


МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
«ТЮМЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
ИНСТИТУТ НАУК О ЗЕМЛЕ
Кафедра геоэкологии и природопользования

РЕКОМЕНДОВАНО К ЗАЩИТЕ В ГЭК
Заведующий кафедрой
доктор биологических наук, доцент
 А.В. Синдирева
3 июля 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
магистерская диссертация

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ НА РАЗНОВОЗРАСТНЫХ
ГАРЯХ В СУБАРКТИКЕ НА ОСНОВЕ МАТЕРИАЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

05.04.06 Экология и природопользование

Магистерская программа «Геоэкология нефтегазодобывающих регионов»

Выполнил работу
студент 2 курса
очной формы обучения



Миляев Иван
Александрович

Руководитель
д.б.н., профессор, директор НИИ
экологии и РИПР ТюмГУ



Соромотин Андрей
Владимирович

Рецензент,
к.г.н., доцент



Идрисов Ильдар
Рустамович

Тюмень
2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ ГАРЕЙ	6
1.1. МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО АНАЛИЗА ГАРЕЙ.....	6
1.2. ПОСЛЕДСТВИЯ ПОЖАРОВ ДЛЯ ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ	14
ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ (ТЕРРИТОРИИ НАДЫМСКОГО И ТАЗОВСКОГО РАЙОНОВ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА)	25
2.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ	25
2.2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И РЕЛЬЕФ	26
2.3. КЛИМАТ.....	28
2.4. ВНУТРЕННИЕ ВОДЫ.....	29
2.5. ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНЫЙ ПОКРОВ	30
2.6. ТЕХНОГЕННАЯ НАГРУЗКА.....	31
ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	32
ГЛАВА 4. ДИНАМИКА ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ	40
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	51
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	53

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

Изучение постпожарных сукцессий в Субарктике важно для оценки воздействия пожаров на субарктические экосистемы и их последующего восстановления в условиях быстрых изменений климата и высокой антропогенной нагрузки, связанной с добычей углеводородов и хозяйственной деятельностью коренных народов Севера. Послепожарное восстановление растительности в зоне лесотундры изучено слабо, хоть оно и сопровождается серьезными изменениями в составе растительного покрова и может продолжаться в течение десятилетий.

Для исследования сукцессий нужны регулярные долгосрочные полевые наблюдения, что требует больших трудовых, временных и материальных ресурсов. Также, это неосуществимо при изучении ранних стадий гарей, появившихся несколько десятков лет назад. Оценка состояния растительности может быть проведена при помощи данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Их использование позволяет получать большие объемы детализированных данных на обширные территории, охватывая длительные периоды времени, которые можно использовать для определения закономерностей и отслеживания динамики восстановления растительности во времени. Однако, при наличии постоянно увеличивающейся в размерах спутниковой информации необходимой становится разработка методов автоматизации обработки данных, способствующих увеличению эффективности работы с массивами космических снимков.

Цель работы – оценка динамики восстановления растительного покрова на разновозрастных гарях в субарктическом поясе Западной Сибири на основе данных дистанционного зондирования Земли.

Задачи:

1. проанализировать современные методы дистанционного анализа гарей и закономерности постпирогенных сукцессий в лесотундре Западной Сибири;
2. дать физико-географическую характеристику району исследования, включающему территории Надымского и Тазовского районов Ямало-Ненецкого автономного округа.
3. определить методику исследования восстановления растительности гарей разного возраста по материалам дистанционного зондирования Земли;
4. оценить динамику восстановления растительности по вегетационным индексам NBR и NDVI на гарях Надымского и Тазовского районов.

Объект исследования – растительный покров, формирующийся на выгоревших участках лесотундры Западной Сибири.

Предмет исследования – многолетняя динамика состояния растительного покрова в ходе постпирогенной сукцессии по данным дистанционного зондирования.

Защищаемые положения:

- 1) Временной интервал восстановления фотосинтезирующей биомассы растительности до фонового уровня для лесотундры Западной Сибири по данным NDVI занимает от 3 до 8 лет.
- 2) Совместное использование вегетационных индексов NDVI и NBR при комплексном изучении постпирогенных сукцессий с оценкой восстановления фотосинтезирующей биомассы и проективного покрытия обеспечивает более объективный результат в сравнении с использованием только одного из этих индексов.

Методы исследования

В работе использовались анализ, синтез, обобщение, индукция, сравнительно-описательный, картографический, геоинформационный, статистический и аэрокосмический методы.

Научная новизна

Впервые нами был получен и проанализирован временной интервал восстановления фотосинтезирующей биомассы растительного покрова в постпирогенный период для лесотундры Западной Сибири. Установлено, что срок восстановления может варьироваться от 3 до 8 лет и, вероятно, зависит от возраста гари. Нами установлено различие в оценках состояния растительности между вегетационными индексами NDVI и NBR. NDVI характеризует количество зеленой биомассы, в то время как NBR более чувствителен к проективному покрытию и имеет свойство к более медленному восстановлению.

Практическая значимость

Примененный в рамках исследования метод можно использовать при изучении динамики и темпов восстановления растительности других субарктических районов России и мира. Алгоритмы позволяют в значительной степени автоматизировать и существенным образом ускорить процесс получения информации о состоянии растительного покрова исследуемой территории.

Апробация результатов

По результатам исследования были опубликованы тезисы в сборнике конференции «Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды» [Миляев, с. 404-408].

Структура и объем диссертации

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка. Текст работы изложен на 57 страницах печатного текста, включая список литературы, содержит 10 рисунков. Библиографический список включает в себя 43 источника.

В первой главе анализируются литературные источники на темы методов дистанционного анализа гарей и последствий пожаров для почв и растительности. Во второй главе дается физико-географическая характеристика района исследования, в которой особое внимание уделено почвенно-растительному покрову. В третьей главе описаны методы исследования. В четвертой оценена многолетняя динамика вегетационных индексов NBR и NDVI на разновозрастных гарях Надымского и Тазовского районов ЯНАО.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЯ ГАРЕЙ

1.1. МЕТОДЫ ДИСТАНЦИОННОГО АНАЛИЗА ГАРЕЙ

Воздействие пожаров является важным фактором развития биосферы и трансформации экосистем суши. Частота и масштабы пожаров в последнее время увеличиваются в северных регионах планеты, что может вызывать потери почвенного углерода, на два порядка превышающие годовой чистый обмен углерода в ненарушенной тундре [Carbon loss from..., p. 489-492]. Вдобавок, вызванное климатом учащение пожаров в тундре может формировать положительную обратную связь, усиливающую потепление и влияющую на чистый баланс углерода в биоме тундры.

В последние десятилетия был достигнут огромный прогресс в использовании данных дистанционного зондирования Земли для количественной оценки состояния ландшафтов и их изменчивости во времени. На данный момент на большие территории сформированы огромные открытые архивы спутниковых изображений, на основе которых рассматривается пространственно-временная динамика многолетней мерзлоты, термокарста, изменений в растительности [Jorgenson, Grosse, p. 324-338]. Применение данных дистанционного зондирования о затронутых огнем территориях оптимально для организации эффективной пожарной охраны и оценки их экологических и экономических последствий в связи с возможностью охвата огромных территорий для исследования, оперативного обнаружения очагов возгорания, точного определения площади пожаров, проведения постоянного мониторинга и прогнозирования их возникновения [Оценка площади пожаров..., с. 9]. Только использование данных дистанционного зондирования Земли позволяет отслеживать изменение состояний природной среды и динамику ландшафтов в больших масштабах [Корниенко, с. 78], что особенно актуально для труднодоступных и дорогих для полевых исследований районов Крайнего Севера. Дистанционные методы позволяют проводить наземные исследования,

при которых требуются полевые выезды, более эффективно и получать достоверные результаты по значительным территориям. Использование методов дистанционного зондирования в сочетании с полевыми и стационарными методами исследований является распространенной практикой [Пространственно-временной анализ..., с. 245–247], [Fire and vegetation..., p. 208–210], [Post-fire vegetation..., p. 8–10], [Long-term effects..., p. 6–7], [Fire-induced changes..., p. 2–4], позволяющей как провести верификацию дешифрирования космических снимков, так и экстраполировать на огромные площади данные, полученные при натурных обследованиях. Дистанционное зондирование – полезный инструмент, помогающий выявить потенциальные горячие точки разнообразия и высокой биологической продуктивности. Для подробного анализа часто применяется комбинация инструментов дистанционного зондирования, цифровых моделей рельефа и подробных наземных исследований, что может использоваться для разработки моделей пригодности среды обитания и распределения видов [Circumpolar Arctic vegetation..., p. 055005].

Первые исследования постпирогенных сукцессий с помощью данных дистанционного зондирования были проведены в Северной Америке в конце 1970-х – начале 1980-х годов. Цифровые данные Landsat и аэрофотосъемка использовались для измерения постпирогенного восстановления тундровой растительности на Аляске [Hall, p. 390–394] и севере Канады [Fuller, Rouse, p. 11–23], что существенно расширило понимание процессов восстановления растительного покрова. В более поздних работах было обнаружено, что на распространение гарей могут существенно влиять рельеф местности и характер растительности до пожаров [Landsat digital analysis..., p. 271]. В России активные исследования постпирогенных сукцессий дистанционными методами начали проводиться в 2000-х годах, как правило, в рамках комплексных геоэкологических изысканий, связанных преимущественно с разработкой нефтегазовых месторождений и их влияния на природные ландшафты [Корниенко, с. 78–87], [Московченко, Московченко, с. 6-16].

Информацию о пожарах в прошлые века могут дать исторические хроники, лесные кадастры, дендрохронологические и палеоэкологические данные, которые можно использовать для реконструкции истории пожаров на изучаемой территории за временной интервал, намного превышающий период, за который доступны спутниковые данные. Данные помогут примерно оценить сроки возникновения пожаров без точной оценки площади и силы пожаров. Для оценки распространения лесных пожаров в прошлом также могут помочь лесоустроительные карты. Точная реконструкция истории пожаров с использованием различных методов может помочь получить информацию о многолетней изменчивости пожарной активности на изучаемой территории, оценить существующую связь между частотой и интенсивностью пожаров, локальной деятельностью человека и региональные климатические условия. Такая информация может быть полезна для лучшего понимания процессов и факторов, ответственных за пространственное распространение природных пожаров в районе исследования [Wildfire Dynamics along..., p. 790]. Однако подобные методы применяются для изучения пожарной обстановки на протяжении геологических эпох, что выходит за допустимые временные рамки нашего исследования и требуют значительных усилий и затрат времени.

Часто определение гарей проводится с использованием данных мультиспектральных снимков среднего и низкого разрешения спутников Landsat [Long-term effects..., p. 6], [Пространственно-временной анализ..., с. 245], [Post-fire vegetation..., p. 7–8], Sentinel и MODIS [The footprint of Alaskan tundra..., p. 3], находящихся в открытом доступе на сайте Геологической службы США, а также снимков высокого и сверхвысокого разрешения спутников SPOT, Ресурс-П [Fire and vegetation..., p. 210] и многих других. Для оценки исходного состояния территорий, которые осваиваются уже более полувека, дополнительно используются снимки программы Corona и миссий Landsat-1, 2, 3 [Fire and vegetation..., p. 208–210].

Тундровая растительность имеет разные спектральные признаки в зависимости от преобладающих видов, а также степени увлажнения.

Значительная часть тундровой зоны заболочена, поэтому существенным фактором, влияющим на свойства растительного покрова, является степень дренирования территории [Тематическое дешифрирование и интерпретация, с. 128].

