

## Ретроспективные данные о лесных пожарах на примере локальных территорий Восточной Сибири

А. В. Мальканова<sup>1,2</sup>, А. Н. Забродин<sup>1,2</sup>, Е. И. Пономарев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия  
E-mail: malkanova@ksc.krasn.ru

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

Предложена методика мониторинга динамики пожарных режимов на основе пролонгированных хронологий по материалам современных и ретроспективных спутниковых данных из открытых источников. В работе использованы данные каналов № 1 (0,45–0,52 мкм), № 2 (0,52–0,6 мкм), № 3 (0,63–0,9 мкм) Landsat-4, -5 MSS C1 и Landsat-8/OLI за период 1986–2015 гг. Рассмотрена динамика пожаров на территории Восточной Сибири (бассейн р. Лены в среднем течении). Показана зависимость горимости лесов локальных территорий Восточной Сибири от уровня тепло- и влагообеспеченности. Установлен возможный диапазон показателей горимости (числа и площади пожаров) для территории исследования в условиях экстремальной засухи, подтверждённый ретроспективными данными. Максимум горимости территории интереса был обусловлен экстремальными погодными условиями в 1986 г., когда показатель тепло- и влагообеспеченности (0,36) оказался в три раза ниже нормы (0,99±0,25), что не повторялось в течение последних 20 лет. Показано, что потенциально среднегодовые значения количества пожаров могут в 2,5 раза превышать современную статистику. Пролонгированные данные о пожарах позволяют констатировать, что в условиях усиления засушливости возможен существенный рост показателя горимости лесов региона.

**Ключевые слова:** Сибирь, дистанционное зондирование, спутниковые данные, лесной пожар, Landsat, гидротермический коэффициент (ГТК)

Одобрена к печати: 11.09.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-65-73

### Введение

На рубеже XX–XXI вв. проблема лесных пожаров остаётся одной из самых актуальных во всём мире, в том числе и в России (Барталев и др., 2015). Регулярный спутниковый мониторинг пожаров в оперативном режиме в Российской Федерации ведётся с 1990-х гг. (Поморцев и др., 2008; Пономарев и др., 2019). Использование инструментальных данных такого рода позволяет оценить масштабы пожарных процессов как в целом в лесах России, так и на локальном уровне (в отдельных субъектах, природных зонах, экосистемах), что имеет большое значение для прогнозирования пожарных режимов и сценариев пожароопасной обстановки в отдельных регионах в условиях климатических изменений (Пономарев, Харук, 2016; Пономарев и др., 2018). В целях повышения достоверности таких прогнозов ряды инструментальных данных о пожарах необходимо расширять, используя ретроспективную съёмку, доступную в открытых источниках. Результаты работы в этом направлении представляют как научный, так и практический интерес.

Пролонгация рядов данных о лесных пожарах, ретроспектива которых возможна с начала 1970-х гг. XX в., — важнейший этап исследований в целях прогнозирования горимости, экологических последствий, постпирогенных сукцессий и послепожарных процессов в лесах (Kirdyanov et al., 2020; Knorre et al., 2019; Ponomarev et al., 2020) в современных и меняющихся климатических условиях.

Эпизодические данные о пожарах в Сибири (представляющие сегодня, скорее, коллекционный интерес) можно найти в материалах съёмки со спутников «Метеор», выполненной в 1980-х гг., которые доступны на отпечатанных бумажных носителях (рис. 1а, см. с. 66). Визуальный анализ снимков на отдельные территории Якутии показал значительное количество пожаров и площадей, пройденных огнём. Так, в качестве тестируемого района был выбран

участок бассейна р. Лены в среднем течении, который по современным данным о пожарах (Пономарев и др., 2018, 2019; Шешуков и др., 2008; Kharuk et al., 2021) не относится к территориям с экстремальной горимостью. Таким образом, архивные материалы продемонстрировали пример экстремального пожарного сезона, случившегося до начала регулярного спутникового мониторинга. Это позволило сформулировать гипотезу о необходимости пролонгировать сведения по материалам инструментальных спутниковых наблюдений для адекватного представления о динамике горимости и возможных сценариях изменения пожарных режимов в ближайшей перспективе. Материалы съёмки за 1982–1986 гг. на район интересов частично доступны по данным Landsat-4, -5 (рис. 1б).

