

Оценка постпирогенной динамики тундровой растительности на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018) на основе данных ДЗЗ детального и высокого разрешения

О. С. Сизов^{1,2}, П. Р. Цымбарович³, Е. В. Ежова⁴,
А. В. Соромотин⁵, Н. В. Приходько⁵

¹ *Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, 117971, Россия*

² *Российский государственный университет нефти и газа имени И. М. Губкина
Москва, 119991, Россия*

³ *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*

⁴ *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603155, Россия*

⁵ *Тюменский государственный университет, Тюмень, 625003, Россия
E-mail: kabanin@yandex.ru*

В статье рассматриваются особенности восстановления тундровой растительности на участках природных пожаров на севере Западной Сибири. Основными исходными данными являются космические снимки среднего и высокого разрешения, охватывающие период наблюдений с 1968 по 2018 г. (спутники Corona/KH-4b, Hexagon/KH-9, «Ресурс-П» № 1/2, SPOT-6/7, Landsat-1/4/5/7/8), а также цифровая модель рельефа ArcticDEM и архивные топографические карты. В результате сравнительного анализа установлено, что тундровые растительные сообщества в естественных условиях даже на фоне явных климатических изменений демонстрируют высокую устойчивость при отсутствии внешних механических воздействий. Участки естественного залесения тундры выявлены на ограниченных по площади дренируемых участках террас и склонов речных долин в зоне влияния Обской губы. С другой стороны, значительные изменения растительности наблюдаются в пределах тундровых гарей. Установлено, что за период наблюдений гари охватили более 60 % площади рассматриваемых ключевых участков (без учёта площади повторных возгораний). При этом частота и интенсивность пожаров возрастает пропорционально расширению антропогенного воздействия, обусловленного добычей нефти и газа. В работе данная тенденция показана на примере Ярудейского месторождения. По итогам сравнения разновременной высокодетальной космической съёмки (выборка из 157 эталонов) установлено, что во всех случаях после пожара наблюдается активное восстановление растительности. Наиболее существенные изменения растительных сообществ выявлены в переходных условиях лесотундры, где в 56 % случаях на месте мохово-лишайниковой тундры формируются густые елово-лиственничные леса, а в 29 % случаях — редколесья. Вероятным лимитирующим фактором развития лесных пород в криолитозоне является мощность сезонно-талого слоя. Рекогносцировочные наблюдения в районе пос. Пангоды в августе 2019 г. показали явные отличия глубины протаивания на участках гарей 1968 и 1988 гг. (102–119 см) от фоновых условий южной тундры (38 см). Для подтверждения данной закономерности запланированы дальнейшие детальные полевые исследования.

Ключевые слова: тундра, растительность, Западная Сибирь, пожары, восстановление, дистанционное зондирование, геопортал

Одобрена к печати: 16.06.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-137-153

Введение

Природные пожары являются важным экологическим фактором, который во многом определяет структуру и распространение растительного покрова, интенсивность круговорота углерода, а также значительно меняет свойства верхнего плодородного слоя почвы. Современные исследования показывают, что в арктической зоне пожары являются одной из основных причин нарушения термических условий многолетнемёрзлых пород (ММП) (Nitze et al., 2018). В естественных условиях возгорания в тундре происходят гораздо реже, чем на лесопокрытых

таёжных территориях (Барталев и др., 2005; Nitze et al., 2018; Rocha et al., 2012), однако их частота и интенсивность прямо пропорционально возрастают с усилением антропогенного воздействия, особенно в районах добычи нефти и газа (Московченко, Московченко, 2018; Raynolds et al., 2014). Слабо изученными остаются вопросы воздействия огня на экосистемы в переходных условиях лесотундры на фоне наблюдаемого постепенного потепления климата в Арктике (Jones et al., 2012; Sobrino et al., 2020).

Для выявления, мониторинга и оценки последствий природных пожаров активно применяются дистанционные методы, основанные преимущественно на данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) среднего и низкого разрешения (спутники Landsat-5/7/8, Sentinel-2/3, TERRA, AQUA, SuomiNPP и др.) (Rocha et al., 2012). Накопление больших объёмов информации позволяет в глобальном масштабе с ежегодной периодичностью оценивать площадь лесопокрытой территории как по оптическим, так и по радиолокационным данным (Hansen et al., 2013; Shimada et al., 2014), а также проводить ретроспективный анализ изменений, в том числе роста площади гарей (проекты GlobalForestChange, GlobalForestWatch) и распространения кустарников и редколесий в тундре (увеличения запасов фитомассы и повышения степени «зелёности») (Epstein et al., 2018). В России на основе данных ДЗЗ успешно функционирует ведомственная информационная система дистанционного мониторинга лесов (ИСДМ-Рослесхоз), в рамках работы которой накоплены значительные объёмы данных о пожарной динамике в пределах земель лесного фонда страны с 2001 г. (Лупян и др., 2017). Вместе с тем появление доступных архивных данных ДЗЗ со спутников Corona с высоким разрешением даёт возможность расширять временные границы мониторинга вплоть до 60-х гг. XX в. и проводить более детальные оценки изменений растительного покрова северных территорий путём сравнения с современными высокодетальными данными ДЗЗ (Yu et al., 2015).

Целью настоящей работы является проведение ретроспективного анализа распространения природных пожаров и оценки постпирогенной динамики растительности в зоне тундры, лесотундры и северной тайги на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968–2018) на основе данных ДЗЗ детального и высокого разрешения.

Территория работ

Территория работ расположена в пределах Надымского р-на Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) и охватывает нижнее течение р. Надым и южное побережье Обской губы (Надымская Обь) (рис. 1, см. с. 139).

Рельеф поверхности выровненный, слабонаклонный, с большой долей заболоченных и заозёрных понижений. Верхняя часть четвертичных отложений представлена водно-ледниковыми, морскими и озёрно-аллювиальными осадками. Мощность органических торфяных отложений в среднем 1–1,5 м (до 5 м в понижениях). Абсолютные высоты колеблются в пределах от 0 до 120 м. Среднегодовая температура составляет $-4,6...-2$ °С, в летний период воздух прогревается в среднем до $+14...+17$ °С, в зимний период температура опускается до $-24...-17$ °С (метеостанция Надым). Территория расположена на границе сплошного и прерывистого распространения ММП, сплошная мерзлота встречается на междуречьях и в пределах бугристых торфяников (температура $-3-1$ °С), в долинах и на речных террасах кровля мёрзлых пород находится на глубине 50–150 м (Атлас..., 2004).

Для проведения детального анализа выбраны три ключевых участка с преобладанием тундровой растительности: наиболее крупный участок № 1 на правом берегу р. Надым, включающий бассейн р. Ныда и верховья р. Правая Хетта (площадь — 15 800 км²); участок № 2, включающий южное побережье Обской губы и бассейн р. Шуга (2500 км²) и участок № 3 к западу от Надыма, частично охватывающий бассейн р. Нгарка-Пыряяха (2000 км²) (см. рис. 1). В ландшафтном отношении участки относятся к Тазовской южно-тундровой провинции, Салехардской и Надым-Пурской лесотундровой, Полуийской и Надым-Пурской северо-таёжной провинциям Западно-Сибирской равнины (Атлас..., 2004; Ильина и др., 1985). Растительные сообщества представлены:

- ерниковыми и ивняково-ерниковыми мохово-лишайниковыми тундрами в сочетании с плоскобугристыми трещиновато-полигональными болотами и лишайниково-кустарничковыми редколесьями (южно-тундровые формации);
- лиственничными и елово-лиственничными кустарничково-зеленомошными редколесьями в сочетании с лишайниковыми тундрами (лесотундровые формации);
- лиственничными и елово-лиственничными с примесью кедра и сосны кустарничково-зеленомошно-лишайниковыми лесами в сочетании с ерnikово-сфагново-лишайниковыми плоско- и крупнобугристыми болотами (северо-таёжные формации).