Пожары значительно влияют на степень увлажнения и состояние растительности, ее отражательную способность. Данное обстоятельство позволяет на основе данных дистанционного зондирования проводить расчет вегетационных индексов для выделения гарей с высокой точностью, применяя чувствительные к здоровью растительности ближний инфракрасный и коротковолновый инфракрасный каналы снимка. Часто используемыми для исследования гарей являются:

1. Индекс выгоревших областей (BAI, Burned Area Index) использует значения отражения в красной и ближней инфракрасной области спектра для определения областей поверхности, подвергшихся воздействию огня.

$$BAI = \frac{1}{((0.1 - RED)^2 + (0.06 - NIR)^2)} \quad (1)$$

где RED – значения пикселей из красного канала, NIR – значения пикселей из ближнего инфракрасного канала [Chuviesco, Martin, Palacios, p. 5103–5110].

2. Нормализованный индекс гарей (NBR, Normalized Burned Ratio) представляет собой количественный показатель, основанный на отражении излучения в ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах для выделения выжженных областей:

$$NBR = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (2)$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, SWIR – отражение в коротковолновой инфракрасной области спектра [Key, Benson, p. 23]. На гарях и горельниках индекс NBR принимает самые низкие значения, что позволяет достаточно точно определить их на спутниковых снимках. Поскольку растительность сильно отражается в ближней инфракрасной области электромагнитного спектра (NIR) из-за свойств хлорофилла и слабо в коротковолновой инфракрасной области (SWIR), а также, учитывая тот факт, что

обгоревшая древесная растительность и грунт имеют сильное отражение в SWIR-диапазоне, то индекс NBR может использоваться и для наблюдения за многолетним восстановлением растительного покрова на гарях [García, Caselles, p. 34-36]. После пожара начинается рост растений, увеличивается проективное покрытие – вследствие этого растет отражение в ближней инфракрасной области и снижается в коротковолновой инфракрасной области спектра, что позволяет отслеживать динамику. При этом может возникнуть ситуация, когда нет возможности достоверно отделить участки со слабым воздействием пожаров от наиболее сухих участков и изменений, связанных с качеством изображений и другими факторами, для чего приходится применять специальные инструменты отсеивания, предусмотренные картографическими программами [Пространственно-временной анализ..., с. 246].

3. Разностный индекс гарей (dNBR, differenced Normalized Burned Ratio) – показатель, равный разнице NBR предыдущего и последующего годов наблюдений:

$$dNBR = \text{prefireNBR} - \text{postfireNBR}. \quad (3)$$

Обеспечивается более высокая точность классификации и отмечается хорошая корреляция между наземными оценками распространения гарей и значениями dNBR [Post-fire vegetation..., p. 21–24]. Карты на основе dNBR обычно используются для оценки горимости растительного покрова и связанных с этим экологических последствий [Examining post-fire vegetation, p. 3]. В связи с достоинствами широко используется в исследованиях. Однако, при выборе снимков для расчета данного показателя стоит обратить особое внимание на различия в фенологии между изображениями, чтобы она была минимальной. Они могут оказать сильное влияние на значения индекса, что может привести к значительным ошибкам [Chen, Loboda, Hall, p. 63-77].

Для оценки тундровых гарей предпочтительно использовать серию спутниковых снимков, фиксирующие ситуацию до пожаров и после. Однако надежная количественная оценка площади пожаров может быть выполнена с помощью анализа единичных спутниковых снимков, сделанных в пик первого

вегетационного периода после пожара. Пространственное разрешение спутниковых снимков Landsat является вполне достаточным для точного картирования гарей по степени силы пожара, в то время как использование снимков MODIS может привести к искажениям при измерениях площадей выгоревших территорий [Boelman, Rocha, Shaver, p. 7033-7056].

4. Помимо вегетационных индексов, предназначенных для определения гарей, для исследований послепожарных сукцессий важен нормализованный относительный индекс растительности (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) – показатель количества фотосинтетически активной биомассы. Является наиболее распространенным среди вегетационных индексов. Вычисляется по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (4)$$

где, NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра.

Согласно этой формуле, плотность растительности (NDVI) в определенной точке изображения равна разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей [URL: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html>]. Существует и разностный NDVI (dNDVI), который рассчитывается аналогично dNBR.

Индекс часто используется для мониторинга состояния сельскохозяйственных культур, выявления пожароопасных зон и картографирования опустынивания. NDVI наиболее предпочтителен для глобального мониторинга растительности. Неоднородность значений вегетационных индексов, в том числе и NDVI, зависит от пространственного разрешения снимка, что сказывается на точности оценки запасов надземной биомассы фитоценозов [Evaluating post-fire vegetation..., p. 2970]. Изменения сезонных закономерностей NDVI после пожаров могут указывать на вероятную связь показателя с различиями в составе растительности [Vegetation shifts observed..., p. 729-736], при его расчете могут присутствовать ошибки при

определении участков растительности с малым проективным покрытием, где большое влияние имеют спектральные свойства почвы или растительности. При изучении гарей индекс используется в качестве инструмента, дополняющего полевые исследования послепожарной динамики восстановления растительного покрова [Post-fire vegetation..., p. 10], в частности, для оценки скорости восстановления растительности на изучаемых участках. Однако, NBR более чувствителен к структуре растительности и отраженному излучению почвы, чем NDVI [Examining post-fire vegetation, p. 3], что делает его незаменимым инструментом при изучении гарей дистанционными методами. Значения NDVI после пожара в вегетационный период могут демонстрировать более широкую амплитуду изменений по сравнению со значениями до пожара [Vegetation shifts observed..., p. 729-736].

Установлено, что RED и NIR каналы совместно дают количественный индикатор наземной зеленой биомассы [Monitoring vegetation systems..., p. 312], [Tucker, p. 128]. Так, в Арктике NDVI часто хорошо коррелирует с наземными измерениями фитомассы, индексом листовой площади (LAI) и другими показателями фотосинтетической активности растительности [Circumpolar Arctic vegetation..., p. 055005].

Кроме расчета вегетационных индексов может проводиться визуальное сравнение ежегодных космических снимков, например, с использованием Google Earth Timelapse в комбинации каналов RGB NIR-Red-Green и выполняться анализ временных рядов изображений с целью изучения постпирогенных сукцессий [Post-fire vegetation..., p. 8]. Области, которые изменяют свой цвет со светлого, формируемого лишайниками, на темный, идентифицируются как гари, что делает возможным применение методов неконтролируемой классификации [Fire and vegetation..., p. 212]. Эти территории легко отличимы от других областей, имеющих аналогичные спектральные характеристики, по неправильной форме и расположению границ относительно извилистых водотоков [Post-fire vegetation..., p. 8], [Long-term effects, p. 6].

Также, для визуального выявления затронутых пожарами территорий используется синтез каналов SWIR1-NIR-Green. При данной комбинации пройденные пожарами территории выглядят ярко красными, сухостойная растительность – ярко-оранжевой. Комбинация SWIR2-SWIR1-Red применяется для мониторинга пожаров, так как тепловые аномалии выглядят красноватыми или желтыми [Тематическое дешифрирование и интерпретация, с. 30-31].

Гари, представляя собой участки с разреженной либо отсутствующей растительностью среди сплошного растительного покрова, также формируют выраженные положительные температурные аномалии, что может фиксироваться тепловыми космическими снимками [Грищенко, Балдина, с. 369]. По данным термального канала мультиспектральных изображений можно вычислить температуру поверхностного покрова – Land Surface Temperature (LST) и анализировать восстановление растительности в первые годы после пожаров [The footprint of Alaskan tundra..., p. 7]. При этом могут наблюдаться как прямая, так и обратная хорошо выраженные зависимости между NDVI и LST. Например, исследование [Analysis of the relationship, p. 6136–6162] дает количественную оценку вызванным пожарами изменениям в пространственно-временном распределении температуры поверхностного покрова для зоны средиземноморских вечнозеленых лесов и редколесий центральных районов Иберийского полуострова. Однако, между NDVI и суммами положительных среднемесячных температур воздуха за вегетационный период наблюдается прямая зависимость в случае отсутствия влияния таких факторов, как интенсивного антропогенного воздействия, влияющего на фотосинтетическую активность растительности [Московченко, Московченко, с. 6-16], [MODIS-informed greenness, p. 2187-2199].

Вдобавок, при выявлении зависимости возникновения пожаров от особенностей рельефа полезно применение цифровых моделей рельефа изучаемой территории, например, ArcticDEM, имеющей высокое пространственное разрешение (до 2 метров). Она является наиболее подробным источником информации о рельефе в арктическом регионе [Fire and vegetation...,

р. 216] и может быть использована для выявления зависимостей между характеристиками рельефа (высотой, уклоном, экспозицией) и скоростью восстановления растительности, определяемой по динамике вегетационных индексов.

1.2. ПОСЛЕДСТВИЯ ПОЖАРОВ ДЛЯ ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТИ

В качестве причин пожаров в зоне тундры и лесотундры Западной Сибири выделяют интенсивное антропогенное воздействие в результате больших масштабов нефтегазодобычи, а также неосторожное обращение с огнем коренного населения [Пространственно-временной анализ..., с. 244], [Fire and vegetation..., р. 208]. Антропогенные причины тундровых пожаров упоминали при изучении гарей на севере Канады и Аляске в конце 1970-х – начале 1980-х гг. [Wein, р. 213–222] и в 2012 г. [The footprint of Alaskan tundra..., р. 2], где изучались общие закономерности появления и распространения пожаров. Так, большинство пожаров в зоне тундры приходится на период с июля по август [Wein, р. 213].

К причинам пожаров относится промышленная активность, связанная с добычей полезных ископаемых, наличие подверженных воспламенению растений, а также условия окружающей среды, способствующие возгоранию. [Global pyrogeography, р. e5102]. К учащению возгораний приводит и выраженный для северной Евразии тренд к ускоренному росту температуры воздуха, из-за чего становятся более частыми засухи. Засушливые периоды с высокими температурами воздуха и низкими уровнями осадков создают условия для крупных пожаров, а сильные ветры, характерные для лесотундры, способствуют быстрому распространению огня [Пространственно-временной анализ..., с. 251]. Общее потепление также приводит к смене типов растительности на южные, кустарниковые и древесные формы, имеющие более сильное отепляющее воздействие зимой и охлаждающее – в летний период. Продолжительность вегетационного периода имеет тенденцию к увеличению на

4,5–4,8 дня за десятилетие, а средняя температура вегетационного периода увеличивается на 0,2–0,3°C за десятилетие [Fire and vegetation..., p. 219].

В работе Д. В. Московченко с соавторами [Пространственно-временной анализ..., с. 243–255] оценивается площадь распространения и частота возникновения природных пожаров в лесотундре Западной Сибири на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) посредством оценки площади гарей и горельников, возникших в результате пожаров в лесотундре Западной Сибири в 1985–2018 гг. При анализе данных дистанционного зондирования в лесотундре Западной Сибири не выявлена тенденция к увеличению площади природных пожаров за период 1985–2018 гг. За один год воздействию пожаров в среднем подвергается 0,32% площади лесотундры. Относительно слабая горимость в лесотундре ЯНАО связана с общей переувлажненностью территории и небольшим, по сравнению с тайгой, запасом горючих материалов в редкостойных лесах и редколесьях [Пространственно-временной анализ..., с. 251].

Анализ распределения пожаров по типам растительных сообществ в том же исследовании показал, что наиболее часто пожары возникают в лесах и сообществах с доминированием в составе напочвенного покрова лишайников. Лишайники высыхают в засушливые периоды из-за неспособности регулировать водный баланс. Наилучшие условия для высушивания напочвенного покрова при наличии достаточной биомассы в лесотундрах Западной Сибири создаются в светлохвойных редкостойных лесах, представленных лиственничниками лишайниковыми [Пространственно-временной анализ..., с. 251].

Распространение гарей зависит от увлажненности почв, разреженности растительного покрова, расположения газовых месторождений, распространенности торфяных болот. Частота и интенсивность пожаров сильно меняются по годам. Тундровые пожары оказывают длительное воздействие на почву и растительность в течение десятилетий. Одним из последствий является накопление горючих растительных материалов в ходе восстановительных

сукцессий, протеканию которых способствует постпирогенное поступление в почву зольных элементов [Пространственно-временной анализ..., с. 253].