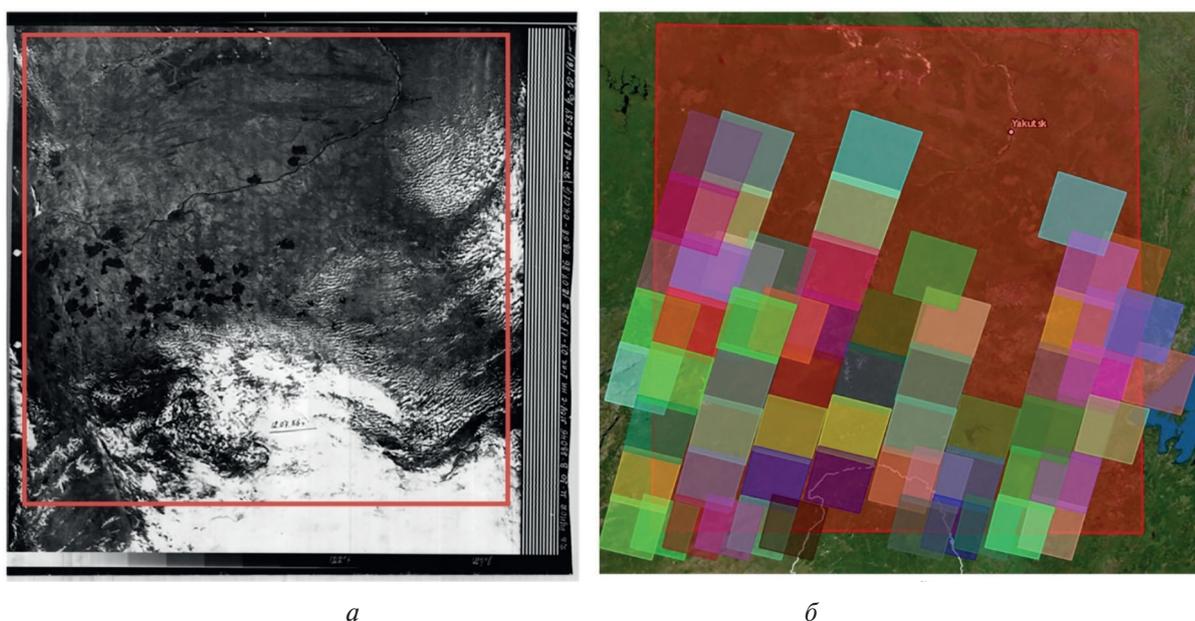


Рис. 1. Район исследований — территория бассейна р. Лены в среднем течении: а — снимок спутника «Метеор», СССР, 1986 г.; б — доступные сцены съёмки спутника Landsat-4, -5 ТМ, США, 1986 г. Красным квадратом выделена граница исследуемой территории

Основная цель работы — выявить возможный диапазон показателей горимости (числа и площадей пожаров) для территории исследования в условиях экстремальной засухи с анализом современных и ретроспективных спутниковых данных и оценить зависимость горимости лесов от уровня тепло- и влагообеспеченности.

Решение поставленных задач предполагает использование доступных архивов спутниковой информации, и прежде всего архива данных USGS (*англ.* United States Geological Survey) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Ресурс EarthExplorer предоставляет спутниковые снимки за последние 50 лет. Доступны данные со спутников NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration, Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства): Terra и Aqua MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), ASTER (*англ.* Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) и др. В рамках данной работы основной интерес представляют материалы Landsat со сканеров двух типов: MSS (*англ.* Multispectral Scanner) и ТМ (*англ.* Thematic Mapper). Данные MSS (пространственное разрешение 80 м) доступны с 1972 г.; данные ТМ (пространственное разрешение 30 м в видимом диапазоне, ближней и средних инфракрасных (ИК) зонах, 120 м — в тепловом диапазоне) — с 1982 г. Спутник Landsat-7 с радиометром ETM+ (*англ.* Enhanced Thematic Mapper Plus) обеспечивает пространственное разрешение до 15 м (Дворкин, Дудкин, 2013; Пономарев и др., 2019), в видимом диапазоне пространственное разрешение составляет 5–30 м, в ближнем и дальнем ИК-диапазонах — от 15 до 100 м. Эти данные не могут обеспечить оперативный режим

мониторинга пожаров, они представляют интерес в плане анализа послепожарного состояния лесов и могут быть использованы в качестве «хронорядов» динамики пожарного воздействия и состояния растительности на послепожарных участках с требуемым интервалом времени (1, 5, 10 и более лет).

### Исходные данные и методы обработки

В работе анализировались данные о лесных пожарах, зафиксированных на территории Восточной Сибири (территория бассейна р. Лены в среднем течении) ( $58-61^\circ$  с.ш.,  $118-122^\circ$  в.д.) за период 1986–2015 гг. по материалам базы данных USGS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), спутники Landsat-4...-8 MSS/TM (рис. 2). Общая площадь рассматриваемого района исследований составила 81,53 тыс. км<sup>2</sup>. Были выбраны снимки, полученные со спутников Landsat-4...-8 TM C1 за четыре исследуемых года: 1986, 1995, 2008, 2015. Использовались трёхканальные композитные изображения, составленные из данных в спектральных диапазонах 0,45–0,52; 0,52–0,60; 0,63–0,69 мкм (1-й, 2-й и 3-й каналы соответственно) с пространственным разрешением 30 м. Дополнительно для вычисления индекса NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) отдельно использовались данные 4-го канала (для Landsat-8 использовался 5-й канал) со спектральным диапазоном 0,76–0,90 мкм.