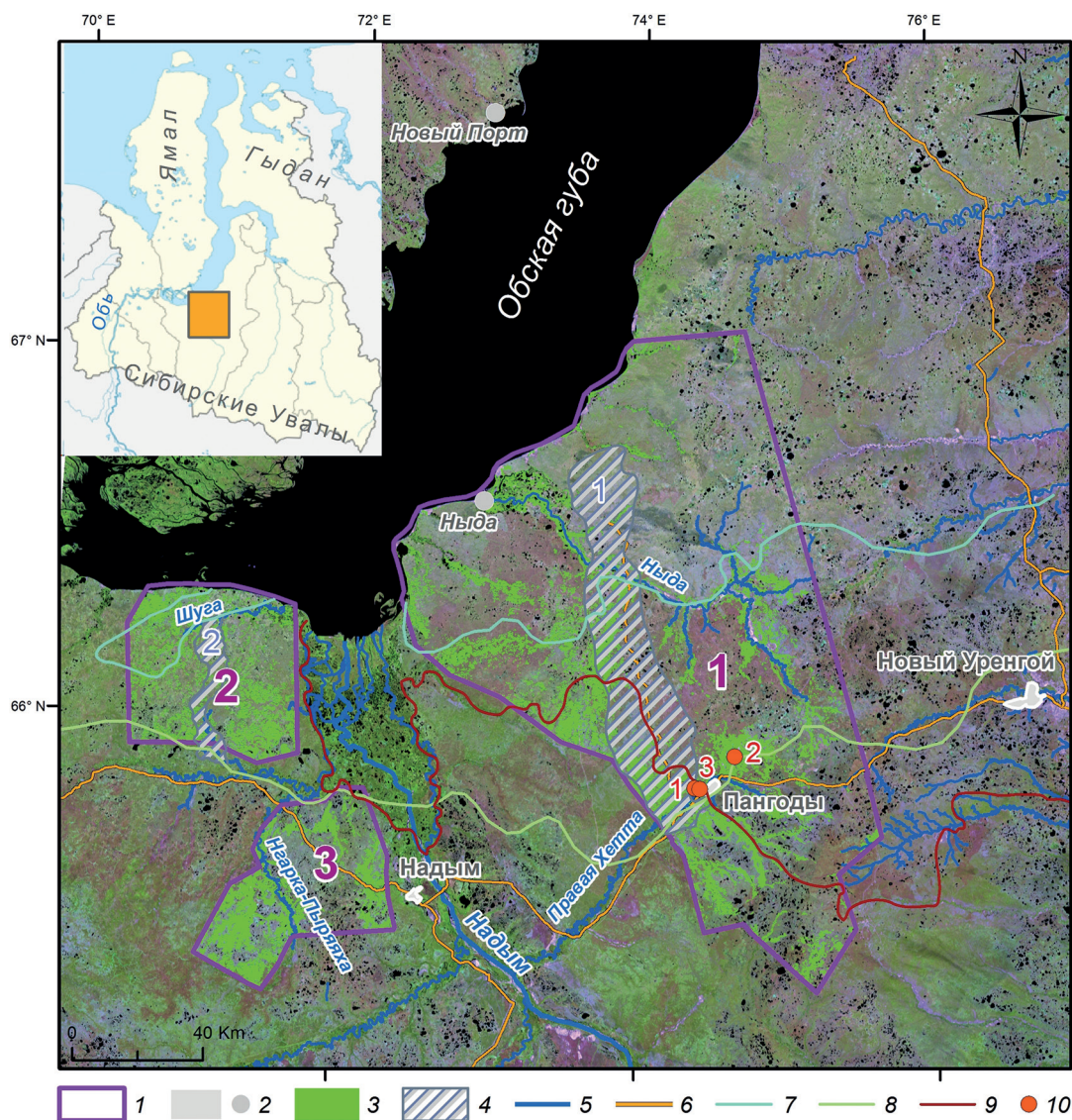


Рис. 1. Обзорная карта района работ: 1 — ключевые участки; 2 — населённые пункты; 3 — маска леса; 4 — месторождения углеводородов (1 — Медвежье, 2 — Ярудейское); 5 — водотоки; 6 — автодороги; 7 — граница зоны тундры; 8 — граница зоны лесотундры; 9 — граница земель лесного фонда; 10 — точки полевых наблюдений (номера см. табл. 2); подложка — Landsat-7, 2000 г.

Антропогенное воздействие определяется разработкой крупных нефтегазовых месторождений (Медвежье, Ярудейское). Кроме того, в пределах ключевых участков проходят крупные магистральные газопроводы («Ямбург – Тула», «Ямбург – Елец», «СРТО – Урал», «Уренгой – Центр», «Уренгой – Ужгород» и др.), ведётся строительство Северного широтного хода «Салехард – Новый Уренгой» (автомобильная и железная дороги).

Материалы и методы

Исходные дистанционные и картографические данные, использованные в ходе работы, представлены в *табл. 1*. Ниже приводится их подробное описание.

Таблица 1. Исходные данные для проведения исследований

| Тип данных | Дата (годы) | Разрешение, м | Источник |
|------------------------------|--|-----------------------|---|
| Corona/КН-4b Hexagon/КН-9 | 21.08.1968 23.07.1976 | ~2 ~6 | Геологическая служба США (<i>англ.</i> The United States Geological Survey, https://earthexplorer.usgs.gov) |
| «Ресурс-П» № 1/2 | 07.11.2016, 04.07.2016, 28.09.2016 | 1,6 | Госкорпорация «Роскосмос» (https://gptl.ru) |
| SPOT-6/7 | 2016–2017 | 1,5 | Сервис Яндекс.Карты (https://yandex.ru/maps), Европейская аэрокосмическая группа Airbus DS (<i>англ.</i> Airbus Defense and Space) |
| Landsat-1 | 1973 | 60 | Геологическая служба США (<i>англ.</i> United States Geological Survey, https://www.usgs.gov) |
| Landsat-4/5 | 1987–1988 | 30 | |
| Landsat-7 | 2000–2002 | — | |
| Landsat-8 | 2016 | — | |
| — | 2017–2018 | — | |
| — | 2019 | — | |
| ЦМР ArcticDEM | 2018 (создание), 2010–2017 (съёмка) | 2 | Национальное агентство геопространственной разведки США (<i>англ.</i> National Geospatial-Intelligence Agency — NGA) (https://arctic-nga.opendata.arcgis.com/) |
| Топокарты | 1968–1971 | Масштаб: 1:100 000 | Роскартография (https://www.marshruty.ru/Maps/Maps.aspx) |

1. Рассекреченные панхроматические фотоснимки со спутников космической разведки KeyHole (КН) Министерства обороны США (Ruffner, 2005). Мозаика Corona/КН-4b фиксирует начальное состояние территории до активного промышленного освоения (первые геологоразведочные работы на рассматриваемой территории начались в 1967 г.). Несмотря на отсутствие спектральной информации, на мозаике хорошо выделяются участки природных пожаров в тундре и лесотундре на фоне светлой лишайниковой растительности. Снимок Hexagon/КН-9 показывает этап строительства инфраструктуры Медвежьего месторождения (проектная эксплуатация началась с конца 1977 г.).

2. Снимки высокого разрешения, фиксирующие текущее состояние растительности. На небольшую часть территории (~10 %) были получены три маршрута мультиспектральной съёмки «Ресурс-П» № 1/2 за 2016 г. с разрешением около 1,6 м. Основная площадь участков покрывается мозаикой данных SPOT-6/7 с разрешением 1,5 м и синтезом в видимых цветах без цветового выравнивания.

3. Данные Landsat. Использовались для определения площади природных пожаров за отдельные временные срезы, а также для оценки восстановления растительности на гарях. Исходя из наличия исходных данных ДЗЗ были выбраны следующие годы мониторинга: 1973, 1988, 2001, 2016 и 2018. Оценка запасов фитомассы (фотосинтезирующих частей растений) на участках разновозрастных гарей на основе индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) осуществлялась по данным Landsat-8 (дата съёмки — 3 июля 2019 г.).

4. Цифровая модель рельефа (ЦМР) ArcticDEM. Применялась для оценки углов наклона поверхности.

5. Топографические карты масштаба 1:100 000 на всю площадь ключевых участков. Большинство карт составлено по результатам топосъёмки 1968–1971 гг., при этом аэрофотосъёмка

проводилась за несколько лет до полевых работ. Таким образом, карты, как и архивные космические снимки Corona/КН-4b, фиксируют исходное состояние территории. Основная задача привлечения топокарт состояла в получении маски лесной растительности методом автоматической трассировки в программное обеспечение (ПО) EasyTrace. Итоговый векторный слой исправлялся и дополнялся по снимкам Corona/КН-4b, поскольку в ряде случаев были выявлены расхождения топокарт с фактической обстановкой.

6. Данные о тепловых аномалиях из сервиса оперативного мониторинга FIRMS (The Fire Information for Resource Management System, <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov>).

При выявлении изменений на снимках высокого разрешения (Corona/КН-4b; «Ресурс-П» № 1/2; SPOT-6/7) применялись методы визуального дешифрирования — лесные участки, отдельные деревья и свежие гари хорошо выделяются на фоне тундровой растительности. Картографирование гарей по данным Landsat выполнялось методом объектно-ориентированного дешифрирования (Object-Based Image Analysis — OBIA) в ПО OrfeoToolbox. Расчёт NDVI и зональной статистики по сегментам проводился с использованием штатных инструментов в ПО ArcGIS. Для самостоятельного просмотра и скачивания итоговых картографических слоёв на основе клиент-серверной архитектуры с использованием открытых веб-технологий разработан геопортал Nadym.Changes in 50 years (1968–2018) (далее — NC50) (ageportal.ipostmn.ru/nadym).

Результаты

Создание маски лесной и тундровой растительности

На подготовительном этапе исследования была проведена визуальная оценка качества двух глобальных открытых масок лесной растительности, созданных на основе оптической съёмки Landsat (Hansen et al., 2013) и радиолокационных данных PALSAR-2 (Shimada et al., 2014). Визуальное сравнение со снимком «Ресурс-П» показало, что оба источника характеризуются большой долей неточных и ошибочных данных, особенно на участках с разреженной растительностью. Во многом низкая точность обусловлена простотой применяемых алгоритмов, которые не учитывают большого количества локальных особенностей.