На гарях при полном уничтожении или нарушении подстилки и почвенно-растительного покрова значительно меняются тепловой, водный и мерзлотный режимы верхней толщи грунтов. Пожар может привести к трансформациям в структуре и функционировании экосистемы путем изменения альbedo поверхности и энергетического баланса ландшафтов тундры [Carbon loss from..., p. 489-492]. Исследование гарей в лиственных лесах свидетельствует о повышенном среднегодовом альbedo в течение 26 лет после пожара. Таким образом в этот период сохранялся охлаждающий эффект гарей, который может влиять на локальный климат [Strong cooling induced..., p. 1-10]. По причине уменьшения альbedo и выгорания растительного покрова вместе с органомогенным горизонтом почвы, совместно выполняющими теплоизолирующую функцию, увеличивается температура почвы в летний период и ее амплитуда, проседают грунты, происходит оттаивание подземных льдов, усиливаются криогенные процессы [Пространственно-временной анализ..., с. 244], [Landhausser, Wein, p. 665-672], [Carbon loss from..., p. 489-492]. Наблюдения в арктической тундре на Аляске показали долгосрочное влияние пожаров на влажность и температуру почв, длящееся в течение десятилетий [Impacts of wildfire, p. 11]. Дренированность почвы может как увеличиваться, так и уменьшаться, что зависит от геокриологических условий территории. Вероятно, в некоторой степени дренированность зависит от рельефа [Московченко, Московченко, с. 6-16].

Возвращение исходных, наблюдавшихся до пожара температуры и влажности почв длится около 30–40 лет и примерно столько же времени уходит на восстановление растительного покрова, что указывает на зависимость температуры почвы и глубины протаивания мерзлоты от растительности [Long-term effects, p. 9–11], [Fire and vegetation..., p. 219–220]. При восстановлении растительности и накоплении подстилки улучшается теплоизоляция почвы, уменьшаются температурные колебания [Post-fire vegetation..., p. 18–19]. В

долгосрочной перспективе, в течение десятков лет, деградация многолетней мерзлоты и повышение температуры почвы происходят постепенно, по мере развития корневой системы кустарников и деревьев. На северо-востоке Сибири проведенные исследования показывают, что на гарях глубина сезонно-талого слоя увеличилась в 1,5 за 2 года и в 1,8 раза в течение 10-12 лет после пожара и далее незначительно понижалась на 21-23-летней гари [Чевычелов, с. 101-103].

Почвы тундры и лесотундры аккумулируют огромное количество углерода в органогенных горизонтах почв в течение сотен и тысяч лет. Так, крупные пожары могут высвободить объемы углерода, в десятки раз превышающие объемы элемента, участвующего в годовом балансе экосистемы. Большая часть высвобожденного углерода связано с органическим веществом почвы. Результаты исследования в районе крупных гарей у реки Анактувук на Аляске показывают, что вызываемое потеплением климата учащение и усиление пожаров в тундре может формировать положительную обратную связь, потенциально компенсирующую озеленение Арктики и влияющую на чистый баланс углерода в биоме тундры [Carbon loss from..., p. 489-492]. В первые годы после пожара в предтундровых редколесьях Колымской низменности, согласно исследованию Н.С. Мергелова [Мергелов, с. 134], фиксируется снижение запасов почвенного углерода, однако позднее, в результате быстрого восстановления фитомассы и, как следствие, избыточного накопления органического вещества, увеличивается пул углерода минеральной толщи, что подтверждается другими исследованиями [Siberian tundra ecosystem..., p. 2144-2154]. Время, необходимое для восстановления после сильного пожара исходных запасов почвенного органического углерода, по оценкам авторов, составляет от 60 до 200 лет. Схожие результаты получены в условиях горной тундры Хибин [Маслов, Маслова, Копейна, с. 336–337].

Пожары усиливают угрозу биоразнообразию тундры и лесотундры в долгосрочной перспективе, меняя видовой состав растений и птиц [Fire disturbance promotes biodiversity, p. 11]. При этом они могут играть важную роль при прогнозировании изменений биологического разнообразия северных

экосистем при глобальном потеплении. Сильные пожары могут способствовать заселению территории новыми видами, поскольку семена и побеги укорененных видов выгорают. С увеличением пожарной активности и условий, способствующих усилению пожаров, более частыми могут стать связанные с пожарами изменения в типах растительности [Vegetation shifts observed..., p. 729-736].

Восстановление растительности, оцениваемое по среднему изменению NDVI, варьирует в зависимости от силы пожара и типа растительности [Epting, Verbyla, p. 1367-1377]. Количество фитомассы, фиксируемой NDVI, серьезно уменьшается в первые 1-2 года после пожара и в одних случаях быстро восстанавливается в течение 3 года [Vegetation shifts observed..., p. 729-736], в других – на протяжении 8-14 лет и показывает дальнейший непрерывный рост, в основном за счет кустарников [Epting, Verbyla, p. 1367-1377]. Стоит обратить внимание, что это результаты, полученные по аляскинской тундре, более увлажненной, чем тундра северной Евразии. В целом значения фитомассы на бывших гарях через указанное время значительно превышают значения фитомассы на участках, где пожаров не было, что характерно как для евразийской тундры [Fire and vegetation..., p. 218], [Fire-induced changes..., p. 5], [Masyagina, p. 4], так и для аляскинской тундры [The footprint of Alaskan tundra..., p. 6–7], [MODIS-informed greenness, p. 2187-2199]. В то же время, на новых гарях отмечается снижение NDVI и более низкие его значения в течение еще как минимум нескольких лет.

В Западной Сибири по NDVI на всех гарях, кроме самых молодых, прослеживается стабильное превышение запасов фитомассы по сравнению с фоновыми условиями, что может быть связано с активным первичным восстановлением кустарников и подроста березы. 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) характерен наиболее высокий NDVI, что свидетельствует о длительном сохранении условий доминирования лиственной растительности на

месте сгоревшей мохово-лишайниковой тундры и лесотундры [Оценка постпирогенной динамики..., с. 137-153].

В первый год на гарях фиксируется большая доля открытой почвы и подстилки, которые имеют более высокую отражательную способность в красном диапазоне и более низкую отражательную способность в ближнем инфракрасном диапазоне, чем растительность [Vegetation shifts observed..., p. 729-736]. Что характерно, в некоторых случаях зависимости между NDVI и количеством осадков не наблюдается, что может объясняться доступностью воды от оттаявшего мерзлого грунта в засушливые периоды [MODIS-informed greenness, p. 2187-2199].

Индекс NBR показывает большее пропорциональное снижение сразу после пожара, чем NDVI. Однако со временем, NBR может показывать меньшую изменчивость и меньшее фенологическое влияние, чем NDVI. В районах с высокими показателями dNBR наблюдалось наибольшее снижение NDVI через 2 года после пожара. dNBR менее зависим от фенологических условий, чем NDVI [Epting, Verbyla, p. 1367-1377].

В результате выгорания растительного покрова в районе пожара освобождается место для заселения пионерными видами – мхом политрихумом можжевельниковидным (*Polytrichum juniperinum* Hedw.), иван-чаем (*Chamaenerion angustifolium*), вейником (*Calamagrostis purpurea*), почва обогащается минеральными веществами, способствующими активному росту фитомассы [Fire and vegetation..., p. 213–216]. При слабом пожаре органический слой почвы может остаться невыгоревшим и сохранить корни и ризомы, которые являются препятствием для заселения территории пионерными видами [Effect of wildfire..., p. 1845-1850]. Происходит увеличение общего кустарникового и лиственничного покрова [Frost, Epstein, p. 1264-1277]. Наиболее значительные изменения выявлены в переходных условиях лесотундры, где в 56% случаях на месте мохово-лишайниковой тундры формируются густые елово-лиственничными леса, а в 29% случаях — редколесья. [Оценка постпирогенной динамики..., с. 137-153]. Однако, биомасса кустарниковой растительности после

сильного пожара может быть меньше, чем на не затронутых огнем территориях. Сила пожара в значительной степени влияет на восстановление растительного покрова и, как следствие, может приводить к разным вариантам сукцессий.

Так, на тундровых гарях на севере Канады отмечено преобладание высоких кустарников и мелколиственных пород деревьев по сравнению с ранее безлесным покровом, в котором преобладали низкие кустарники. Еще более глубокие последствия для структуры растительности могут возникнуть при засухах и ожидаемом повышении температуры на полюсах [Landhausser, Wein, p. 665-672].

Однако происходит значительное сокращение лишайникового покрова и его замещение на мхи, злаки и кустарники, увеличивается занимаемая ими площадь; особенно активно на выгоревших участках развиваются береза карликовая (*Betula nana* L.) и ольха кустарниковая (*Alnus fruticosa* Rupr.) [Post-fire vegetation..., p. 18]. В аляскинской тундре наблюдается расселение ивы (*Salix*), пушицы влагалищной (*Eriophorum vaginatum* L.) и других злаков, однако береза карликовая (*Betula nana* L.) встречается значительно реже, обнаруживаются не свойственные контрольным участкам хвощ болотный (*Equisetum palustre* L.), иван-чай узколистый (*Chamaenerion angustifolium* L.), разнотравье и открытые грунты [Vegetation shifts observed..., p. 729-736]. Отмечается большая высота кустарников и на бывших гарях по сравнению с территориями, где не было пожаров [Long-term effects, p. 13], [Post-fire vegetation..., p. 14], [Landhausser, Wein, p. 665-672]. Таким образом, кардинально изменяется состав растительного покрова, сообщества не восстанавливаются до предпожарного состояния и неясно, произойдет ли это когда-либо в будущем. Восстановление мохово-лишайникового покрова происходит крайне медленно, поскольку создаются благоприятные условия для сосудистых растений [Post-fire vegetation..., p. 15], и может проходить в течение 100–150 лет [Замараева, с. 105]. Долгосрочное воздействие огня на лишайники может быть вызвано их ограниченными способностями к повторной колонизации [Post-fire vegetation..., p. 21]. Немаловажное значение имеет субстрат: влажные условия с активным

торфообразованием способствуют лучшему сохранению фрагментов лишайников и к более быстрому восстановлению их покрова [Long-term effects, p. 15].

В тех случаях, когда происходит быстрое восстановление лишайникового покрова на гарях [Магомедова, с. 27-38], оно проходит в три стадии: на первой отмечается высокое видовое разнообразие и невысокое покрытие; на второй – увеличивается общее проективное покрытие и покрытие лишайников; на третьей отмечается резкое уменьшение видового разнообразия со значительным увеличением покрытия.

Таким образом пожар оказывает сильный эффект на функциональный состав растительных сообществ, отмечается его долгосрочное влияние на дальнейшее развитие экосистем тундры, структуру растительности [Post-fire vegetation..., p. 24]. Отмечается закономерность, согласно которой чем сильнее выгорел участок, тем более продолжительной оказывается восстановительная сукцессия [MODIS-informed greenness, p. 2187-2199]. Происходит сокращение лишайникового покрова – его покрытие на гарях уменьшается на 55% [Long-term effects, p. 10], что уменьшает кормовую базу для оленей – жизненно важного и незаменимого элемента традиционного уклада жизни коренных народов Севера.

В исследованиях [Fire-induced changes..., p. 6], [Fire and vegetation..., p. 216–220], [Epting, Verbyla, p. 1367-1377] обнаружена явная тенденция к зарастанию тундры кустарниками и развитию леса в лесотундровой зоне в результате долгосрочного влияния пожаров. На бывших гарях доля лесов в зоне лесотундры увеличивается до 40–85% занимаемой площади, в то время как в условиях отсутствия воздействия огня лесная растительность распространяется по склонам и долинам рек [Fire and vegetation..., p. 218].