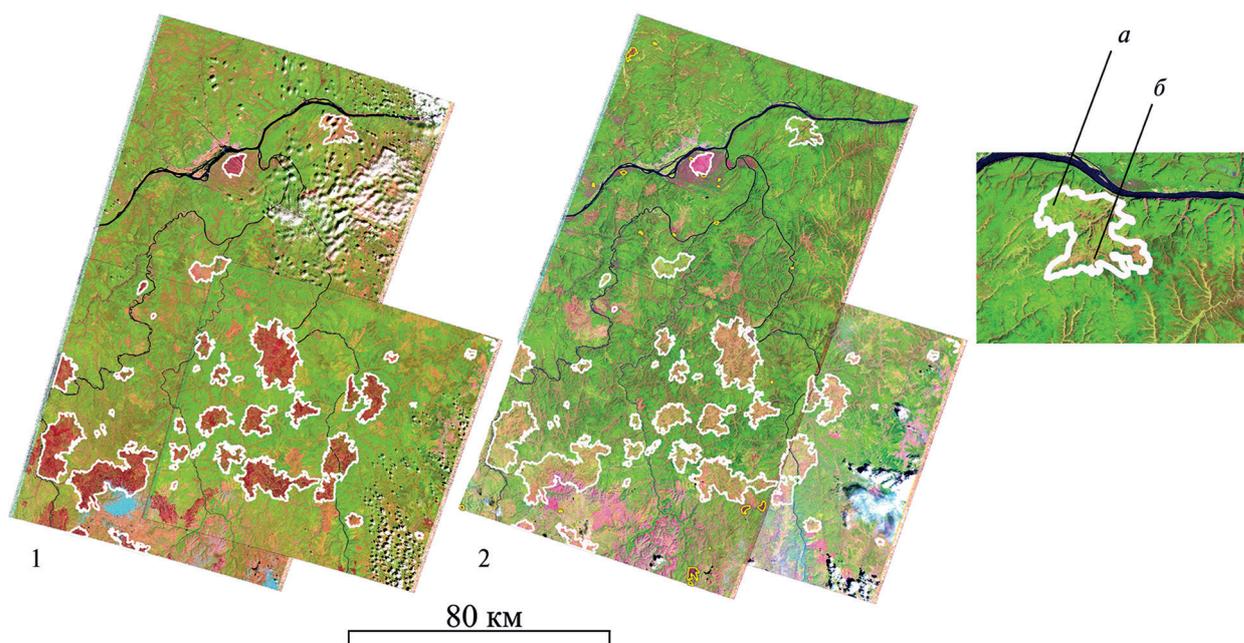


Рис. 2. Исходные данные на территорию бассейна р. Лены в среднем течении с выделенными полигонами послепожарных нарушений растительности. Съёмка Landsat-4, -5/TM C1 за 1986 г. (1) и 1995 г. (2). Белые полигоны — послепожарные участки, выделенные в 1986 г.; а — участки после пожаров 1986 г. с признаками восстановления растительности; б — невосстановившиеся послепожарные участки

Серия снимков отбиралась с привязкой к пожароопасным периодам (июнь — сентябрь), учитывалась их информативность для решения поставленной задачи (использовались только данные с пороговым значением облачности <10 % в кадре). Снимки 1986 г. были сделаны в июне в дневное время (11:30 по местному времени, 02:30 GMT (англ. Global Multiresolution Terrain)), в 1995 г. — в июне и августе (11:10 по местному времени, 02:10 GMT), в 2008 г. — в июле (11:50 по местному времени, 02:50 GMT) и в 2015 г. — в августе и сентябре (12:05 по местному времени, 03:05 GMT). Выборка составила 12 снимков.

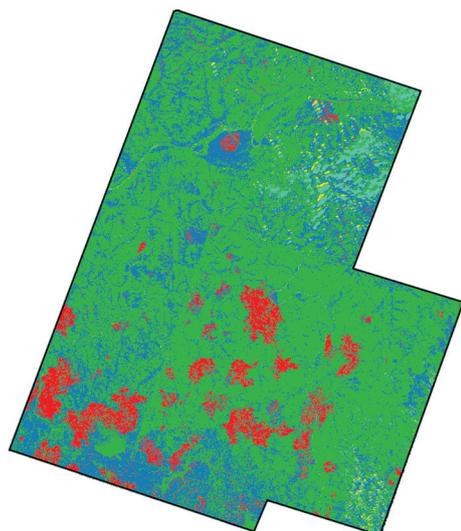


Рис. 3. Пример классификации послепожарных участков (красные полигоны) на снимках 1986 г.