Данное обстоятельство привело к необходимости создания маски леса на основе топографических карт масштаба 1:100 000. К лесопокрытой территории на топокарте относятся следующие категории: леса густые высокие (обычные), леса густые низкорослые, поросль леса и кустарники обычные (отмечены в поймах и дельтах рек). После уточнения и дополнения по снимкам Corona/КН-4b итоговая площадь лесов в пределах тестовых участков составила 3581 км² (17,53 % от общей площади) (см. *рис. 1*). Площадь сухих автоморфных тундровых участков (категория «моховая и лишайниковая растительность» за вычетом заболоченных понижений) составила 11371 км² (55,68 %).

Сравнение с маской леса, созданной по данным Landsat-7 (Hansen et al., 2013), показало, что при выборе 25%-го порога плотности лесной растительности доля совпадений составляет 25,1 %, при этом пропущено 55,9 % лесов, а ошибочно выявлено 18,9 %. При выборе 10%-го порога плотности лесной растительности доля совпадений возрастает до 30,2 %, пропуски сокращаются до 33,4 %, но процент ошибок составляет 36,4 %. Точность маски леса, полученной на основе радиолокационных данных PALSAR-2 за 2017 г., существенно ниже: доля совпадений — 14,2 %, пропуски — 55,9 %, ошибки выделения — 6,3%. При этом большая часть редколесий по данным PALSAR-2 не идентифицируется, а ошибочное выделение наблюдается в поймах, где за леса принимаются обводнённые участки.

Ретроспективная оценка площади гарей

Результаты дешифрирования показывают, что с 1968 по 2018 г. гари охватили более 60 % площади ключевых участков (без учёта площади повторных возгораний) (*рис. 2*, см. с. 142).

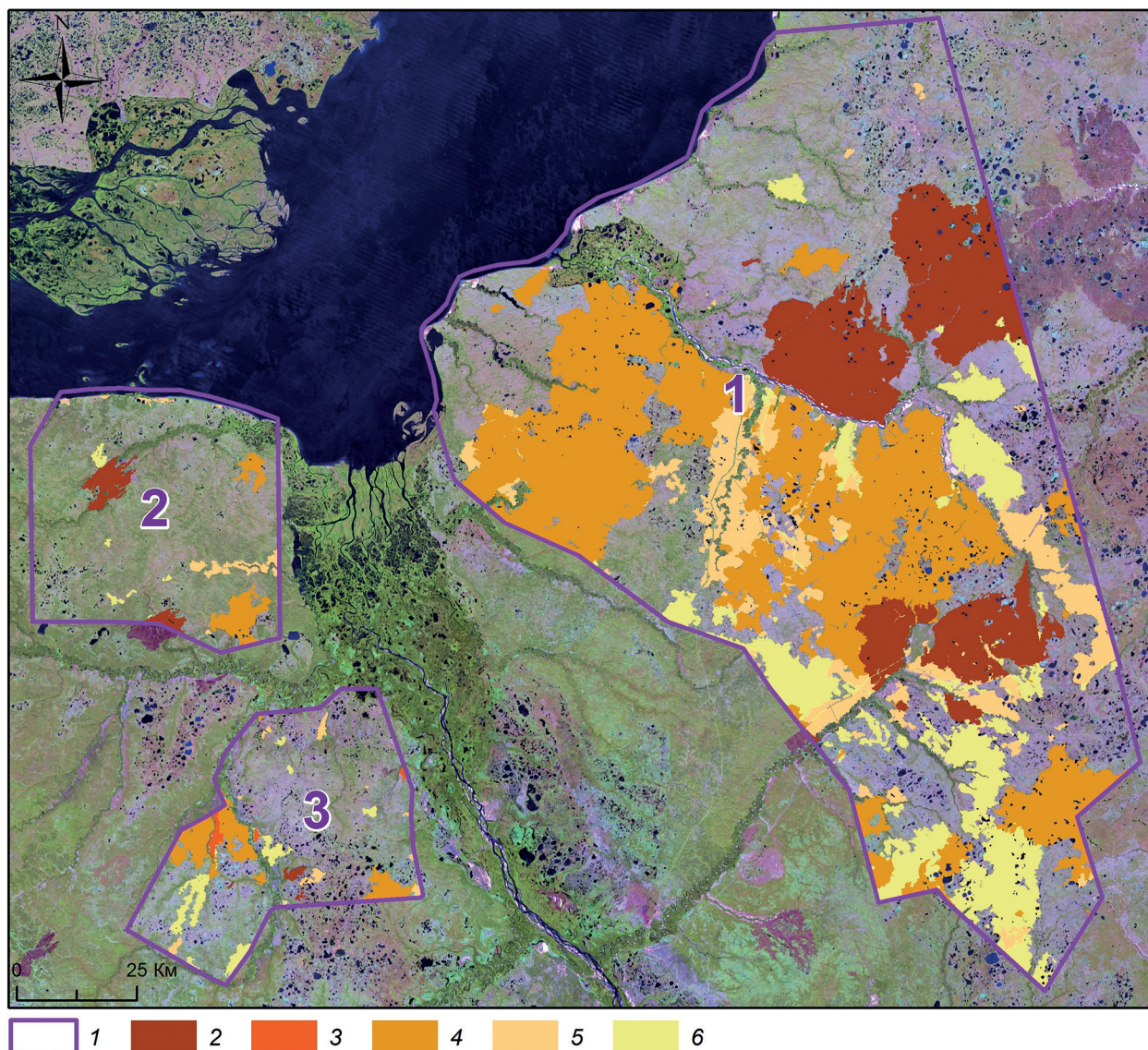


Рис. 2. Динамика площади сгоревших территорий в пределах рассматриваемых участков по данным спутников Corona/КН-4b и Landsat-1/4/5/7/8: 1 — границы ключевых участков; 2 — маска гарей 2017–2018 гг.; 3 — маска гарей 2002–2016 гг.; 4 — маска гарей 1989–2001 гг.; 5 — маска гарей 1969–1988 гг.; 6 — маска гарей до 1968 г.; подложка — Landsat-8, 2018 г.

Можно отметить явную асимметрию: удельная площадь гарей на участке 1 существенно выше доли на участках 2 и 3. При отсутствии природных различий наиболее вероятным объяснением такой особенности является разная степень антропогенной нагрузки. Так, в пределах участков 2 и 3 до недавнего времени отсутствовали объекты нефтегазовой инфраструктуры, в то время как на участке 1 с 1967 г. начались геологоразведочные работы, а с 1971 г. — строительство инфраструктуры на Медвеьем газовом месторождении (запущено в эксплуатацию в 1977 г.). Кроме того, в середине 1970-х гг. по ключевому участку 1 были проложены газопроводы с Ямбургского месторождения.

Показательным примером является также крупный пожар на территории Ярудейского нефтегазоконденсатного месторождения в 2017 г. (участок 2). С 1968 по 2016 г. здесь не отмечается ни одного участка со следами возгораний, за исключением старых, заросших лесом гарей вдоль р. Шуги. Месторождение было открыто в 2008 г. и введено в эксплуатацию в конце 2015 г. Уже в июле 2017 г. в пределах месторождения происходит масштабное возгорание. Его очаг достоверно устанавливается по данным FIRMS: съёмка с сенсоров MODIS

(англ. Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer) и VIIRS (англ. Visible/Infrared Imaging Radiometer Suite) одинаково фиксирует первые тепловые аномалии утром 22 июля в долине р. Шуги к юго-западу от месторождения, выше по течению (рис. 3).

