>
- French N. H. F., Kasischke E. S., Halle R. J., Murphy K. A., Verbyla D. L., Hoy E. E., Allen J. L. Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: an overview and summary of results // *Int. J. Wildland Fire*. 2008. Vol. 17. P. 443–462. <https://doi.org/10.1071/WF08007>
- Gerard F., Plummer S., Wadsworth R., Ferreruela A., Iliffe L., Balzter H., Wyatt B. Forest fire scar detection in the Boreal forest with multitemporal SPOT-VEGETATION data // *IEEE Transactions on Geosc. and Remote Sensing*. 2003. Vol. 41. P. 2575–2585. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.819190>
- Giglio L., Justice C., Boschetti L., Roy D. Collection 6 MODIS Burned Area Product User’s Guide. 2016. https://doi.org/10.5067/MODIS/MCD_64A1.006
- Hicke J. A., Asner G. P., Kasischke E. S., French N. H. F., Randerson J. T., Collatz J., Stocks B. J., Tucker C. J., Los S. O., Field C. B. Postfire response of North American boreal forest net primary productivity analyzed with satellite observations // *Global Change Biol.* 2003. Vol. 9. P. 1145–1157. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00658.x>

- Jiang Y., Zhuang Q., O'Donnell J. A. Modeling thermal dynamics of active layer soils and near-surface permafrost using a fully coupled water and heat transport model // *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117. <https://doi.org/10.1029/2012JD017512>
- Jin Y., Randerson J. T., Goulden M. L., Goetz S. J. Post-fire changes in net shortwave radiation along a latitudinal gradient in boreal North America // *Geophys. Res. Lett.* 2012. Vol. 39. <https://doi.org/10.1029/2011JG001886>.
- Key C. H., Benson N. C. Landscape assessment: Sampling and analysis methods // In *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System* / Ed. D. C. Lutes et al., 2006, Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD. P. LA1-LA51, Rocky Mt. Res. Station: Fort Collins, CO, USA, U. S. Forest Service, U. S. Dept. of Agriculture.
- Lopez-Garcia M. J., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data // *Geocarto International*. 1991. Vol. 6. P. 31–37. <https://doi.org/10.1080/10106049109354290>
- Miller J. D., Thode A. E. Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR) // *Remote Sensing of Environment*. 2007. Vol. 109. P. 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>
- Veraverbeke S., Verstraeten W. W., Lhermitte S., van de Kerchove R., Goossens R. Assessment of post-fire changes in land surface temperature and surface albedo, and their relation with fire-burn severity using multitemporal MODIS imagery // *International Journal of Wildland Fire*. 2012. Vol. 21. P. 243–256. <https://doi.org/10.1071/WF10075>
- Vermote E. F. MOD 09A1 MODIS Surface Reflectance 8-Day L3 Global 500m SIN Grid V006. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2015. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD_09A1.006
- Wan Z., Hook S., Hulley G. MOD11A2 MODIS/Terra Land Surface Temperature/Emissivity 8-Day L3 Global 1km SIN Grid V006 [Data set], 2015. NASA EOSDIS LP DAAC. https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD_11A2.006

Post-fire effects in Siberian larch stands on multispectral satellite data

E. G. SHVETSOV^{1, 2}, E. I. PONOMAREV^{1, 2}

¹*V. N. Sukachev Institute of Forest of SB RAS – Separate Subdivision of the FRC KSC of SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28*

²*Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny av., 79
E-mail: eugeneshvetsov11@yandex.ru*

In this work, we consider the dynamics of vegetation indices and surface temperature of post-fire areas of different ages in the larch forests of the permafrost zone of Siberia, obtained using long-term Terra/MODIS satellite imagery. Preliminary classification of Landsat/ETM, OLI satellite images was performed to analyze the degree of pyrogenic disturbance in the sample of post-fire sites. An increase of the average temperature of the underlying surface of the post-pyrogenic areas by 3.9–4.6 °C was recorded depending on the degree of disturbance of the litter, which is 15–30 % of the average background values. The deviation (decrease) for the NDVI comparing to background values in the next post-fire year was 22 %, for the NBR index – 72 %. Recovery of the NDVI to background values required 7–10 years after the fire. The recovery period for the surface temperature and the NBR index are significantly higher – 15 years or more. Moreover, for 15–20 years after the fire, the observed temperature anomalies of the underlying surface remain significant.

Key words: remote sensing data, vegetation index, surface temperature, Siberia, Terra/MODIS.