В процессе обработки исходных снимков мы получали данные о площадях пожаров за каждый из рассмотренных сезонов (геостатистика), а также анализировали усреднённые значения вегетационного индекса на участках, пройденных пожарами в различные периоды восстановления растительности (динамика до 30 лет после пожара). Использовались стандартные процедуры, доступные в программном пакете QGIS версия 3.16.3 (*англ.* Quantum Geographic Information System) (<https://www.qgis.org/>). Классификация полигонов пожаров (модуль QGIS Dzetsaka: Classification tool, <https://github.com/nkarasiak/dzetsaka/>) выполнялась на основе обучающей выборки. Предварительно

в границах пройденных пожарами участков экспертно мы задавали полигоны обучающей выборки. Для детализации результата с учётом вариации спектральных признаков послепожарных участков классификация выполнялась с выделением 6 классов объектов: послепожарные участки и дополнительно земля, облака, тени, вода и снег, которые не представляли интерес в данной работе и в дальнейшем не анализировались. Фактически после классификации мы оперировали бинаризованными изображениями с выделенными на них полигонами пожаров. Выделенные участки с послепожарными нарушениями средствами QGIS экспортировались в векторный полигональный слой (*рис. 3*).

Обработка проводилась в проекции EPSG: 32651 — WGS 84/UTM zone 51N. Размер пикселя для архивных снимков составлял 30×30 м.

По полученным после бинаризации данным проводился расчёт площадей пожаров отдельно для каждого пожарного сезона. После 1986 г. появляются новые послепожарные полигоны, которые учитывались для соответствующих пожароопасных периодов.

С 1995 г. точная датировка пожаров проводилась на основе базы данных красноярского Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (Пономарев, Швецов, 2015). Для данных за 1986 г. дополнительно мы оценили снижение альбедо в видимом красном (*англ.* land surface albedo short —  $LSA_{short}$ ,  $\lambda = 0,63-0,69$  мкм) и ближнем инфракрасном (*англ.* land surface albedo NIR (*англ.* near infrared) —  $LSA_{NIR}$ ,  $\lambda = 0,76-0,90$  мкм) каналах. Как показано в работе (Quintano et al., 2019), в первый год после пожара снижение  $LSA_{NIR}$  и  $LSA_{short}$  составляет 35 и 20 % соответственно, а в последующем идёт восстановление. В нашем случае для пожаров 1986 г. эти значения были также в диапазоне 20–40 %, что подтвердило датировку пожаров для этих участков.

Сопряжённо для оценки влияния на горимость региона уровня тепло- и влагообеспеченности были восстановлены ряды гидротермического коэффициента (ГТК) увлажнения Селянинова (Селянинов, 1958). Оценка проводилась отдельно для каждого года в период с мая по сентябрь. Для расчёта ГТК были взяты данные температуры и влажности метеостанции г. Олекминска (№ 24944, 60,4° с. ш., 120,4° в. д.), расположенной в непосредственной близости от рассматриваемой зоны пожаров. Исходные данные доступны из открытого ресурса «Специализированные массивы для климатических исследований» (<http://aisori-m.meteo.ru>). ГТК позволил оценить степень засушливости пожароопасных сезонов с точки зрения соотношения тепла и влаги:

$$ГТК = \frac{R \times 10}{\sum t},$$

где  $R$  — сумма осадков (мм) в период с температурами выше +10 °С;  $\sum t$  — сумма температур за то же период (°С); 10 — нормировочный коэффициент.

Дополнительно для оценки состояния вегетирующих растительных покровов за каждый сезон исследуемого периода рассчитан вегетационный индекс NDVI. В соответствии с общепринятыми критериями (Медведева и др., 2020) мы использовали значения этого показателя для оценки состояния растительности после пожаров, а также для общей характеристики нарушенности территории исследований в отдельные сезоны. Индекс рассчитывался в программе QGIS с помощью встроенной функции Vegetation index (Slope based) исходя из соотношения:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)},$$

где NIR ( $\lambda = 0,63-0,69$  мкм) и RED ( $\lambda = 0,76-0,90$  мкм) — коэффициенты отражения, измеренные в указанных диапазонах длин волн.

## Результаты и обсуждение

За 30-летний период наблюдений были зафиксированы пожары общей площадью более 6500 км<sup>2</sup>. Это составляет ~8 % исследуемой территории.