По лесному покрову данные показывают практически полное восстановление. В результате устойчивых низовых пожаров в лиственничных лесах происходит полная трансформация состава и структуры растительности. Исследования багульниково-лишайниковых лиственничных лесов лесотундры Западной Сибири свидетельствуют, что растительный покров проходит

несколько стадий восстановления. Для зарастающей лесом гари на протяжении 4–50 лет после пожара характерна стадия березняка. На старых гарях, через 50–100 лет после пожара лиственница выходит в первый ярус, восстанавливаются кустистые лишайники стадии *Cladina arbuscula* под кронами лиственниц и берез. На данной стадии лес становится пригодным для выпаса оленей. На гарях через 100–150 лет после пожара восстанавливаются молодой лиственничный лес, растения-аборигены, лесные мхи, кустистые лишайники находятся на стадии *Cladina rangiferina* [Замараева, с. 106]. По данным другого исследования, в районе реки Колымы, лиственничные леса медленно восстанавливаются и возвращаются к уровням озелененности до низового пожара в течение 10-20 лет из-за медленного роста и доминирования кустарников на начальных стадиях постпирогенной сукцессии [Evaluating post-fire vegetation..., p. 2970]. При этом, исследования лиственничных лесов Центральной Якутии свидетельствуют, что сукцессия идет по схеме быстрого восстановления и часто не заканчивается климаксом, как в темнохвойных лесах, где сукцессия идет по схеме длительного восстановления [Лыткина, Миронова, с. 168-173]. Лиственные породы могут играть существенную роль в динамике лесной растительности после лесных пожаров. Благодаря короткому жизненному циклу березы, которая заселяет гари на начальных стадиях сукцессии и отмирает на поздних стадиях сукцессии, доминирующая лиственница остается эдификатором [Габышева, с. 18-28].

Стоит учесть, что рельеф не является весомым фактором смены растительного покрова на участках, пострадавших от пожара. Тем не менее, еще на начало 1990-х на примере канадской лесотундры в северном Квебеке отмечается большая интенсивность постпирогенных лесовосстановительных сукцессий в понижениях рельефа, вероятно, в связи с повышенным увлажнением [Sirois, Payette, p. 622]. В сообществах со сложным микрорельефом отмечается пятнистость в восстановлении растительного покрова [Магомедова, с. 27-38].

ВЫВОДЫ:

Таким образом, на данный момент существует множество методик и исследований гарей и послепожарного восстановления растительного покрова методами дистанционного зондирования, имеющих высокую достоверность данных, которые подтверждаются полевыми наблюдениями. Дистанционные методы являются дешевыми, эффективными и достоверными при проведении долгосрочного мониторинга пожаров и вызываемых ими изменений почвенно-растительного покрова, пространственной структуры ландшафтов с течением времени.

Пожары влияют на альбедо поверхности, что позволяет при обработке спутниковых изображений достаточно точно определять границы гарей. Изменение отражательной способности поверхности воздействует на температурный режим почв и глубину сезонно-талого слоя. Пожары также способствуют изменениям в биологическом разнообразии северных экосистем и смене видового состава растительности. Как правило, значения NDVI и NBR наиболее низки в первый год после пожара из-за выгорания растительного покрова. Однако, их дальнейшая динамика разнится: NDVI показывает более быстрое восстановление значений (8-14 лет), и даже может превышать фоновые показатели. NBR менее изменчив и в то же время менее зависим от фенологических условий.

После пожара кардинально изменяется состав растительного покрова, сообщества не восстанавливаются до предпожарного состояния в течение десятков лет. Таким образом проявляется долгосрочное влияние на дальнейшее развитие экосистем тундры, структуру растительности. Может происходить заселение пионерными видами – мхом, иван-чаем, вейником, со временем развивается кустарничковый и лиственничный покров. При этом лишайниковые сообщества имеют ограниченные способности к повторной колонизации, их восстановление зависит от состояния субстрата.

Выявлено учащение засушливых периодов, отмечается распространение кустарниковых и древесных видов на север и их преобладание на первых стадиях сукцессий. Отдельное внимание уделяется состоянию многолетней мерзлоты и особенностям углеродного баланса. Прослеживается тенденция к замещению тундровой растительности лесными формациями в лесотундровой зоне.

Множество работ посвящено субарктическим районам Северной Америки, особенно тундре Аляски. В настоящее время появляется все больше исследований постпирогенных сукцессий по тундровым и лесотундровым зонам севера Европейской части России, северо-восточной Сибири и северу Западной Сибири, для которого проблематика пожаров особенно актуальна в связи с масштабной антропогенной деятельностью и быстрыми изменениями климата, сильно влияющими на традиционный уклад жизни коренных народов Севера и хрупкий экосистемный баланс.

ГЛАВА 2. ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ИССЛЕДОВАНИЯ (ТЕРРИТОРИИ НАДЫМСКОГО И ТАЗОВСКОГО РАЙОНОВ ЯМАЛО-НЕНЕЦКОГО АВТОНОМНОГО ОКРУГА)

2.1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ГЕОГРАФИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ

Район исследования расположен на территории Надымского и Тазовского районов Ямало-Ненецкого автономного округа. Надымский и Тазовский районы находятся в центральной и северо-восточной частях Ямало-Ненецкого автономного округа соответственно. Районы охватывают бассейн реки Надым, Тазовский полуостров и большую часть Гыданского полуострова. Общая площадь Надымского района составляет 99,8 тыс. км², Тазовского – 133,9 тыс. км², суммарно охватывая 233,7 тыс. км².

В качестве объектов исследования выбраны четыре разновозрастные гари различной площади. Гари находятся в северной части Западно-Сибирской равнины на междуречьях, к северу расположена акватория Обской губы. Два участка локализованы в центральной части Надымского района, другие два – в южной части Тазовского района, на левобережье реки Таз. Гарь 1990 года площадью 1065 км² расположена к северу от поселка Пангоды, между рек Правая Хетта и Ныда, неподалеку от гари 2016 года, которая находится к северо-востоку возле поселка Заполярный (66° с.ш., 74° в.д.) на правом берегу реки Ныда. Ее площадь составляет 570 км². В Тазовском районе возле притоков реки Таз, к югу от поселка Тибей-Сале расположены гари 2006 и 2017 годов. Площадь первой достигает 161 км², второй, наименьшей из всех – около 0,17 км². На рисунке 1 отображено местоположение указанных гарей.

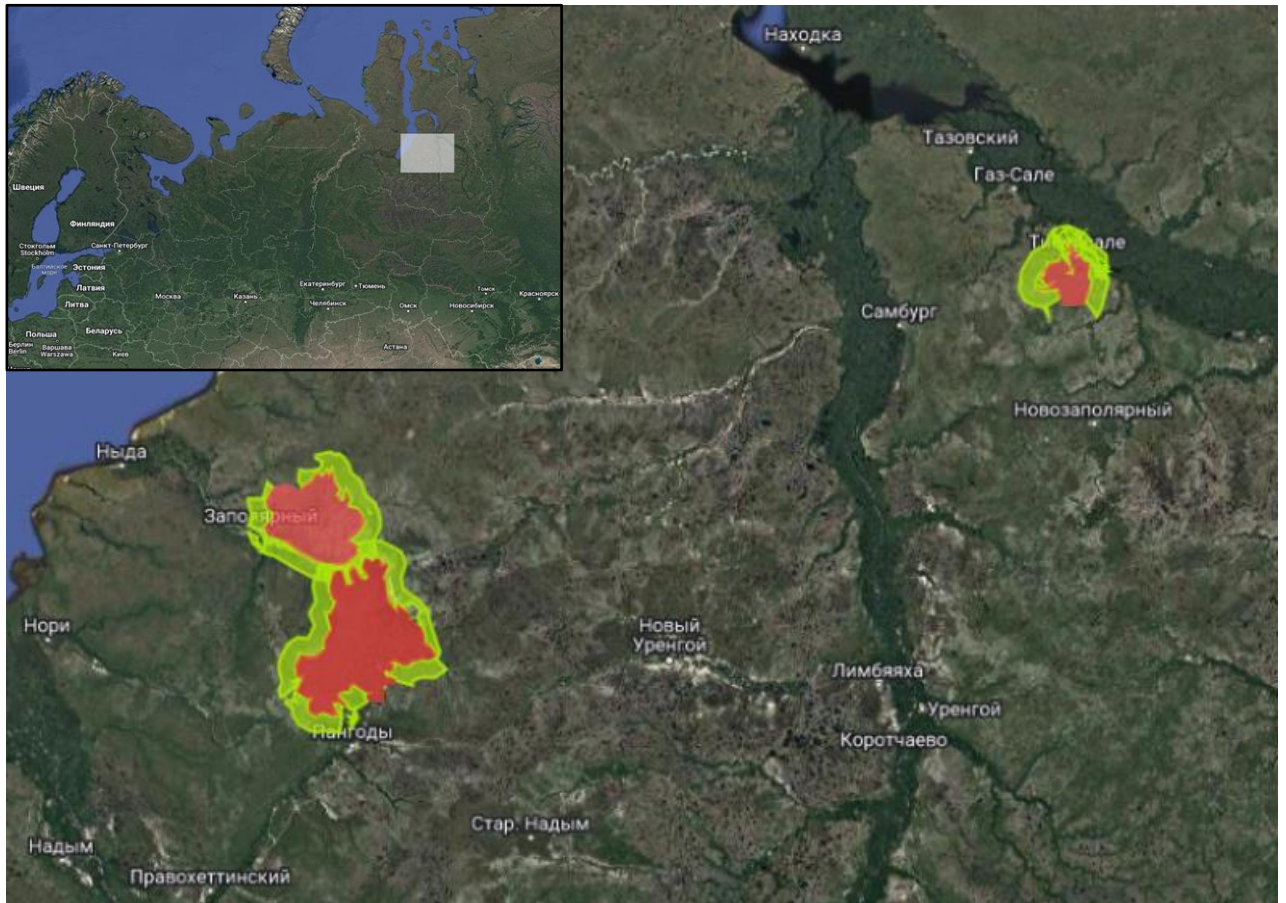


Рис. 1. Расположение исследуемых участков. Красным отмечены гари, желтым – фоновые участки

2.2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И РЕЛЬЕФ

Районы находятся в пределах Евразийской литосферной плиты, входящей в состав протяженного Урало-Монгольского складчатого пояса, на эпигерцинской Западно-Сибирской плите. Поверхность фундамента плиты располагается на глубине 4-5 км. За свою геологическую историю территория подвергалась неоднократным морским трансгрессиям. По данным карты четвертичных образований территории Российской Федерации [Карта четвертичных образований, с. 500] изучаемые гари Надымского и Тазовского районов сложены типичными для зоны лесотундры Западной Сибири среднеплейстоценовыми ледниковыми и верхнеплейстоценовыми озерно-ледниковыми отложениями, а вблизи долин рек первого и второго порядков – верхнеплейстоценовыми и голоценовыми аллювиальными отложениями. Гари

располагаются на надпойменных террасах и ледниково-морской плосковолнистой равнине.

В целом, фундамент перекрыт в стратиграфической последовательности морскими и континентальными осадочными образованиями юрской, меловой, палеогеновой, неогеновой и четвертичной систем, слагающих мощный мезозойско-кайнозойский платформенный чехол [Бакулин В.В., Козин В.В., с. 34-38].

Севернее 65° с.ш., фактически на большей части изучаемой территории преобладает сплошное распространение многолетней мерзлоты, южнее – прерывистое и массивно-островное, по большей части в органогенных породах. Характерно в основном слитное залегание пород в северных частях [Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа, с. 156-157].