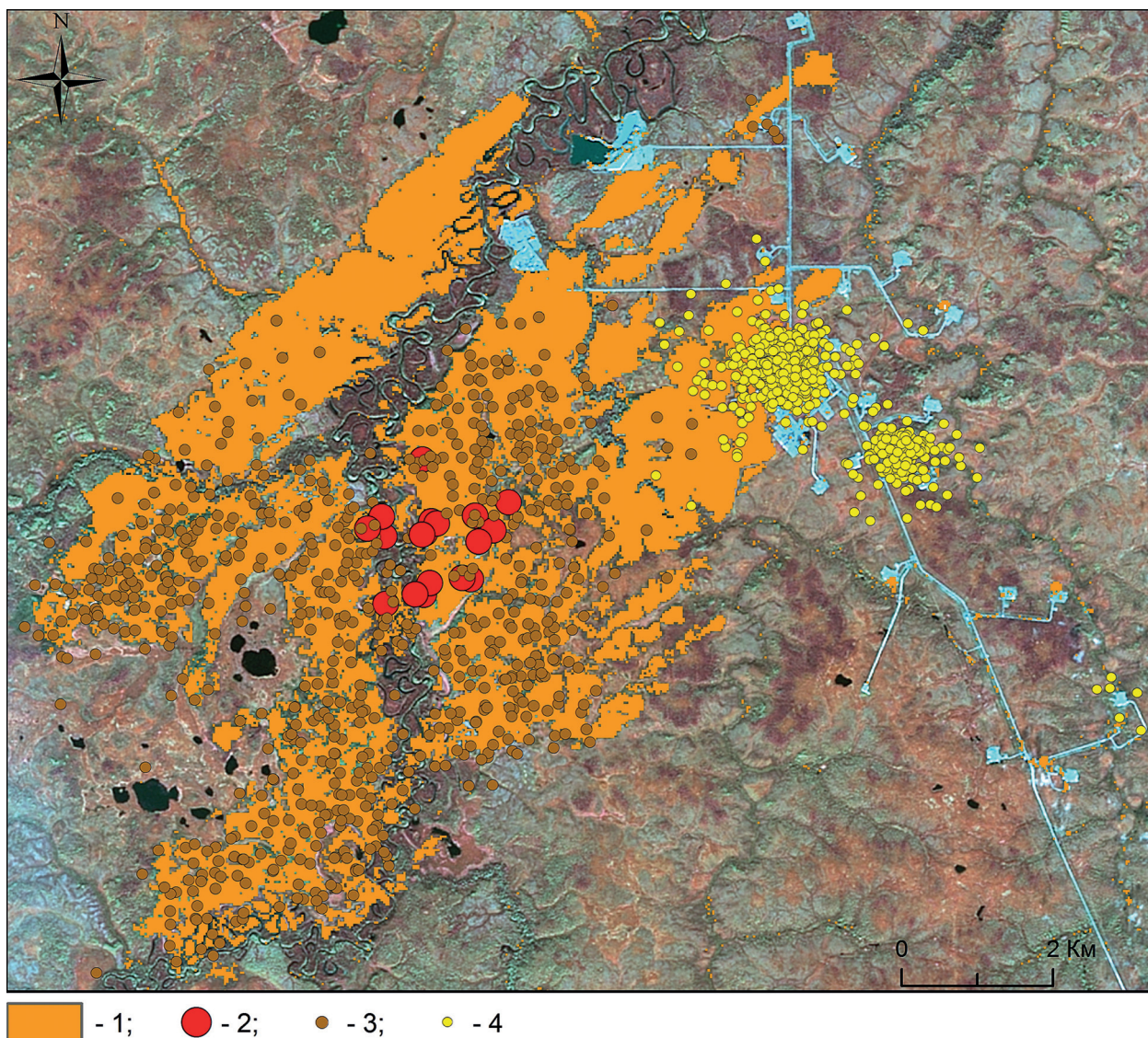


Рис. 3. Последствия природного пожара (1) на территории Ярудейского месторождения; очаг возгорания показан красными точками (2), термоаномалии — коричневыми (3), постоянные факелы сжигания ПНГ — жёлтыми точками (4); источник данных — Landsat-8 (дата съёмки 29.09.2018), тепловые аномалии FIRMS (на основе MODIS, VIIRS)

Учитывая, что пожар начался утром в выходной день (в субботу), вполне вероятно антропогенная причина возникновения очага. Поскольку одним из основных видов отдыха для вахтовых работников и местных жителей является рыбалка, по всей видимости, в районе очага в момент возгорания находилась группа рыбаков. В результате от пожара пострадала значительная территория (площадью около 220 км²), в том числе участки в непосредственной близости от цеха подготовки и перекачки нефти.

Детальная статистика площади гарей по ключевым участкам показывает, что большую её часть составляют моновозрастные гары (80,5 %), общая доля повторных возгораний — 19,5 % (участки с трёх- и четырёхкратной повторяемостью — 2,8 %). Периодически возникают крупные пожары. Так, с 2016 по 2018 г. доля вновь образованных гарей составила порядка 22,8 % (рис. 4).

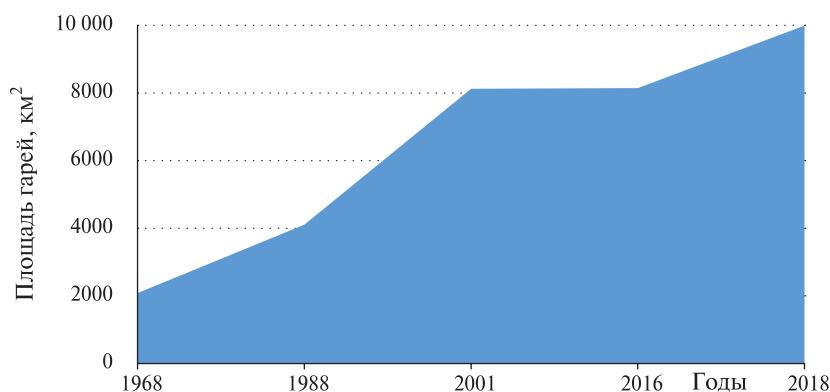


Рис. 4. Прирост площади гарей с 1968 по 2018 г. (с учётом повторных возгораний)

Примечательно, что по состоянию на 1968 г. доля разновозрастных гарей составляла только 25,7 %, т. е. основная часть природных пожаров произошла на современном этапе интенсивного хозяйственного освоения на фоне явных климатических изменений.

Постпирогенная динамика растительности

Для оценки среднего объёма фитомассы на участках разновременных гарей и фоновых участках южной тундры и лесотундры на основе снимка Landsat-8 за 3 июля 2019 г. был рассчитан индекс NDVI. В выборку попали участки с тундровой растительностью (в том числе для гарей) площадью 4539 км² в пределах северной половины ключевого участка 1 (29 % его общей площади). На графике (рис. 5) прослеживается стабильное превышение по сравнению с фоновыми условиями запасов фитомассы для всех гарей, за исключением самых свежих (2018). По всей видимости, это связано с активным первичным восстановлением кустарников и подроста берёзы на сгоревших участках. Высокая плотность кустарников и уничтожение лишайникового покрова с низким запасом фитомассы в итоге дают более высокие значения NDVI. При этом для самых ранних гарей (1968) характерны самые высокие показатели NDVI, что свидетельствует о длительном сохранении условий доминирования лиственной растительности на месте сгоревшей мохово-лишайниковой тундры и лесотундры.

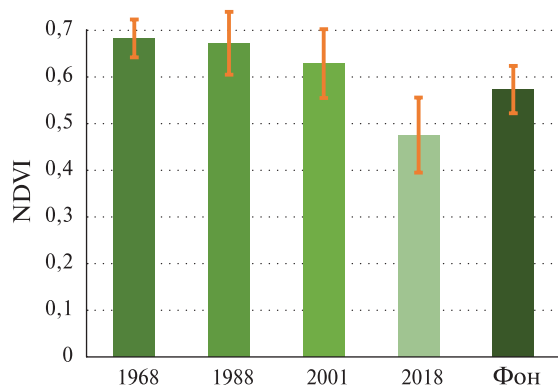


Рис. 5. Средние показатели NDVI на участках разновозрастных гарей и фоновых участках тундры и лесотундры (на основе данных Landsat-8 за 03.07. 2019)

Применение разновременных снимков с высоким разрешением позволяет детализировать происходящие изменения растительного покрова после теплового воздействия пожара. В результате визуального анализа были выявлены несколько эталонов (1–8 в геопортале NC50), которые отражают типичные ситуации сукцессионных смен на участках однократно-

го горения (случаи двух- и трёхкратных возгораний в силу усложнения восстановительных физико-химических процессов требуют более детального рассмотрения). В качестве примера можно привести эталон 1 (рис. 6). По состоянию на 1968 г. здесь хорошо выделяется участок сгоревшей тундры. К 2016 г. сформировался лесной покров, в то время как на соседних фоновых участках тундра осталась без изменений.

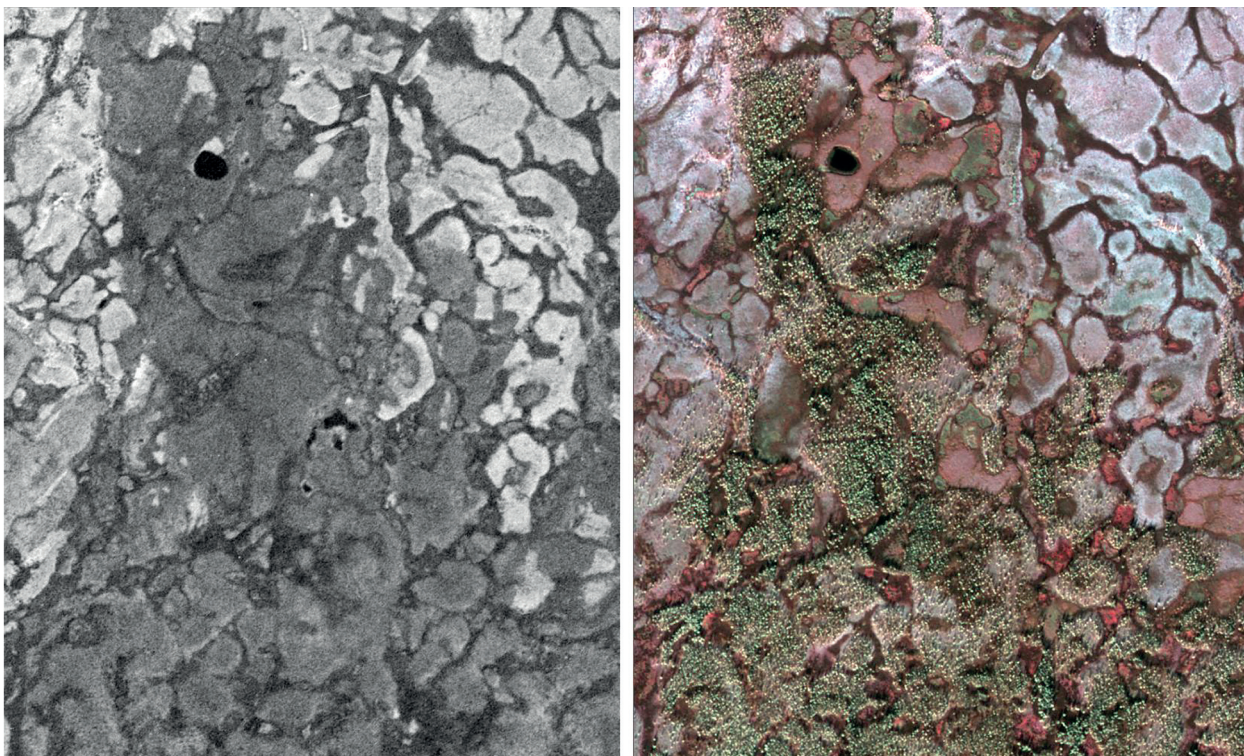


Рис. 6. Зарастание участков природных пожаров, эталон 1 в геопортале NC50: слева — Corona/КН-4b, 21.08.1968; справа — «Ресурс-П», 28.09.2016