Для четырёх групп снимков за рассматриваемый период (1986–2015) были рассчитаны площади послепожарных участков (таблица).

Характеристики исследуемых областей

Год	Число пожаров	Площадь пожаров, км <sup>2</sup>	Процент от площади района	ГТК	NDVI	
					диапазон значений	среднее
1986	66	5680,96	6,96	0,36	–0,03...0,55	0,37
1995	20	156,76	0,19	1,09	–0,10...0,63	0,35
2008	40	706,86	0,87	1,15	–0,00...0,71	0,53
2015	17	134,82	0,17	0,74	–0,01...1,00	0,31**
Среднее без учёта 1986 г.*	26±13	332,81±366,77	0,41±0,45	0,99±0,25		0,40±0,10

\* Данные экстремальной горимости пожароопасного сезона 1986 г. не включены, так как имеют существенное превышение относительно последующих.

\*\* Без учёта ночных снимков.

Существующий на сегодня ряд данных о пожарах в регионе, основанный на материалах систематического спутникового мониторинга с середины 1990-х гг. (Барталев и др., 2015; Поморцев и др., 2008; Пономарев и др., 2018, 2019; Шешуков и др., 2008; Kharuk et al., 2021) дополнен сведениями более раннего пожароопасного сезона 1986 г. Пролонгация пожарной хронологии до 1986 г. позволила выявить параметры горимости района интересов в условиях экстремального пожароопасного сезона 1986 г. По сравнению с последующим 20-летним периодом в сезон экстремальной засухи 1986 г. пожаров было больше в 2,5 раза, а общая площадь пожарных повреждений составила до 7 % лесной территории, что в 17 раз выше, чем среднемноголетний показатель (~0,5–1,0 %), оценённый за период инструментальных спутниковых наблюдений за пожарами (Пономарев и др., 2018, 2019; Kharuk et al., 2021).

Как видно из анализа данных метеостанций, показатель тепло- и влагообеспеченности для этой территории может меняться в широких пределах: от 0,36 в 1986 г. до 0,73–1,15 в 1995–2015 гг. (см. таблицу). Отклонение ГТК от среднемноголетних оптимальных значений (~0,99±0,25) можно интерпретировать в терминах сценария развития пожароопасного периода (Пономарев и др., 2018). Анализ ретроспективных данных о пожарах позволил выявить максимум горимости региона при сильной засухе сезона 1986 г., причём на протяжении

последующих 20 лет таких метеорологических условий в районе не наблюдалось. Однако это позволяет сделать предположение о возможности реализации экстремальной горимости в регионе в будущем в условиях меняющегося климата и повышения уровня засушливости в течение вегетационного периода, на что указывают современные публикации (Kharuk et al., 2021).

При этом общая динамика ГТК в случае её долговременного убывающего тренда будет триггером для существенного роста показателей горимости лесов региона и изменения пожарных режимов в ближайшем будущем.

Результаты анализа показателя NDVI представлены на *рис. 4* для 1996 г. (*а*) и 2008 г. (*б*). Данный параметр так же был рассчитан для 1995 и 2015 гг. В 1986 г. индекс NDVI менялся в пределах от  $-0,03$  до  $0,63$ ; в 1995 г. — от  $-0,10$  до  $0,63$ ; в 2008 г. — от  $0,06$  до  $0,70$  и в 2015 г. — от  $-0,01$  до  $0,99$ .