Орографически исследуемая территория расположена в пределах Надымской низменности правобережной части бассейна р. Надым, то есть приурочена к восточной половине Надымской впадины, занятой долинами р. Надым и ее притоков. На западе, востоке и юге находятся относительно высокие возвышенности – Полуйская, Ненецкая (Надым-Пурское междуречье) и Сибирские Увалы. Южная часть Тазовского района представляет собой сочетание слабо поднятой Танамской возвышенности и Мессояхской низменности, частично охватывая и северные части Тазовской низменности и Пур-Тазовской возвышенности.

Рельеф территории имеет абсолютные высоты до 40 м, плоский и пологоволнистый характер (уклоны не превышают 1,5 градусов), осложненный скоплениями бугров и гряд многолетнего пучения, способствует таким экзогенным процессам, как сезонное и многолетнее пучение, термокарст, заболачивание, оказывающим сильное влияние на формирование местных ландшафтов. Высота бугров варьирует от 0,5-1,0 до 3 м, реже 7 м. На надпойменных террасах широко представлены эоловые формы рельефа – песчаные раздувы, котловины выдувания. Приречные слаборасчлененные части

равнины залесены, для центральных нерасчлененных частей характерна большая заболоченность и заозеренность.

Нередко встречаются камы, друмлины и озы, между которыми располагаются периодически заполняемые водой термокарстовые котловины. Широко представлены полигональные формы рельефа, а также тетрагональные термокарстовые просадки. Междуречные поверхности представлены приподнятыми, сильно переработанными денудацией морскими равнинами, долины озерно-аллювиальные [Атлас Тюменской области, с. 10-11].

2.3. КЛИМАТ

Район исследования находится в субарктическом климатическом поясе. Продолжительность солнечного сияния в году составляет 1400-1600 часов. Суммарная солнечная радиация составляет 70-80 ккал/см². Радиационный баланс равняется 20-25 ккал/см². Средняя температура в январе составляет -22...-25°C, в июле +12...+16°C. Режим увлажнения – избыточный. Количество осадков составляет 400-450 мм в год, три четверти из которых выпадает в летний период. Снежный покров устанавливается в октябре, его высота составляет 30-70 см. Весной разрушение устойчивого снежного покрова заканчивается в мае. Средняя продолжительность безморозного периода 80-120 дней, продолжительность устойчивых морозов от 180 до 200 дней [Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа, с. 106-115].

Климат обусловлен северным положением, незначительным притоком солнечного тепла, повышенной циклонической деятельностью, равнинным характером поверхности. Серьезное влияние также оказывает холодное Карское море.

В зимнее время основную роль в атмосферной циркуляции играет Азиатский антициклон. При его ослаблении начинает преобладать западный циклональный перенос, способствующий проникновению влажных воздушных

масс с Атлантики, сопровождаемых потеплением и снегопадами. В теплый период года усиливается меридиональный перенос воздушных масс.

2.4. ВНУТРЕННИЕ ВОДЫ

Гидрографическая сеть территории представлена основными крупными реками в южной части – Надымом, Ныдой и Тазом с большим количеством притоков, которые начинаются на южных склонах Сибирских Увалов и Верхнетазовской возвышенности и стекают на север. Территория является частью водосборного бассейна Северного Ледовитого океана. Питание рек преимущественно снеговое. Период половодья продолжается с апреля по сентябрь. Ледостав наблюдается с октября и длится 220-250 дней, ледоход начинается в мае. Слой годового стока с территории районов варьируется от 220 до 300 мм и изменяется меридионально [Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа, с. 130-134].

Важной характеристикой районов является замедленный сток и слабый дренаж грунтовых вод, что связано с плоским рельефом, присутствием депрессий, близким залеганием к поверхности многолетней мерзлоты, оказывающей влияние на питание и разгрузку подземных вод, небольшим врезом речных долин, горизонтальным залеганием осадочных пород и значительным превышением осадков над испарением. Это предопределяет высокую заозеренность (от 2 до 7-12%), которая характерна для речных долин и заболоченных понижений. Густота озер составляет от 10 до 20 на 100 км². Продолжительность безледного периода на малых водоемах составляет 100-130 дней [Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа, с. 136-139]. Территория обладает высокой заболоченностью (до 40%) из-за очень слабого дренажа.

2.5. ПОЧВЕННО-РАСТИТЕЛЬНЫЙ ПОКРОВ

Согласно классификации Гвоздецкого Н.А. и Михайлова Н.И. [Гвоздецкий Н.А., Михайлов Н.И., с. 310-319, 323] исследуемые гари расположены на Западно-Сибирской равнине, в лесотундровой зоне и находятся в Пур-Тазовской ландшафтной провинции.

В ландшафтах лесотундровых гарей растительный покров представляет собой смешение тундровых и таежных сообществ. Плоские заозеренные равнины заняты типичными для провинции сочетаниями ивняковых, ерниковых и ерnikово-ольховниковых кустарничково-зеленомошно-лишайниковых тундр на тундровых элювиально-глеевых почвах с лиственничными и елово-лиственничными редколесьями. Часто встречаются кустарничково-сфагново-лишайниковые и осоково-пушицево-сфагновые плоскобугристые комплексные болота. Лишь в южных районах провинции, где среди поверхностных отложений больше песков, в речных долинах и на склонах южной экспозиции появляются массивы редкостойных северотаежных елово-березовых и елово-лиственничных лесов, под которыми формируются слабоподзолистые и глеево-подзолистые почвы.

Гари 1990 и 2016 годов в Надымском районе находятся на высоких увалисто-холмистых и гривистых расчлененных равнинах с кустарничково-моховыми тундрами, лиственничными и еловыми редианами (по долинам) на болотных мерзлотных и тундрово-болотных почвах [Атлас ЯНАО, с. 218-220].

Исследуемые гари Тазовского района 2006 и 2017 годов расположены на Пур-Тазовских пологоволнистых кустарничково-лишайниковых тундровых равнинах с лиственничными редианами на тундровых элювиально-глеевых почвах и почвах пятен.

2.6. ТЕХНОГЕННАЯ НАГРУЗКА

В настоящее время происходит добыча природного газа и активное освоение нефтегазовыми компаниями новых месторождений в ЯНАО, все большие территории подвергаются техногенному воздействию. Нарушается почвенно-растительный покров, в том числе под воздействием пожаров, происходит деградация многолетней мерзлоты, развиваются экзогенные геологические процессы, негативно влияющие на общее экологическое равновесие и дальнейшую хозяйственную деятельность.

Основная антропогенная нагрузка на ландшафты Ямало-Ненецкого автономного округа исходит от газовых и газоконденсатных месторождений, которых насчитывается больше двухсот, и обслуживающей их инфраструктуры.

ВЫВОДЫ:

Район исследования находится в природной зоне лесотундры Западной Сибири и охватывает четыре гари разных площади и возраста: две гари 1990 и 2016 гг. около реки Ныда к северо-востоку и юго-востоку от поселка Заполярный и две гари 2006 и 2017 гг. около реки Таз к югу от Тибей-Сале. Территории гарей, расположенные в субарктическом климатическом поясе, вблизи крупных рек на ледниково-морской плосковолнистой равнине и надпойменных террасах, сложены ледниковыми, озерно-ледниковыми и аллювиальными четвертичными отложениями. Развита многолетняя мерзлота. Почвенно-растительный покров представлен типичными для границы тундры и северной тайги переходными ландшафтами, от редкостойных лесов до тундр, перемежающихся плоскобугристыми болотными комплексами.

Выбор территории Тазовского и Надымского районов для изучения динамики восстановления растительного покрова на гарях обусловлен возрастающей техногенной нагрузкой инфраструктуры газовых месторождений на экосистемы.

ГЛАВА 3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование проводится дистанционными методами путем анализа мультиспектральных спутниковых снимков Landsat с помощью общедоступного сервиса обработки геопространственных данных Google Earth Engine через редактор кода на языке программирования JavaScript [Google Earth Engine, p. 18-27] (Рисунок 2). Платформа позволяет пользователям выполнять геопространственный анализ, используя серверную инфраструктуру Google, и предоставляет большое количество специализированных функций для отбора, обработки спутниковых снимков, проведения операций растровой алгебры, в том числе и расчет вегетационных индексов, а также кластеризации изображений и классификации с обучением. Наличие специальных функций существенно упрощает создание скриптов, серверная обработка значительно ускоряет работу, а необходимость написания программного кода обеспечивает документирование процесса обработки данных, что позволяет использовать и совершенствовать алгоритмы в дальнейших исследованиях. Важной особенностью Google Earth Engine является наличие хорошо разработанного руководства, затрагивающего различные аспекты работы, и активного сообщества.

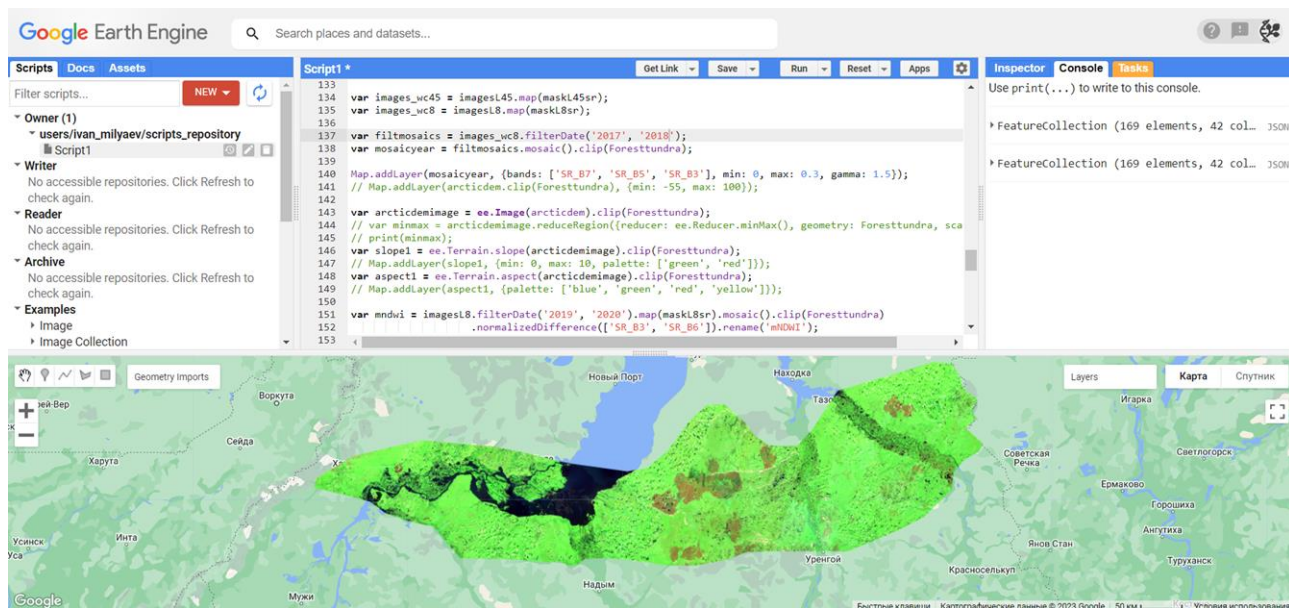


Рис. 2. Рабочее окно платформы Google Earth Engine

Для начала работы на платформе требуется пройти регистрацию. Для анализа был произведен отбор и создание коллекций спутниковых снимков Landsat уровня обработки 2 (Surface Reflectance) с геометрической, радиометрической и атмосферной коррекцией, охватывающие территорию лесотундры Ямало-Ненецкого автономного округа за июль и август на период с 1985 по 2022. Для исключения из анализа пикселей облаков, к набору изображений применяется маскирование облачности. Территория исследования анализируется на наличие гарей при помощи синтеза каналов SWIR2-NIR-Green, при котором участки пожаров выделяются наиболее отчетливо. Было выделено 4 гари разного возраста и площади с использованием инструментов рисования и отнесены к типу «геометрия» (geometry).