В фоновых условиях на выровненных водораздельных тундровых участках при отсутствии каких-либо воздействий, кроме естественных колебаний температуры и влажности, признаков появления лесной растительности не обнаруживается (эталон 9 и 10 в геопортале NC50). На низинных участках со следами древнего морозобойного растрескивания отмечается незначительное увеличение плотности лесных насаждений, но масштабного зарастания, которое можно было ожидать на месте протаявших и заполненных грунтом трещин, за рассматриваемый период не происходит (эталон 11 в геопортале NC50).

Залесение в фоновых условиях отмечается на склонах долин небольших рек, впадающих в Обскую губу (эталон 12–16 в геопортале NC50), а также по берегам озёр в прибрежной зоне отепляющего воздействия губы (эталон 17). В ряде случаев на склонах долин наблюдается формирование трещин и блоков, такие участки дробления также активно осваиваются древесной растительностью (эталон 18 в геопортале NC50). Кроме того, залесение наблюдается и на сухих песчаных речных террасах, где преобладают сосново-лишайниковые редколесья, а многолетняя мерзлота отсутствует. Здесь прослеживается тенденция к увеличению плотности редкостойных сосняков и активному зарастанию суффозионных западин и котловин выдувания (эталон 19 в геопортале NC50).

На участках антропогенных нарушений почвенно-растительного покрова со временем при достаточном увлажнении наблюдается активный рост берёзы с формированием сплошного лесного полога. В дальнейшем происходит сукцессионная смена берёзы хвойными породами (ель, сосна, кедр в зависимости от локальных условий). Данная тенденция хорошо

выражена на примере площадок бывших станций и разъездов железной дороги Чум – Коротчаево (участок № 501 Трансполярной магистрали), строительство и обслуживание которой полностью прекратилось к 1955 г. (эталон 20 в геопортале NC50).

Для статистической оценки произошедших изменений растительности на тундровых гарях 1968 г. (участки без повторных возгораний) и фоновой тундры на сухих водоразделах (участки без пожаров, заболачивания и наклонных долин водотоков) были созданы соответствующие маски, в пределах которых автоматически расставлены проверочные эталоны, представляющие собой окружности радиусом 50 м.

Эталоны выбирались на участках с углами наклона менее 5° (расчёт углов проводился на основе ЦМР ArcticDEM) равномерно через каждые 2 км в пределах маски гарей (157 эталонов) и через каждые 5 км в пределах маски сухой тундры (231 эталон). Поскольку лесная растительность хорошо дешифрируется на снимках с высоким разрешением, оценка изменений проводилась визуальным сравнением мозаик Corona/КН-4b (1968) и Spot-6/7 (Яндекс. Карты, 2016–2017 гг.) с выделением одной из трёх категорий: «густой лес», «редколесье», «без изменений». При подсчёте учитывалась также принадлежность эталонов к природной зоне. Примеры эталонов показаны на *рис. 7*, оценить их расположение можно в геопортале NC50 (левое поле карты).

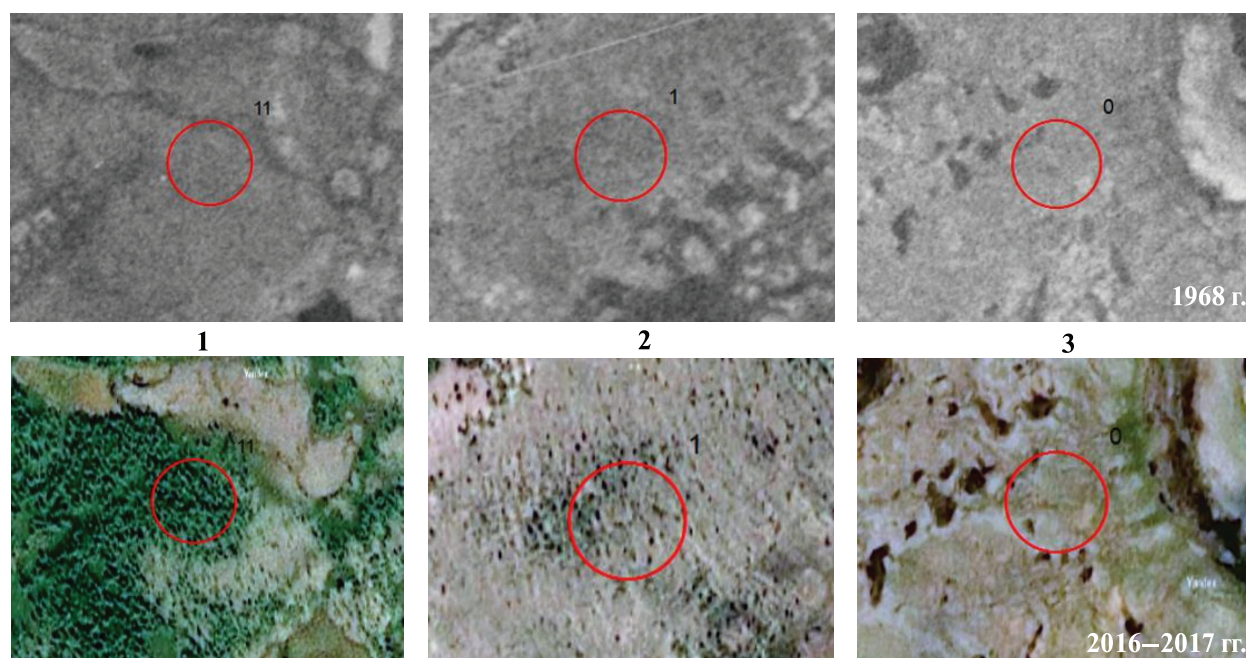


Рис. 7. Примеры проверочных эталонов (показаны красным); категории изменений: 1 — густой лес, 2 — редколесье, 3 — без изменений

Результаты сравнения показывают следующее:

- в фоновых условиях изменений тундровой растительности практически не наблюдается (*рис. 8а*), в отдельных случаях фиксируется появление редколесий, доля которых в лесотундре и северной тайге (15–17 %) выше, чем в зоне южной тундры (6 %);
- в пределах тундровых гарей, образовавшихся не позднее 1968 г., значительные изменения выявлены в переходных условиях лесотундры: в 29 % случаях на месте сгоревшей тундры появились редколесья, а в 56 % случаях — густые леса (*рис. 8б*), при этом на всех эталонах наблюдается успешное самовосстановление растительности, признаков развития дефляции и появления песчаных обнажений, распространённых в рассматриваемом районе, не выявлено;
- мёрзлые обводнённые торфяники северной тайги в меньшей степени подвержены влиянию пожаров: в 60 % случаев наблюдается восстановление тундровой растительности

ности (см. рис. 8б), тем не менее для 27 и 12 % случаев наблюдается развитие редколесий и густых лесов соответственно;

- гари в южной тундре наименее подвержены изменениям: в 5 из 6 случаев здесь наблюдается восстановление исходной тундры, хотя объём выборки ограничен (см. рис. 8б).