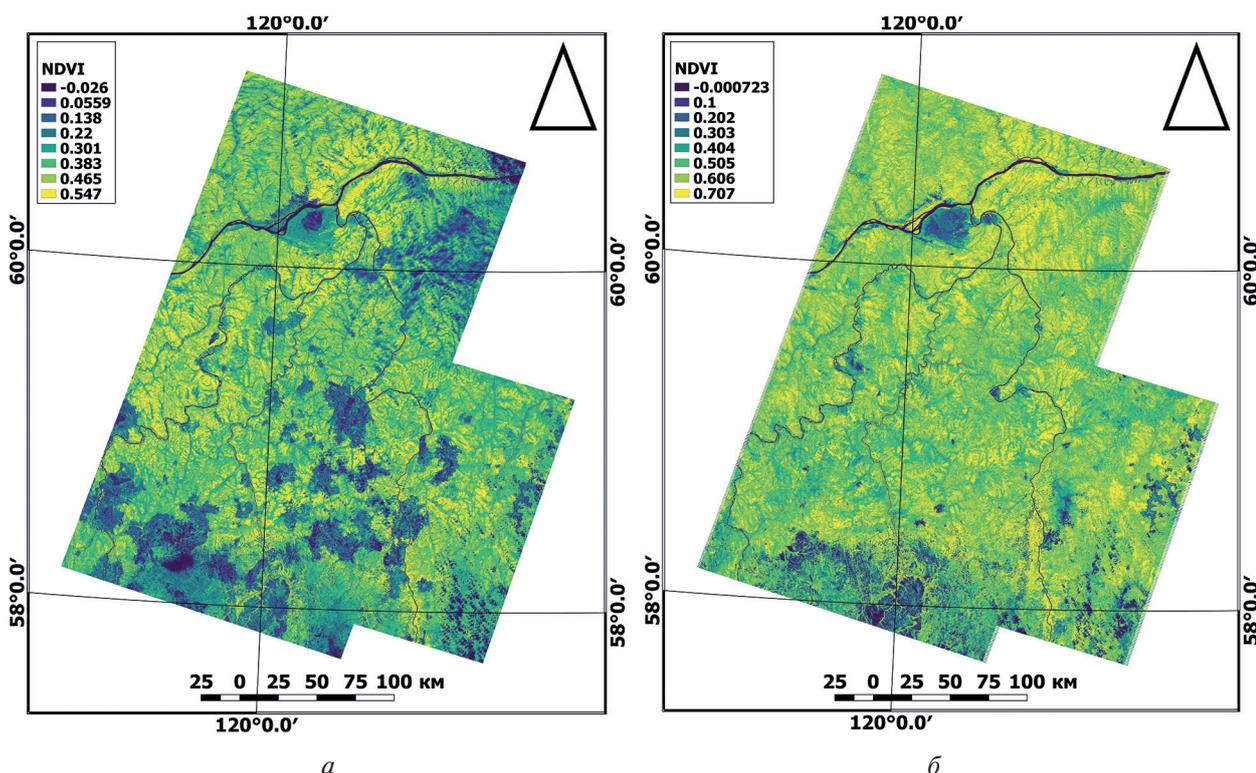


Рис. 4. Вегетационный индекс NDVI: а — 1986 г.; б — 2008 г.

Средние значения NDVI коррелируют с количеством послепожарных повреждений территории. Так, после экстремальной горимости 1986 г. значение NDVI в пределах территории исследования снизилось до  $0,37$  (см. *таблицу*), что на 30 % ниже, чем показатели для вегетационных периодов без массовых пожаров ( $\sim 0,51-0,53$ ). На основе использованного хроноряда подтверждено, что значение вегетационного индекса, заниженное после пожаров, восстанавливается в течение 7–10 лет (Ропотаев et al., 2020). Наши результаты (*рис. 4*) позволяют констатировать полное отсутствие дешифровочных признаков, основанных на показателе NDVI, через 20 лет после пожара.

Также отметим, что в 2015 г. фиксируется снижение значения NDVI на 30 % по сравнению с 2008 г. В этот год снизился и коэффициент ГТК на 36 % и составил  $0,74$ . Такой показатель коэффициента тепло- и влагообеспеченности соответствует засушливому сезону, что может быть причиной заниженных значений индекса NDVI.

Одна из важнейших задач, решаемых с использованием многолетних спутниковых съёмок пожаров, заключается в оценке восстановительных процессов повреждённой растительности. В некоторых работах (Барталев и др., 2015; Ропотаев et al., 2020) показано, что «вегетационные» признаки на данных спутниковой съёмки восстанавливаются уже через не-

сколько лет после пожара. Как правило, это связано с восстановлением либо лишь частично повреждённых (не отпавших) древостоев, либо напочвенного растительного покрова и молодняков. Например, в лиственничниках Сибири наблюдается активное восстановление уже на 5–7-й год после пожара (Kharuk et al., 2021). В тепловом диапазоне послепожарные нарушения температурных режимов проявляются более 20 лет (Ponomarev et al., 2020). Можно отметить (см. рис. 4), что с 1986 г. на протяжении около 20 лет спектральные характеристики послепожарных участков (в каналах № 1–3 Landsat) достигли значений, близких к фоновым, после чего появились новые очаги возгораний, которые в дальнейшем также восстанавливались в течение не менее 10 лет.

## Заключение

Для исследуемого региона показана возможность продления пожарных хронологий на основе ретроспективных спутниковых данных. Применимость метода во многом зависит от доступности материалов спутниковой съёмки, однако даже эпизодически доступные материалы могут подтверждать или дополнять современные тренды горимости лесов на уровне регионов, что имеет большое значение на этапе построения прогнозов.

Показано, что в условиях экстремального пожароопасного сезона (по материалам ретроспективных данных за 1986 г.) по сравнению с последующим периодом число очагов пожаров может существенно возрасти, увеличивая горимость лесов на порядок ( $>6,96\%$  при среднемноголетнем  $\sim 0,41\%$ ). Высокая горимость коррелирует с гидротермическим коэффициентом увлажнения Селянинова, который в условиях экстремальной засухи 1986 г. равен  $0,36$  при среднемноголетнем оптимуме для региона  $\sim 0,99 \pm 0,25$ .