Для данного исследования разработан алгоритм автоматизированного выделения фоновых участков для каждой гари, необходимых для статистически достоверного определения восстановления растительного покрова на участках пожаров. Определены следующие критерии выбора территории в качестве фонового участка: расположение не дальше чем 5 км от гари, отсутствие пожаров, похожие типы четвертичных отложений, местоположение в мезорельефе, подтипы почв, формации растительного покрова, те же диапазоны абсолютных высот, уклона, экспозиции, расстояния до ближайших водных объектов. Дальность расположения от гари определяется через создание буферных зон вокруг гарей. Характеристики рельефа рассчитываются из данных ArcticDEM, доступ к которым обеспечивает платформа через функцию импорта. Водные объекты определяются при помощи расчета mNDWI, имеющего формулу:

$$mNDWI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR} \quad (5)$$

где GREEN – отражение в видимой зеленой области спектра, SWIR – отражение в коротковолновой инфракрасной области спектра. К территории суши отнесены пиксели рассчитанного раstra, меньшие или равные 0. Значения больше 0 отнесены к воде и маскируются. Для определения расстояния каждого

пикселя до ближайшего водного объекта используется функция кумулятивной стоимости (*cumulativeCost*), которая вычисляет карту кумулятивных затрат на основе изображения, содержащего затраты на прохождение каждого пикселя (суша), и изображения, содержащего местоположения источников (водные объекты). Остальные параметры получаются оцифровкой карты четвертичных образований территории РФ [Карта четвертичных образований, с. 500], геоморфологической карты из атласа Тюменской области [Атлас Тюменской области, 1971], карт почв и растительности из атласа ЯНАО [Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа, 2004] в картографической программе QGIS 3.22. QGIS – свободно распространяемое ГИС-приложение, имеющее большой набор инструментов и модулей в том числе и для работы со спутниковыми снимками; может использоваться как инструмент визуализации и обработки данных дистанционного зондирования. Оцифрованы только те типы, которые располагаются в пределах территорий гарей. Созданные пространственные объекты сохраняются в формате *shp* (*shapefile*) и загружаются как полигональные объекты в *Earth Engine* в хранилище файлов (*Assets*), откуда импортируются в файл кода. Растровые изображения с данными абсолютной высоты, уклона, экспозиции и расстояния до ближайших водных объектов конвертируются в полигональные объекты. Территории фоновых участков являются объектами пересечения типов всех полигональных объектов и пятикилометровых буферных зон.

Вокруг трех гарей из четырех с помощью заданного алгоритма созданы фоновые участки, максимально схожие по компонентам ландшафтов с территориями гарей. Однако, такой фоновый участок около гари 2017 года создать автоматически не удалось из-за слишком маленькой площади, поэтому наиболее подходящая по заданным критериям территория была выделена вручную.

В работе для определения состояния растительного покрова и динамики его постпирогенного восстановления используются уже описанные выше нормализованный индекс гарей (*NBR*) и нормализованный разностный

вегетационный индекс (NDVI) [Родионова, Вахнина, Желибо, с. 20], [Fire and vegetation..., p. 220-226], [URL: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html>]. Это наиболее подходящие, часто используемые для выделения затронутых пожарами территорий и простые в вычислениях индексы. На гарях и горельниках индекс NBR принимает самые низкие значения, что позволяет достаточно точно определить их на спутниковых снимках. При изучении гарей индекс NDVI используется в качестве инструмента, дополняющего полевые исследования послепожарной динамики восстановления растительного покрова [Post-fire vegetation..., p. 10], в частности, для оценки скорости восстановления растительности на изучаемых участках.

Индексы NDVI и NBR стоит применять вместе для получения более точных результатов, индекс NDVI более полезен для выявления здоровой растительности, а индекс NBR - для выявления изменений в растительности, вызванных горением. Для полного понимания стоит пояснить физический смысл используемых вегетационных индексов. В красной области спектра находится максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом растений, а ближняя инфракрасная область характеризуется максимальным отражением в клеточных структурах листьев. В коротковолновой инфракрасной области спектра происходит сильное отражение обгоревшей растительности и грунта. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра, большему в инфракрасной и меньшему в коротковолновой инфракрасной из-за густоты покрова и недостижимости поверхности грунта. Таким образом, NDVI является индикатором фотосинтетической активности и хорошо коррелирует с количеством фотосинтезирующей биомассы, NBR наиболее вероятно связан с проективным покрытием, поскольку он чувствителен отраженному излучению почвы и листьев растений.

С помощью предварительно созданных функций для каждого изображения из сформированных коллекций за каждый год вычисляются показатели на территории гарей. Чтобы функция была применена к каждому элементу набора

данных, используется функция `map`. Похожим образом создаются мозаики вегетационных индексов за каждый год, которые для дальнейшей обработки преобразуются из коллекций в многоканальные растры. После этого к ним добавляются уже рассчитанные растры абсолютных высот, уклона, экспозиции, расстояния до ближайших водных объектов.

На заключительном этапе случайным образом формируются выборки от 40 до 140 точек в зависимости от площади участка гари. Точки заполняются значениями, содержащимися в пикселях многоканальных растров. Эти точки, содержащие выборочные значения пикселей рассчитанных растров, конвертируются в таблицы и скачиваются в формате csv для дальнейшего проведения статистического анализа с применением языка программирования R в программе RStudio (Рисунок 3).

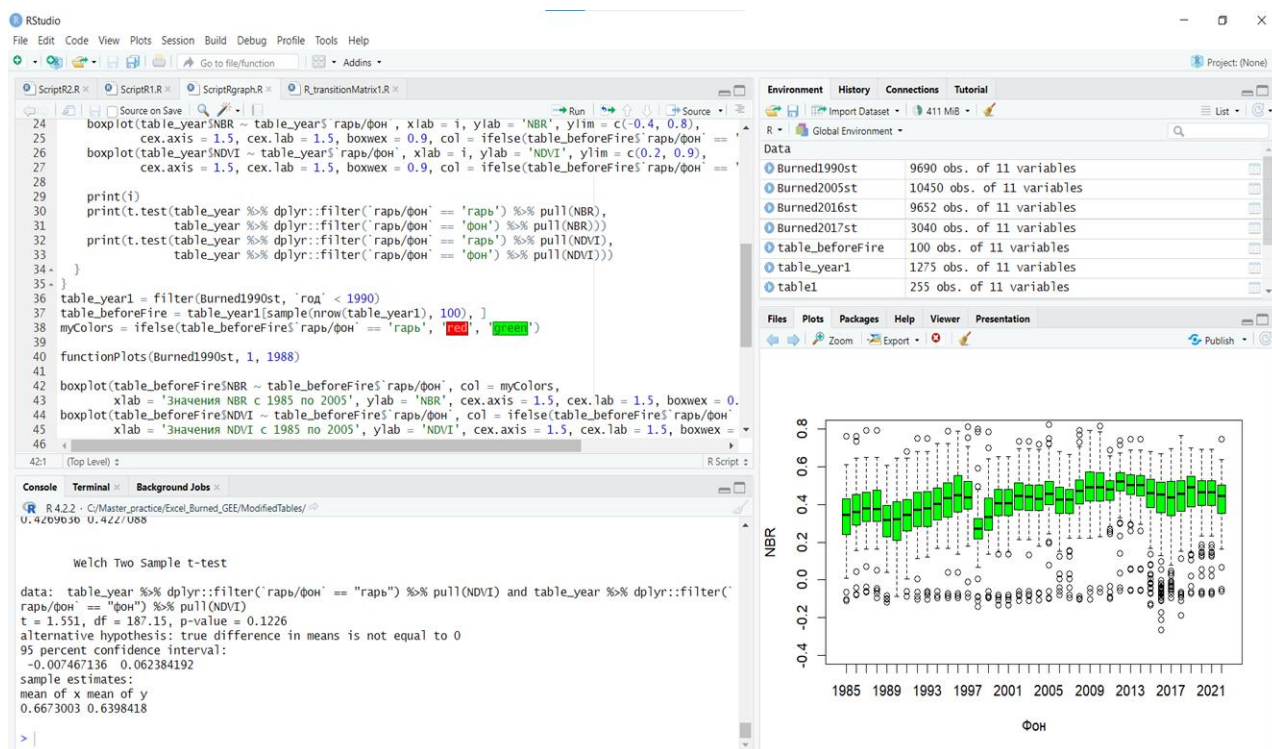


Рис. 3. Рабочее окно программы RStudio

В ней производится анализ временных рядов посредством построения блочных диаграмм значений вегетационных индексов определенной гари за все годы и блочных диаграмм сравнения фоновых и контрольных участков за каждый год.

R – это свободная программная среда для статистических вычислений и визуализации данных, которая способна работать на широком спектре платформ [Team R. D. C.]. Загрузка файлов установки и библиотек происходит через сеть архивов CRAN. RStudio – это интегрированная среда разработки (IDE) для R и Python. Она включает консоль, редактор с подсветкой синтаксиса, поддерживающий прямое выполнение кода, а также инструменты для построения графиков, истории, отладки и управления рабочим пространством [RStudio: integrated development for R]. Является свободно распространяемым программным обеспечением.

Для обработки табличных данных в R используются пакеты tidyverse, ggplot2, dplyr, readxl и writexl. Tidyverse помогает преобразовывать и лучше представлять данные, приводить их в порядок, манипулировать ими и визуализировать, ggplot2 является мощным инструментом для визуализации данных, dplyr – пакет, который предоставляет грамматику манипулирования данными, readxl и writexl предназначены для чтения и записи таблиц в формате xlsx.

В создаваемый код подгружают табличные данные в формате csv и образуют объекты формата data.frame, то есть табличный формат языка R. Для упрощения работы с данными и улучшения читаемости кода применяется функциональное программирование, при котором создаются функции и используются для структурирования кода на логически завершенные, автономные фрагменты, каждый из которых выполняет конкретную задачу. Первая функция предназначена для переименования столбцов таблиц и преобразования их структуры в удобную для дальнейшего анализа форму с использованием функции pivot_longer, которая берет несколько колонок и преобразует их к виду «ключ-значение»: широкие таблицы становятся длинными. Столбцы с годами превращены в одну колонку. Полученные таблицы с вегетационными индексами NBR и NDVI объединены в одну.

Следующая функция включает в себя предыдущую функцию, применяемую как к участкам гарей, так и фоновым участкам, и объединение

таблиц со значениями гари и фона в одну таблицу. Применением данной функции получаемые таблицы сохраняются в формате `xlsx`. Таким образом были обработаны все данные по фоновым и контрольным участкам, загруженные из Google Earth Engine.

Для эффективной визуализации создана функция, которая создает попарные блочные диаграммы, показывающие сравнение массивов значений вегетационных индексов по годам, то есть каждая серия диаграмм показывает состояние растительного покрова на гари и фоновом участке за отдельный год. Для каждого года наблюдений рассчитаны статистические тесты на значимость различий. Данные имеют нормальное распределение, поэтому при оценке используется тест Уэлча – модификация теста Стьюдента, для проведения которого не обязательно, чтобы сравниваемые выборки имели одинаковую дисперсию. Также, созданы графики с блочными диаграммами, показывающие динамику отдельных индексов на конкретной гари на всем протяжении наблюдений. Применяемые методы визуализации позволяют представить динамику состояния растительного покрова более наглядной.

Таким образом, сочетая использование платформы Google Earth Engine для подбора и обработки спутниковых данных, использующей вычислительные мощности серверов, и R для преобразования данных в табличной форме и статистической обработки, можно практически полностью автоматизировать и существенно ускорить процесс получения информации о состоянии растительного покрова на определенных территориях. Данная методика позволяет провести аналогичные исследования на других территориях или повторное изучение гарей с минимальными усилиями и затратами времени, дает возможность выявить слабые места или ошибки в алгоритмах, усовершенствовать, а также использовать для более масштабных исследований, включив разработанные скрипты в качестве фрагмента в другие скрипты. Другим преимуществом метода служит возможность его повторения на компьютере даже с малыми вычислительными ресурсами, то есть общедоступность и эффективность.