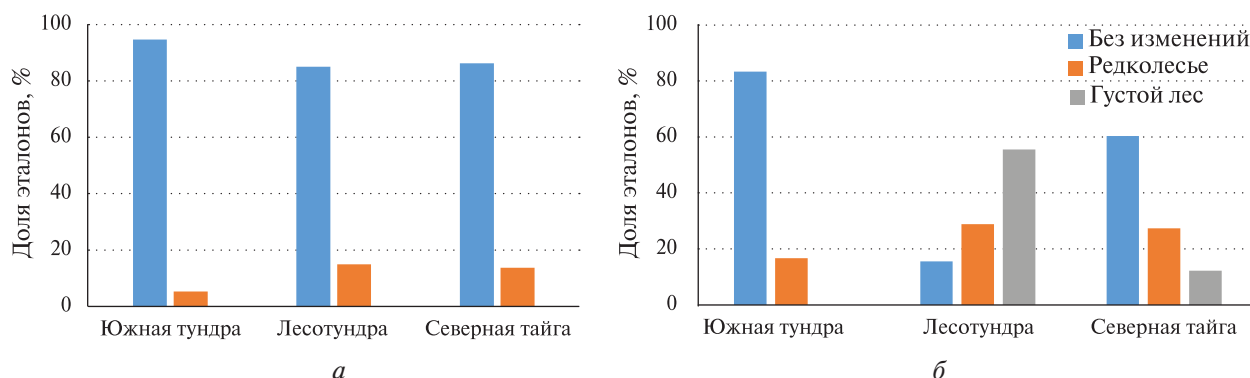


Рис. 8. Статистика изменений растительности на проверочных эталонах: а — фоновые тундровые участки; б — гари, образовавшиеся не позднее 1968 г.

Обсуждение результатов

Частота возникновения природных пожаров и интенсивность постпирогенного восстановления растительности во многом определяются климатическими условиями. Так, для территории Аляски за 30-летний период наблюдений установлено, что наиболее вероятным порогом возникновения пожара становится средняя температура в июле выше $13,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Young et al., 2017). Результаты глобального анализа температуры поверхности (англ. Land Surface Temperature — LST) на основе данных ДЗЗ низкого разрешения (сенсор MODIS) за 2003–2016 гг. показали, что в высоких широтах Северного полушария ($90\text{--}66,5^{\circ}$ с.ш.) наблюдается постепенный устойчивый рост значений LST в среднем на $0,08\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. (Sobrino et al., 2020). Этот тренд подтверждают метеонаблюдения на станциях Надым и Ныда (рис. 9, см. с. 148).

Среднегодовой рост температуры на станции Надым составляет $0,047\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$, на станции Ныда — $0,024\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{год}$. При этом на графиках хорошо видно, что основной прирост значений происходит в весенние и летние месяцы.

Постепенный рост среднегодовой температуры сопровождается устойчивым трендом повышения «зелёности» (англ. greenness) тундровых ландшафтов. Анализ данных низкого разрешения AVHRR (англ. Advanced Very-High-Resolution Radiometer) и MODIS за 1982–2016 гг. показал, что максимальные значения NDVI в арктической зоне северного полушария выросли с 0,57 до 0,65 (Epstein et al., 2018). Однако, как показали результаты проведённого исследования, в естественных условиях тундровые экосистемы сохраняют устойчивость и структура их растительного покрова за последние 50 лет практически не меняется. В этом отношении одним из основных механических факторов, активизирующих процесс распространения в тундре кустарников и редколесий, являются природные пожары.

Пожары в тундре возникают в результате формирования в летний период локальных условий повышенной температуры и низкой влажности даже в течение относительно непродолжительного времени (2–3 недели и более) (York et al., 2018). Пожары нередко характеризуются высокой скоростью распространения и интенсивностью горения. Например, на Аляске половина гарей за 2002–2010 гг. образовалась суммарно всего за 36 дней горения (Barrett et al., 2016). На примере рассматриваемой территории хорошо видно, что увеличению площади гарей способствует одновременное появление многочисленных очагов, которые по мере расширения объединяются, охватывая значительные территории. Причиной возникновения пламени зачастую являются молнии (Veraverbeke et al., 2017), однако в последнее время

существенный вклад вносит антропогенное воздействие (Partain et al., 2016). Особенно это актуально для территории севера Западной Сибири, где в настоящее время именно в арктическом регионе наблюдается активное освоение новых месторождений, а также строительство и модернизация транспортной инфраструктуры.

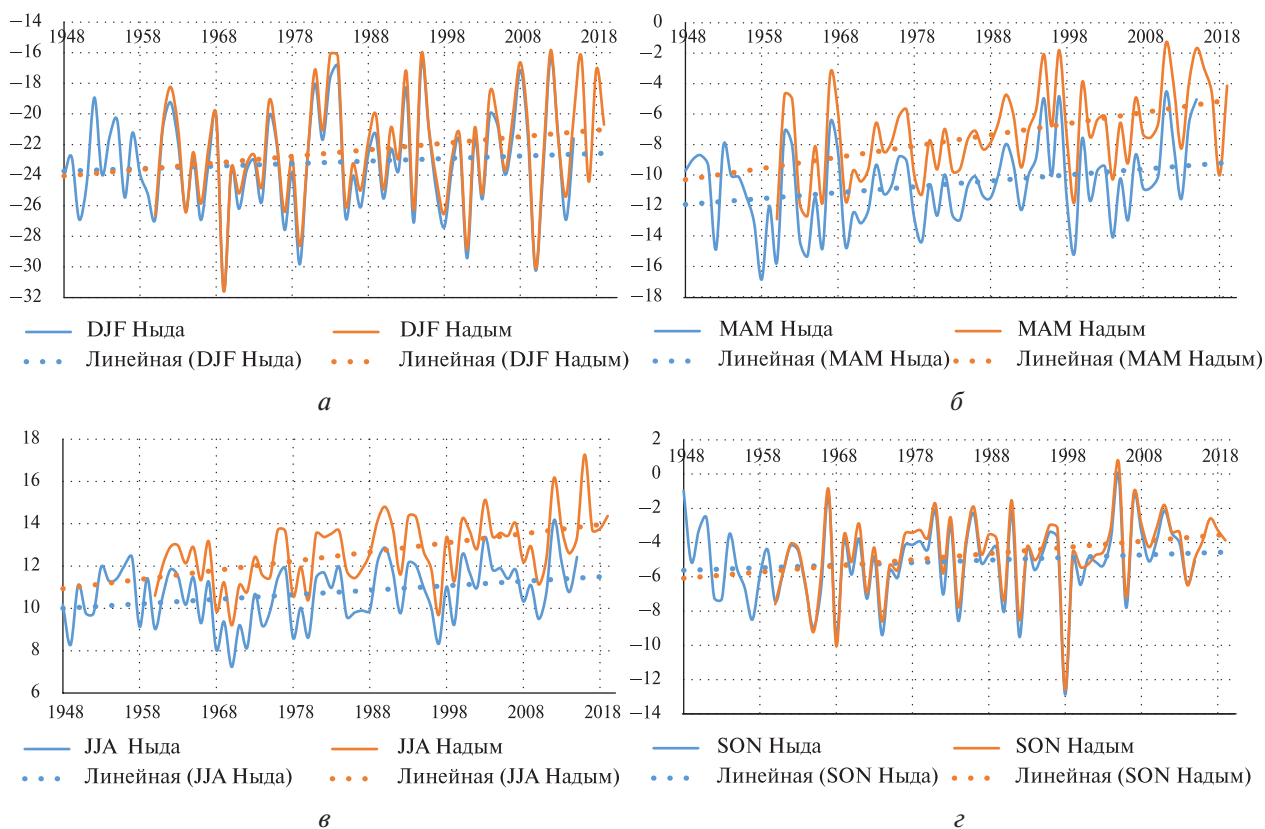


Рис. 9. Изменение средних температур воздуха на метеостанциях Надым и Ныда: а — зима, б — весна, в — лето, г — осень (составлено по данным работы (Jones et al., 2012))



Рис. 10. Точки полевых наблюдений: слева — фоновый участок тундры № 1; справа — участок гарей 1968 и 1988 гг. на участке тундровой растительности № 3 (снимок 2019 г.)

Вопросом, требующим дополнительного детального изучения, стал процесс формирования устойчивых благоприятных экологических условий для закрепления древесной растительности. Исследования пирогенных сукцессий в Якутии (Gabysheva, Isaev, 2015) показывают, что основным лимитирующим фактором для развития лесных пород является мощность

сезонно-талого слоя (СТС). В случае понижения в результате теплового воздействия кровли ММП формируется деятельный почвенный слой, в котором закрепляется корневая система. Прогреванию почвы способствует также изменение отражающей способности поверхности.

В ходе рекогносцировочных полевых работ в августе 2019 г. удалось провести геоботанические описания с измерениями уровня СТС и температуры грунта на глубине 20 см на трёх точках в пределах ключевого участка 1 (табл. 2, рис. 10, см. с. 148). Наблюдения показали, что в пределах фонового участка, который представляет собой анклав тундровой растительности вблизи южной границы зоны лесотундры, мощность СТС составляет в среднем около 38 см с незначительными вариациями, в то время как на участке пожаров 1968 и 1988 гг. талый слой достигает 170 см (в среднем 119 см). На участке гари 1988 г. мощность СТС также увеличена и составляет в среднем 102 см (интервал измерений — 70–130 см). В 2020 г. планируется проведение более детальных измерений на различных участках разновозрастных гарей от пос. Заполярный до пос. Пангоды.