Пролонгированные данные о пожарах позволяют констатировать, что в условиях климатических изменений и усиления засушливости возможен существенный рост показателя горимости лесов региона в ближайшем будущем, как минимум до уровня зафиксированного экстремума.

Дальнейшее детальное изучение пожаров Сибири в 70-е и 80-е гг. XX в. позволит получать более эффективные прогнозы изменений пожарных режимов и показателей горимости с учётом ретроспективных характеристик и прогнозируемых климатических факторов.

Работа выполнена по темам госзадания № 0287-2019-0006 и 0287-2021-0040, а также при частичной поддержке грантом Российского фонда фундаментальных исследований и Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности № 20-44-242002 («Инструментальный мониторинг физических свойств и численное моделирование состояния техногенно-нарушенных почв Сибири»).

## Литература

1. 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.
2. Дворкин Б. А., Дудкин С. А. Новейшие и перспективные спутники дистанционного зондирования Земли // Геоматика. 2013. № 2. С. 16–36.
3. Медведева М. А., Макаров Д. А., Сирин А. А. Применимость различных спектральных индексов на основе спутниковых данных для оценки площадей торфяных пожаров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 157–166. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
4. Поморцев О. А., Ведешин Л. А., Дальбинов А. А. Лесные пожары: от мониторинга к прогнозу (на примере Якутии) // Исслед. Земли из космоса. 2008. № 2. С. 57–67.
5. Пономарев Е. И., Харук В. И. Горимость лесов Алтае-Саянского региона в условиях наблюдаемых изменений климата // Сибирский экологический журн. 2016. № 1. С. 38–46. DOI: 10.15372/SEJ20160104.
6. 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.

7. Пономарев Е. И., Скоробогатова А. С., Пономарева Т. В. Горимость лесов Сибири и межсезонные вариации уровня тепло- и влагообеспеченности // *Метеорология и гидрология*. 2018. № 7. С. 45–55.
8. Пономарев Е. И., Харук В. И., Швецов Е. Г. Мониторинг природных пожаров в Сибири: динамика горимости в современном климате, пространственно-временные закономерности, характеристики и прогнозы: монография. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, 2019. 220 с.
9. Селянинов Г. Т. Происхождение и динамика засух // *Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай*. Л.: Гидрометеиздат, 1958. С. 5–30.
10. Шешуков М. А., Брусова Е. В., Позднякова В. В. Современные пожарные режимы в лесах Дальнего Востока // *Лесоведение*. 2008. № 4. С. 3–9.
11. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D. Wildfires in the Siberian taiga // *Ambio*. 2021. <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>.
12. Kirilyanov A. V., Saurer M., Rolf Siegwolf, Knorre A. A., Prokushkin A. S., Churakova (Sidorova) O. V., Fonti M. V., Büntgen U. Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia // *Environmental Research Letters*. 2020. V. 15(3). DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.
13. Knorre A. A., Kirilyanov A. V., Prokushkin A. S., Krusic P. J., Büntgen U. Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia // *Science of The Total Environment*. 2019. V. 652. P. 314–319. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.124.
14. Ponomarev E. I., Masyagina O. V., Litvintsev K. Y., Ponomareva T. V., Shvetsov E. G., Fennikov K. A. The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia // *Forests*. 2020. V. 11(8). Art. No. 790. 18 p. DOI: 10.3390/f11080790.
15. Quintano C., Fernandez-Manso Al., Marcos E., Calvo L. Burn severity and post-fire land surface albedo relationship in mediterranean forest ecosystems // *Remote Sensing*. 2019. V. 11(19). Art. No. 2309. DOI: 10.3390/rs11192309.

## Extended chronology on wildfires for local territories of Eastern Siberia

A. V. Malkanova<sup>1,2</sup>, A. N. Zabrodin<sup>1,2</sup>, E. I. Ponomarev<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia*  
*E-mail: malkanova@ksc.krasn.ru*

<sup>2</sup> *Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia*

A method for monitoring the dynamics of fire regimes is proposed based on extended chronologies using modern and retrospective satellite data from open sources. The data of channels 1 (0.45–0.52 microns), 2 (0.52–0.60 microns), 3 (0.63–0.69 microns) of Landsat-4, -5 MSS C1 and Landsat-8/OLI was used for the period 1986–2015. The dynamics of forest burning in Eastern Siberia (the territory of the Lena River basin in the middle flow) is reviewed. The dependency of fire frequency and burned area from the level of heat and moisture supply is shown for local territories of Eastern Siberia. The possible range of forest burning (number and area of fires) was evaluated for the study area in extreme drought conditions, confirmed by historical data. The maximum fire frequency was due to extreme weather conditions in 1986, when the hydrothermal coefficient (0.36) was 3 times lower than normal mean level ( $0.99 \pm 0.25$ ), which has not been repeated for the last 20 years. It is shown that potentially the average annual values of the number of fires can be 2.5 times higher than the current statistics. Extended data on fires allow us to state that a significant increase in fire statistics for the region is possible under conditions of the aridity increasing.