Недостатком методики можно считать трудности с анализом гарей с очень малой площадью, в отношении которых формируется маленькая выборка, которая намного меньше, чем у крупных гарей. К тому же, не представляется возможным автоматически выделить фоновый участок у малых гарей из-за трудностей преобразования растровых данных характеристик рельефа в полигональные объекты, поэтому этап определения фонового участка в этом случае производится вручную.

У метода есть свойство, которое в некоторой степени может ограничить круг пользователей. Для использования алгоритмов необходим определенный минимум понимания и знания о том, как работать в Google Earth Engine и в R.

Для проведения работы были тщательно выбраны источники данных и инструменты их обработки. Обработка мультиспектральных спутниковых снимков Landsat на платформе для работы с геопространственными данными Google Earth Engine проводится с применением вегетационных индексов NBR и NDVI. Работа с этим ресурсом требует обучения основам клиент-серверного программирования на JavaScript, однако дает возможность автоматизировать процесс обработки написанием скрипта. Статистические расчеты и визуализация выполнены в программной среде R, используя специальные пакеты с готовыми функциями для работы с табличными данными и представления результатов в графическом виде.

ГЛАВА 4. ДИНАМИКА ВЕГЕТАЦИОННЫХ ИНДЕКСОВ

В данной работе под восстановлением растительности подразумевается восстановление значений вегетационных индексов NDVI и NBR до уровня фоновых показателей, когда исчезает статистическая значимость различий индекса на территории гари и на фоновом участке.

По результатам работы составлены временные ряды индексов NBR и NDVI за каждый год, начиная с 1985, для нескольких гарей и прилегающих к ним фоновых участков.

Результаты исследований дистанционного зондирования постпирогенной сукцессии в субарктических районах Евразии и Северной Америки показывают, что существуют четкие закономерности восстановления растительности после пожара. В первые несколько лет после пожара наблюдается значительное увеличение значений NDVI. Период восстановления растительности может длиться несколько десятилетий, в течение которых экосистема тундры постепенно возвращается к состоянию до пожара, что подтверждается результатами данного исследования.

По графикам изменения NDVI и на гарях, и фоновых участках заметна тенденция к постепенному увеличению значений вегетационного индекса в течение периода исследования (Рисунок 4). Увеличение NDVI, наблюдаемое на гарях и фоновых участках 1990 года на протяжении длительного времени говорит о повышении фотосинтетической активности и, как следствие, количества зеленой биомассы в зоне лесотундры на протяжении последних четырех десятилетий, что согласуется с установленными свидетельствами смещения природных зон на север в связи с глобальными изменениями климата. Состояние растительности лесотундры, которая является экотонном, служит важным индикатором подобных перемен. Основным движущим фактором «озеленения» тундры аргументированно полагаются пожары, на месте которых через некоторое время развиваются древесные и кустарниковые жизненные формы. Вероятно, возгорания ускоряют процесс замещения растительности более

южными видами, вследствие чего для лесной растительности формируются более благоприятные климатические и почвенные условия произрастания. Также, на гари 1990 года наблюдаются значения NDVI, превышающие значения фонового участка, что является частью общей тенденции для лесотундры, где новое состояние растительности, восстановленной после пожаров, характеризуется более высоким средним NDVI [Fire and vegetation..., p. 218], [Fire induced changes, p. 6].

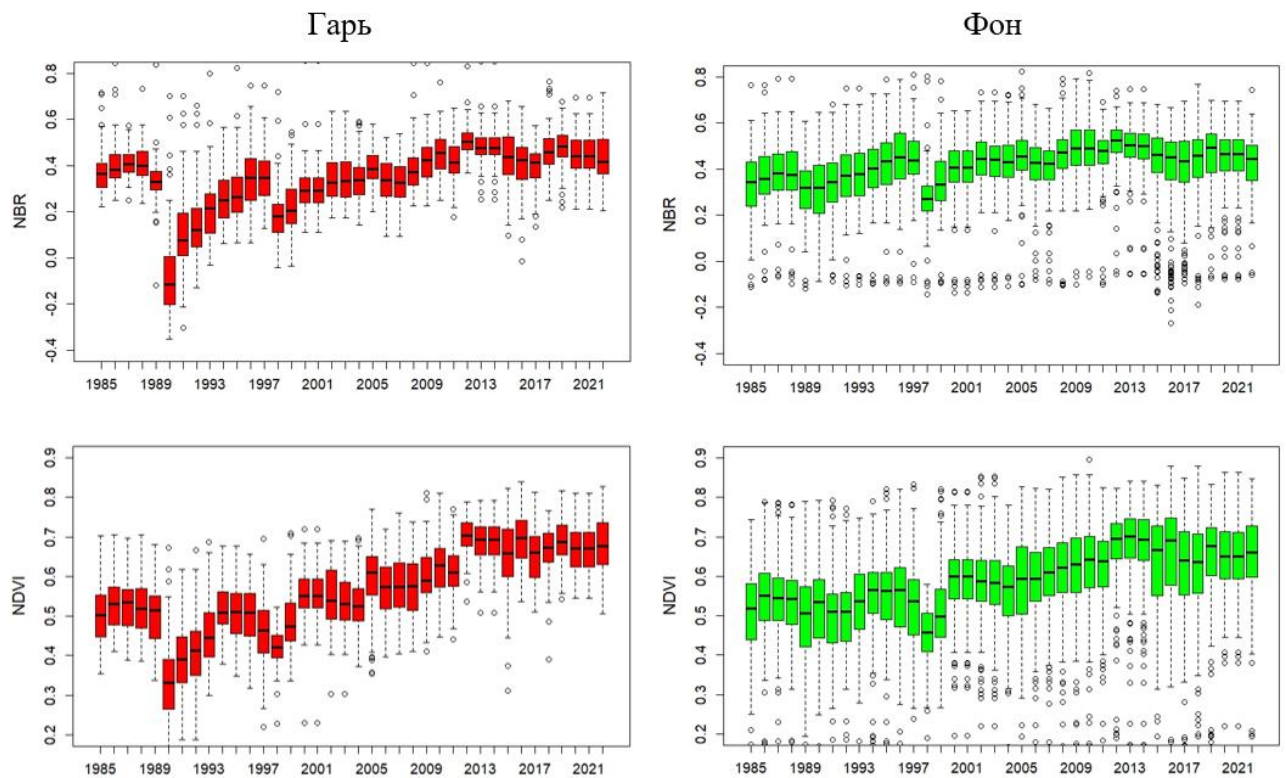


Рис. 4. Динамика NBR и NDVI на гари 1990 года к югу от п. Заполярный и прилегающем фоновом участке

Результаты другого исследования подтверждают развитие кустарникового покрова на гари 1990 года и свидетельствуют о соответствии динамики NDVI изменениям растительного покрова. При этом иная ситуация на молодых гарях, где NDVI показывает завышенные значения и слабо коррелирует с состоянием растительного покрова, его биомассой и проективным покрытием [Постпирогенная трансформация..., с. 62-66]. На постпирогенных участках доля лишайников минимальна и вместе с медленным восстановлением кустарничков на оголенных участках земли формируются синузии злаков и осок, что и может

дать прирост уровня индекса NDVI при меньшей биомассе и проективном покрытии за счет спектральных характеристик вегетационных частей представленного разнотравья.

Особенность феномена «озеленения» лесотундры заключается в том, что оно происходит в локальном масштабе, там, где ранее происходили возгорания [Fire induced changes, p. 6]. Однако гари занимают значительные территории, более 10% площади лесотундры [Пространственно-временной анализ..., с. 253] и распределены по природной зоне, что позволяет судить об «озеленении» как общей для лесотундры тенденции.

Выводы исследования [Post-fire vegetation..., p. 13], полностью согласуются по тенденции NDVI на гари 1990 года. Сразу после пожара в августе 1990 года NDVI на сгоревших участках был на 40% ниже, чем на несгоревших, но со временем довольно быстро восстановился. Через 8 лет NDVI достиг уровня несгоревших участков и в дальнейшем демонстрировал непрерывный рост. Через 27 лет после пожара значения NDVI на сгоревших участках были на 26% выше по сравнению с несгоревшими участками. Совпадение по измерениям свидетельствует о надежности методов исследования. dNBR хорошо коррелирует с распространением гарей, что также согласуется с выводами исследования [Post-fire vegetation..., p. 21-24].

Стоит отметить увеличение размаха вариации, особенно у NBR, то есть при образовании гарей отмечается увеличение количества участков с более низкими значениями индексов при сохранении высоких значений индексов на некоторых территориях. Это свидетельствует о том, что на гарях на некоторых участках в большей степени сохраняется растительный покров, как правило, вблизи водных объектов, в долинах и поймах рек и по берегам озер. В целом, вариация значений вегетационных индексов на гари после пожара и в течение периода восстановления остается больше, чем на фоновом участке, однако после исчезновения различий либо становится такой же, либо уменьшается.

Динамика NDVI, фиксируемая по ходу данного исследования, согласуется с тем, что значения NDVI после пожара в вегетационный период могут

демонстрировать более широкую амплитуду изменений по сравнению со значениями до пожара [Vegetation shifts observed, p. 729-736]. Данное наблюдение, вероятно, связано с большой площадью гарей, которые охватывают в том числе и долины малых рек, где выше влажность, и растительность лучше защищена от воздействия огня. Эти территории возможно исключить из рассмотрения при выделении гарей только при использовании космических снимков высокого разрешения.

Расчеты показывают отсутствие значимости различий у вегетационных индексов на всех гарях до года пожара. Статистически значимые различия между гарью и фоновыми участками по NDVI (при p-уровне значимости меньше 0,05) наблюдаются в течение 8 лет после пожара на гари 1990 года (Рисунок 5), 7 лет на гари 2005 года (Рисунок 6) и 4 лет на гари 2016 года (Рисунок 7).

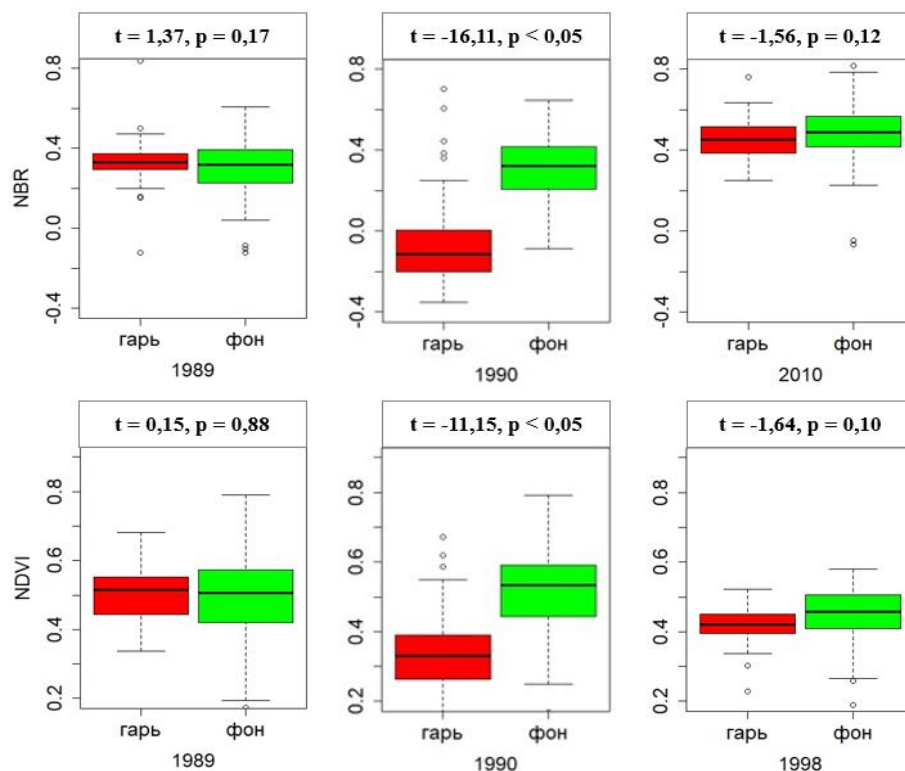


Рис. 5. Блочные диаграммы сравнения значений индексов на гари 1990 года и фоновом участке

На гари 2017 года после возгорания NDVI и NBR достигают значений фонового участка уже через 3 года после пожара (Рисунок 8), однако вариация

NBR на гаре остается намного выше, чем на фоновом участке. Стоит отметить, что на гаре 1990 года фиксируется устойчивое превышение значений NDVI над значениями фоновой участка, начиная с 2018 года.