Таблица 2. Результаты рекогносцировочных полевых работ 2019 г. на гарях в пределах ключевого участка 1

| Участок (координаты) | Тип растительности | Мощность СТС, см: средняя/максимальная/минимальная (количество измерений) | Температура на глубине 20 см, °С: средняя/максимальная/минимальная (количество измерений) |
|---|--|---|---|
| № 1. Фоновая тундра (65° 50' 59,49" с. ш., 74° 23' 03,91" з. д.) | Кустарничково-зеленомошная тундра | 38,3/38/40 (3) | 5,7/—/— (1) |
| № 2. Гарь 1988 г. в редколесье (65° 56' 18,27" с. ш., 74° 38' 59,00" з. д.) | Кедрово-лиственничный кустарничково-зеленомошный лес | 102/70/130 (5) | 9/8,2/9,3 (5) |
| № 3. Гарь 1968 и 1988 гг. в тундре (65° 50' 51,14" с. ш., 74° 24' 58,39" з. д.) | Кедрово-лиственничный кустарничково-зеленомошный лес | 119/90/170 (10) | 12,4/11,8/13,1 (5) |

Во многих случаях, описанных в литературе, на территории Якутии и Аляски отмечается постепенное восстановление уровня ММП и исходных тундровых сообществ на участках гарей. Это также видно и по результатам проведённого исследования на примере эталонов в южной тундре. Однако известны также и примеры роста биомассы и формирования устойчивых кустарников и лесов в тундре после пожаров (Hewitt et al., 2016; Landhausser, Wein, 1993). В данной работе явно прослеживается тенденция к замещению тундровой растительности лесными формациями в лесотундровой зоне.

В ходе дальнейших исследований предполагается установить климатические пределы, препятствующие вторичному формированию мерзлоты в верхнем слое почвы. Кроме того, необходим сбор более подробных полевых данных по геоботаническим и мерзлотным условиям на участках разновозрастных тундровых гарей.

Выводы

Проведённое исследование позволяет сделать следующие выводы:

1. Тундровые растительные сообщества на севере Западной Сибири при отсутствии внешних механических воздействий характеризуются высокой устойчивостью, несмотря на наблюдаемые климатические изменения. Ограниченные площади естественного залесения фиксируются на дренируемых участках террас и склонов речных долин.
2. Основными факторами возможного замещения тундровых формаций производными сообществами являются природные пожары и прямое антропогенное воздействие.

При этом прослеживается явная закономерность увеличения частоты и площади возгораний в районах активной хозяйственной деятельности. За 50-летний период наблюдений гари охватили более 60 % площади рассматриваемых ключевых участков (без учёта площади повторных возгораний) с активно разрабатываемыми Медвежьим и Ярудейским месторождениями углеводородов.

3. В ходе детального сравнения 157 проверочных эталонов установлено, что во всех случаях на участках тундровых гарей наблюдается естественное восстановление растительного покрова, притом наиболее значительные изменения выявлены в переходных условиях лесотундры, где в 56 % случаях на месте мохово-лишайниковой тундры формируются густые елово-лиственничные леса, а в 29 % случаях — редколесья.
4. Основным лимитирующим фактором для развития лесных пород в криолитозоне, по всей видимости, является мощность СТС. В ходе рекогносцировочных наблюдений установлено, что глубина протаивания на участках гарей (102–119 см) почти в три раза больше, чем на фоновом участке южной тундры (38 см). Для подтверждения данной закономерности требуются дальнейшие детальные полевые исследования.

В целом на фоне изменений климата и хозяйственного освоения Арктики роль природных пожаров в тундре как одного из факторов ландшафтной дифференциации будет постепенно возрастать. Современные возможности средств ДЗЗ позволяют сформировать объективную систему долговременного пожарного мониторинга и оценки постпирогенных изменений растительности в целях предотвращения негативных экологических процессов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований и Ямало-Ненецкого автономного округа в рамках научного проекта № 19-45-890008. При подготовке статьи использовались материалы исследований по гранту Российского научного фонда № 18-17-00178.

Литература

1. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа. М.: ГУГК, 2004. 304 с.
2. *Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А., Уваров И. А.* Оценка площадей повреждений наземных экосистем Северной Евразии пожарами в 2000–2003 годах по спутниковым данным инструмента SPOT-Vegetation // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 354–366.
3. *Ильина И. С., Лапшина Е. И., Лавренко Н. Н.* Растительный покров Западно-Сибирской равнины. Новосибирск: Наука, 1985. 248 с.
4. *Лупян Е. А., Барталев С. А., Балашов И. В., Егоров В. А., Ершов Д. В., Кобец Д. А., Сенько К. С., Стыщенко Ф. В., Сычугов И. Г.* Спутниковый мониторинг лесных пожаров в 21 веке на территории Российской Федерации (цифры и факты по данным детектирования активного горения) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 158–175.
5. *Московченко Д. В., Московченко М. Д.* Оценка современной динамики ландшафтов Заполярного месторождения с использованием спутниковых данных // Вестн. Тюменского гос. ун-та. Экология и природопользование. 2018. Т. 4. № 2. С. 6–16.
6. *Barrett K., Loboda T., McGuire A. D., Genet H., Hoy E., Kasischke E.* Static and dynamic controls on fire activity at moderate spatial and temporal scales in the Alaskan boreal forest // Ecosphere. 2016. V. 7. No. 11. P. 1–21.
7. *Epstein H., Bhatt U., Raynolds M., Walker D., Pinzon J., Tucker C. J., Forbes B. C., Horstkotte T., Macias-Fauria M., Martin A., Phoenix G., Bjerke J., Tømmervik H., Fauchald P., Vickers H., Myneni R., Park T., Dickerson C.* Tundra greenness // Bull. American Meteorological Society. 2018. V. 99. No. 8. P. 165–169.
8. *Gabyshva L. P., Isaev A. P.* Forest fires impact on microclimatic and soil conditions in the forests of cryolithic zone (Yakutia, North-Eastern Russia) // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Siberian Journal of Forest Science). 2015. No. 6. P. 96–111.
9. *Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G.* High-

- Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change // *Science*. 2013. V. 342. No. 6160. P. 850–853.
10. Hewitt R. E., Hollingsworth T. N., Chapin F. S., Taylor D. L. Fire-severity effects on plant-fungal interactions after a novel tundra wildfire disturbance: implications for arctic shrub and tree migration // *BMC ecology*. 2016. V. 16. P. 1–11.
 11. Jones P. D., Lister D. H., Osborn T. J., Harpham C., Salmon M., Morice C. P. Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010 // *J. Geophysical Research: Atmospheres*. 2012. V. 117. No. D5. P. 1–29.
 12. Landhauser S. M., Wein R. W. Postfire Vegetation Recovery and Tree Establishment at the Arctic Treeline: Climate-Change-Vegetation-Response Hypotheses // *J. Ecology*. 1993. V. 81. No. 4. P. 665–672.
 13. Nitzé I., Grosse G., Jones B. M., Romanovsky V. E., Boike J. Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic // *Nature Communications*. 2018. V. 9. No. 1. P. 1–11.
 14. Partain J. L., Alden S., Bhatt U. S., Bieniek P. A., Brettschneider B. R., Lader R. T., Olsson P. Q., Rupp T. S., Strader H., Thoman R. L., Walsh J. E., York A. D., Ziel R. H. An Assessment of the Role of Anthropogenic Climate Change in the Alaska Fire Season of 2015 // *Bull. American Meteorological Society*. 2016. V. 97. No. 12. P. 14–18.
 15. Reynolds M. K., Walker D. A., Ambrosius K. J., Brown J., Everett K. R., Kanevskiy M., Kofinas G. P., Romanovsky V. E., Shur Y., Webber P. J. Cumulative geocological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska // *Global Change Biology*. 2014. V. 20. No. 4. P. 1211–1224.
 16. Rocha A. V., Loranty M. M., Higuera P. E., Mack M. C., Hu F. S., Jones B. M., Breen A. L., Rastetter E. B., Goetz S. J., Shaver G. R. The footprint of Alaskan tundra fires during the past half-century: implications for surface properties and radiative forcing // *Environmental Research Letters*. 2012. V. 7. No. 4. P. 1–8.
 17. Ruffner K. C. *Corona: America's First Satellite Program*. N. Y.: Morgan James Publishing, 2005. 364 p.
 18. Shimada M., Itoh T., Motooka T., Watanabe M., Tomohiro S., Thapa R., Lucas R. New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010) // *Remote Sensing of Environment*. 2014. V. 155. P. 13–31.
 19. Sobrino J. A., Julien Y., García-Monteiro S. Surface Temperature of the Planet Earth from Satellite Data // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. No. 2. P. 1–10.
 20. Veraverbeke S., Rogers B. M., Goulden M. L., Jandt R. R., Miller C. E., Wiggins E. B., Randerson J. T. Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests // *Nature Climate Change*. 2017. V. 7. No. 7. P. 529–534.
 21. York A., Bhat U., Thoman R., Ziel R. Wildland fire in boreal and Arctic North America // *Bull. American Meteorological Society*. 2018. V. 99. No. 8. P. 167–169.
 22. Young A. M., Higuera P. E., Duffy P. A., Hu F. S. Climatic thresholds shape northern high-latitude fire regimes and imply vulnerability to future climate change // *Ecography*. 2017. V. 40. P. 606–617.
 23. Yu Q., Epstein H. E., Engstrom R., Shiklomanov N., Streletskiy D. Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions // *Environmental Research Letters*. 2015. V. 10. No. 12. P. 1–13.