**Keywords:** Siberia, remote sensing, satellite data, forest fire, Landsat, hydrothermal coefficient (HTC)

Accepted: 11.09.2021

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-65-73

## References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94 (in Russian).
2. Dvorkin B. A., Dudkin S. A., Up-to-date and advanced remote sensing satellites, *Geomatika*, 2013, No. 2, pp. 16–36 (in Russian).
3. Medvedeva M. A., Makarov D. A., Sirin A. A., Applicability of different spectral indexes based on satellite data for peat fire area estimation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 157–166 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-157-166.
4. Pomortsev O. A., Vedeshin L. A., Dalbinov A. A., Forest Fires: From Monitoring to Prognosis (On the Example of Yakutia), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 2, pp. 57–67 (in Russian).
5. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Wildfire Occurrence in Forests of the Altai-Sayan Region under Current Climate Changes, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 1, pp. 29–36, DOI: 10.1134/S199542551601011X.
6. Ponomarev E. I., Shvetsov E. G., Satellite Detection of Forest Fires and Geoinformation Methods for Calibrating of the Result, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 1, pp. 84–91 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961415010054.
7. Ponomarev E. I., Ponomareva T. V., Skorobogatova A. S., Wildfire Occurrence in Siberia and Seasonal Variations in Heat and Moisture Supply, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2018, Vol. 43, No. 7, pp. 456–463, DOI: 10.3103/S1068373918070051.
8. Ponomarev E. I., Kharuk V. I., Shvetsov E. G., *Monitoring prirodnykh pozharov v Sibiri: dinamika gorimosti v sovremennom klimate, prostranstvenno-vremennye zakonomernosti, kharakteristiki i prognozy: monografiya* (Monitoring of wildfires in Siberia: dynamics of burnability in the modern climate, spatial and temporal patterns, characteristics and forecasts: a monograph), Krasnoyarsk: SibFU, 2019, 220 p. (in Russian).
9. Selyaninov G. T., Proiskhozhdenie i dinamika zasukh (Origin and dynamics of droughts), In: *Zasukhi v SSSR, ikh proiskhozhdenie, povtoryaemost' i vliyanie na urozhai* (Droughts in the USSR, their origin, frequency and impact on the harvest), Gidrometizdat, Leningrad, 1958, pp. 5–30 (in Russian).
10. Sheshukov M. A., Brusova E. V., Pozdnyakova V. V., The present fire regimes in forests in the Far East, *Lesovedenie*, 2008, No. 4, pp. 3–9 (in Russian).
11. Kharuk V. I., Ponomarev E. I., Ivanova G. A., Dvinskaya M. L., Coogan S. C. P., Flannigan M. D., Wildfires in the Siberian taiga, *Ambio*, 2021, <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01490-x>.
12. Kirdeyanov A. V., Saurer M., Rolf Siegwolf, Knorre A. A., Prokushkin A. S., Churakova (Sidorova) O. V., Fonti M. V., Büntgen U., Long-term ecological consequences of forest fires in the continuous permafrost zone of Siberia, *Environmental Research Letters*, 2020, Vol. 15(3), DOI: 10.1088/1748-9326/ab7469.
13. Knorre A. A., Kirdeyanov A. V., Prokushkin A. S., Krusic P. J., Büntgen U., Tree ring-based reconstruction of the long-term influence of wildfires on permafrost active layer dynamics in Central Siberia, *Science of The Total Environment*, 2019, Vol. 652, pp. 314–319, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.10.124.
14. Ponomarev E. I., Masyagina O. V., Litvintsev K. Y., Ponomareva T. V., Shvetsov E. G., Fennikov K. A., The effect of post-fire disturbances on a seasonally thawed layer in the permafrost larch forests of Central Siberia, *Forests*, 2020, Vol. 11(8), Art. No. 790, 18 p., DOI: 10.3390/f11080790.
15. Quintano C., Fernandez-Manso Al., Marcos E., Calvo L., Burn severity and post-fire land surface albedo relationship in mediterranean forest ecosystems, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11(19), Art. No. 2309, DOI: 10.3390/rs11192309.