Assessment of the post-pyrogenic dynamics of tundra vegetation in the northern part of Western Siberia over the past 50 years (1968–2018) based on detailed and high resolution remote sensing data

O. S. Sizov^{1,2}, P. R. Tsymbarovich³, E. V. Ezhova⁴, A. V. Soromotin⁵, N. V. Prikhodko⁵

¹ Oil and Gas Research Institute RAS, Moscow 117971, Russia

² National University of Oil and Gas “Gubkin University”, Moscow 119991, Russia

³ Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia

⁴ Institute of Applied Physics RAS, Nizhny Novgorod 603155, Russia

⁵ University of Tyumen, Tyumen 625003, Russia

E-mail: kabanin@yandex.ru

The paper discusses the characteristics of recovery of tundra vegetation in the territories of the northern part of Western Siberia affected by fires. Medium and high spatial resolution satellite images are the main sources for the research. The data cover period of 1968–2018 and include images of Corona/KH-4b, Hexagon/KH-9, Resurs-P No. 1/2, SPOT-6/7, Landsat-1/4/5/7/8 and also ArcticDEM and old topographic maps. The results of comparative analysis show that natural tundra phytocenoses have high stability in the absence of external mechanical influences even in conditions of explicit climate change. Limited areas of natural tundra forests were found on drained parts of terraces and slopes of river valleys under the impact of the Gulf of Ob. On the other hand, significant changes in vegetation are characteristic of the burnt tundra. It was found that during the observations new burnt areas covered more than 60 % of studied test plots (excluding re-ignition areas). Alongside with that, frequency and intensity of fires increase synchronously with the level of anthropogenic activity (oil and gas production). The paper shows this tendency by the example of Yarudeyskoye field. The result of comparison of time series of high-resolution satellite images for the 157 reference samples shows that the vegetation actively recovered after fire in all cases. The most dramatic changes of vegetation were found in transitional conditions of forest tundra where in 56 % of cases dense spruce-larch forests and in 29% of cases sparse forests replaced moss-lichen areas. The depth of the active layer may probably be a limiting factor in the forest development in the permafrost regions. Reconnaissance observations in the area of Pangoda in August 2019 showed explicit differences in thawing depth in the burnt areas of 1968 and 1988 (102–119 cm) from the background conditions of the southern tundra (38 cm). Further detailed field studies are planned to confirm this pattern.

Keywords: tundra, vegetation, Western Siberia, fires, recovery, remote sensing, geoportal

Accepted: 16.06.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-137-153

References

1. *Atlas Yamalo-Nenetskogo avtonomnogo okruga* (Atlas of the Yamal-Nenets Autonomous Okrug), Moscow: GUGK, 2004, 248 p.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Uvarov I.A., Otsenka ploshchadei povrezhdenii nazemnykh ekosistem Severnoi Evrazii pozharami v 2000–2003 godakh po sputnikovym dannym instrumenta SPOT-Vegetation (Evaluation of areas of fire damages of terrestrial ecosystems of Northern Eurasia in 2000–2003 with satellite data of the SPOT-Vegetation tool), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 2, pp. 354–366.
3. Il'ina I. S., Lapshina E. I., Lavrenko N. N., *Rastitel'nyi pokrov Zapadno-Sibirskoi ravniny* (Vegetation of the West Siberian Plain), Novosibirsk: Nauka, 1985, 248 p.
4. Loupian E.A., Bartalev S.A., Balashov I.V., Egorov V.A., Ershov D.V., Kobets D.A., Senko K.S., Stytsenko F.V., Sychugov I.G., Sputnikovyi monitoring lesnykh pozharov v 21 veke na territorii Rossiiskoi Federatsii (tsifry i fakty po dannym detektirovaniya aktivnogo goreniya) (Satellite monitoring of forest fires in the 21st century in the territory of the Russian Federation (facts and figures based on active fires detection)), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 158–175.

5. Moskovchenko D. V., Moskovchenko M. D., Otsenka sovremennoi dinamiki landshaftov Zapolyarnogo mestorozhdeniya s ispol'zovaniem sputnikovyykh dannykh (Assessment of modern landscape dynamics of the Zapolyarnoe gas field using satellite data), *Vestnik Tumenskogo gosudarstvennogo universiteta. Ekologiya i prirodopol'zovanie*, 2018, Vol. 4, No. 2, pp. 6–16.
6. Barret K., Loboda T., McGuire A. D., Genet H., Hoy E., Kasischke E., Static and dynamic controls on fire activity at moderate spatial and temporal scales in the Alaskan boreal forest, *Ecosphere*, 2016, Vol. 7, No. 11, pp. 1–21.
7. Epstein H., Bhatt U., Reynolds M., Walker D., Pinzon J., Tucker C. J., Forbes B. C., Horstkotte T., Macias-Fauria M., Martin A., Phoenix G., Bjerke J., Tømmervik H., Fauchald P., Vickers H., Myneni R., Park T., Dickerson C., Tundra greenness, *Bull. American Meteorological Society*, 2018, Vol. 99, No. 8, pp. 165–169.
8. Gabysheva L. P., Isaev A. P., Forest fires impact on microclimatic and soil conditions in the forests of cryolithic zone (Yakutia, North-Eastern Russia), *Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Siberian Journal of Forest Science)*, 2015, No. 6, pp. 96–111.
9. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Loveland T. R., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G., High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change, *Science*, 2013, Vol. 342, No. 6160, pp. 850–853.
10. Hewitt R. E., Hollingsworth T. N., Chapin F. S., Taylor D. L., Fire-severity effects on plant–fungal interactions after a novel tundra wildfire disturbance: implications for arctic shrub and tree migration, *BMC ecology*, 2016, Vol. 16, pp. 1–25.
11. Jones P. D., Lister D. H., Osborn T. J., Harpham C., Salmon M., Morice C. P., Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010, *J. Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, Vol. 117, No. D5, pp. 1–29.
12. Landhausser S. M., Wein R. W., Postfire Vegetation Recovery and Tree Establishment at the Arctic Treeline: Climate-Change-Vegetation-Response Hypotheses, *J. Ecology*, 1993, Vol. 81, No. 4, pp. 665–672.
13. Nitze I., Grosse G., Jones B. M., Romanovsky V. E., Boike J., Remote sensing quantifies widespread abundance of permafrost region disturbances across the Arctic and Subarctic, *Nature Communications*, 2018, Vol. 9, No. 1, pp. 1–11.
14. Partain J. L., Alden S., Bhatt U. S., Bieniek P. A., Brettschneider B. R., Lader R. T., Olsson P. Q., Rupp T. S., Strader H., Thoman R. L., Walsh J. E., York A. D., Ziel R. H., An Assessment of the Role of Anthropogenic Climate Change in the Alaska Fire Season of 2015, *Bull. American Meteorological Society*, 2016, Vol. 97, No. 12, pp. 14–18.
15. Reynolds M. K., Walker D. A., Ambrosius K. J., Brown J., Everett K. R., Kanevskiy M., Kofinas G. P., Romanovsky V. E., Shur Y., Webber P. J., Cumulative geocological effects of 62 years of infrastructure and climate change in ice-rich permafrost landscapes, Prudhoe Bay Oilfield, Alaska, *Global Change Biology*, 2014, Vol. 20, No. 4, pp. 1211–1224.
16. Rocha A. V., Loranty M. M., Higuera P. E., Mack M. C., Hu F. S., Jones B. M., Breen A. L., Rastetter E. B., Goetz S. J., Shaver G. R., The footprint of Alaskan tundra fires during the past half-century: implications for surface properties and radiative forcing, *Environmental Research Letters*, 2012, Vol. 7, No. 4, pp. 1–8.
17. Ruffner K. C., *Corona: America's First Satellite Program*, New York: Morgan James Publishing, 2005, 364 p.
18. Shimada M., Itoh T., Motooka T., Watanabe M., Tomohiro S., Thapa R., Lucas R., New global forest/non-forest maps from ALOS PALSAR data (2007–2010), *Remote Sensing of Environment*, 2014, Vol. 155, pp. 13–31.
19. Sobrino J. A., Julien Y., García-Monteiro S., Surface Temperature of the Planet Earth from Satellite Data, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 2, pp. 1–10.
20. Veraverbeke S., Rogers B. M., Goulden M. L., Jandt R. R., Miller C. E., Wiggins E. B., Randerson J. T., Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests, *Nature Climate Change*, 2017, Vol. 7, No. 7, pp. 529–534.
21. York A., Bhat U., Thoman R., Ziel R., Wildland fire in boreal and Arctic North America, *Bull. American Meteorological Society*, 2018, Vol. 99, No. 8, pp. 167–169.
22. Young A. M., Higuera P. E., Duffy P. A., Hu F. S., Climatic thresholds shape northern high-latitude fire regimes and imply vulnerability to future climate change, *Ecography*, 2017, Vol. 40, pp. 606–617.
23. Yu Q., Epstein H. E., Engstrom R., Shiklomanov N., Strelestskiy D., Land cover and land use changes in the oil and gas regions of Northwestern Siberia under changing climatic conditions, *Environmental Research Letters*, 2015, Vol. 10, No. 12, pp. 1–13.