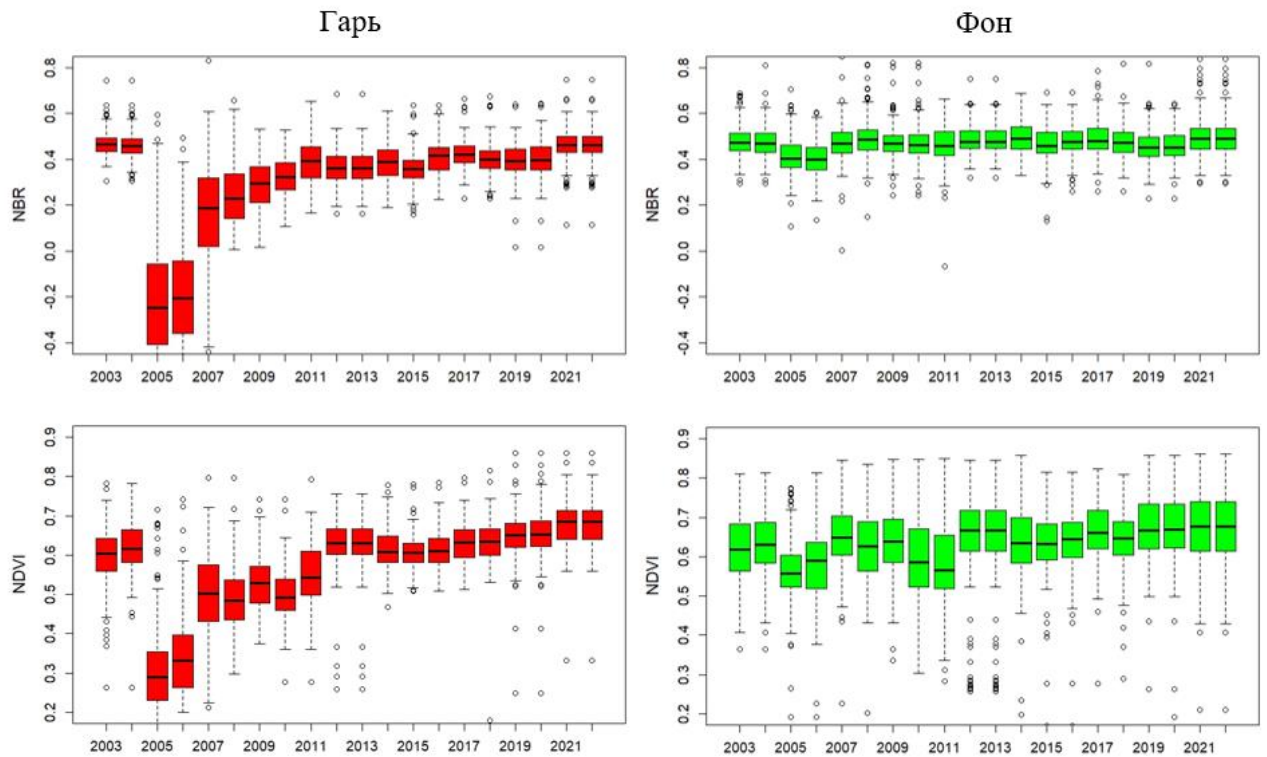


Рис. 6. Динамика NBR и NDVI на гаре 2005 года к югу от п. Тибей-Сале и прилегающем фоновом участке

По NBR результаты существенно отличаются и характеризуются более медленным восстановлением значений. На гарях 2005, 2016 и 2017 года различия фиксируются на всем протяжении наблюдений. Лишь на гаре 1990 года значимость различий исчезает к 2010 году, только через 20 лет после пожара.

Вегетационный индекс NBR показывает большее пропорциональное снижение сразу после пожара, чем NDVI. Однако со временем, NBR может показывать меньшую изменчивость, чем NDVI, что характерно и для результатов нашего исследования. NBR более чувствителен к структуре растительности и отраженному излучению почвы, чем NDVI [Examining post-fire vegetation, p. 3], что делает его незаменимым инструментом при изучении гарей дистанционными методами. Значения NDVI после пожара в вегетационный период могут демонстрировать более широкую амплитуду изменений по сравнению со

значениями до пожара [Vegetation shifts observed..., p. 729-736]. Однако, в районах с высокими показателями dNBR наблюдалось наибольшее снижение NDVI не через 2 года после пожара [Erping, Verbyla, p. 1367-1377] а только в первый год, после чего наблюдается непрерывный прирост.

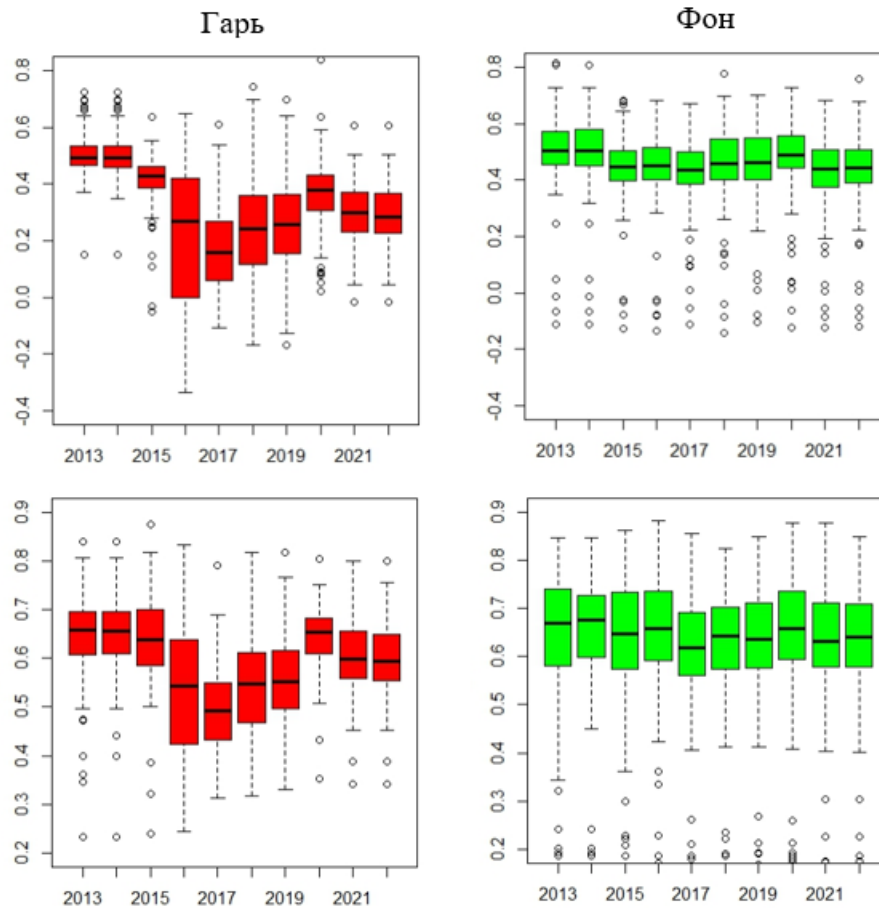


Рис. 7. Динамика NBR и NDVI на гари 2016 года к северу от п. Заполярный и прилегающем фоновом участке

Не до конца ясными остаются некоторые существенные колебания значений вегетационных индексов. В частности, это касается гари 1990 года, где в 1998 году фиксируется непонятное сильное уменьшение показателей NBR и NDVI как на гари, так и на фоновом участке.

Наиболее очевидным кажется предположение о влиянии климатических характеристик (температуры, относительной влажности воздуха и количества осадков) на состояние растительного покрова. Для проверки предположения мы использовали данные Росгидромета из информационной системы Web Аисори-

М [URL: <http://meteo.ru/data>], которые были визуализированы в виде графика, показывающего среднемесячные значения температуры воздуха и количества осадков за июль-август – время исследуемых спутниковых наблюдений (Рисунок 10). Данные по относительной влажности воздуха по неизвестным причинам оказались недоступны, поэтому не были включены в анализ. Наблюдаемая динамика метеорологических характеристик не дает однозначной информации об их возможной взаимосвязи с состоянием растительного покрова.

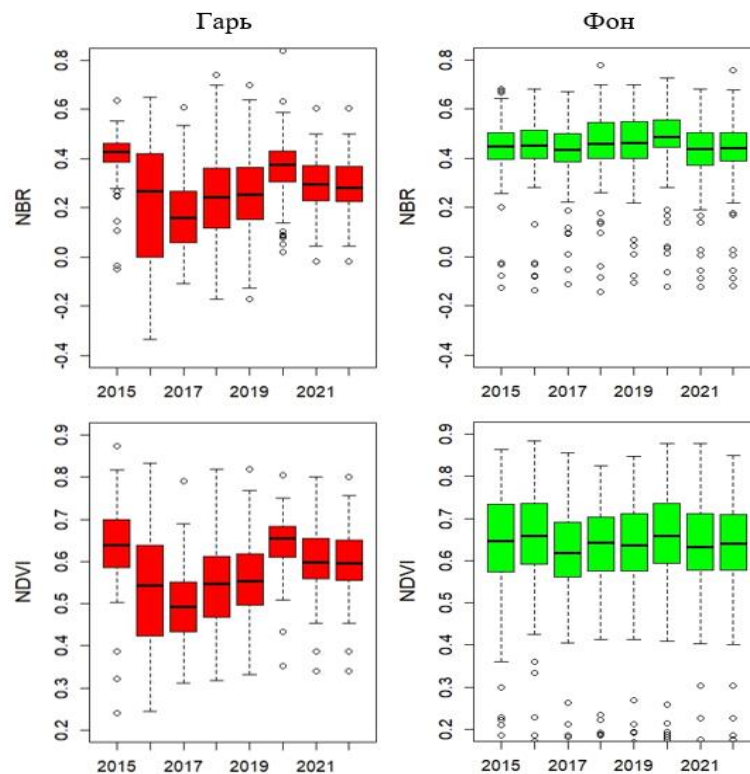


Рис. 8. Динамика NBR и NDVI на гарях 2017 года к югу от п. Тибей-Сале и прилегающем фоновом участке

Разница в скорости выравнивания NBR и NDVI по гарям и фоновым участкам существенна. Согласно полевым исследованиям [Постпирогенная трансформация..., с. 62-66] в то время, как NDVI на территории гарей даже может превышать значения фонового участка, как получилось по результатам наших измерений, суммарный вес растительности на гарях может быть в 10 раз меньше. Различия объясняются особенностями растительного покрова приполярных территорий. На фоновых участках наблюдается занижение значений

относительной биомассы из-за особенностей лишайникового покрова; одновременно с этим на постпирогенных участках сукцессию начинают в основном злаковые и осоковые, что сказывается на приросте NDVI при меньших биомассе и проективном покрытии.

По сравнению блочных диаграмм, построенных по значениям индексов NDVI и NBR на гари и фоновом участке (Рисунки 5 и 9), можно попытаться выяснить, в какой период времени после пожара происходит восстановление растительности.

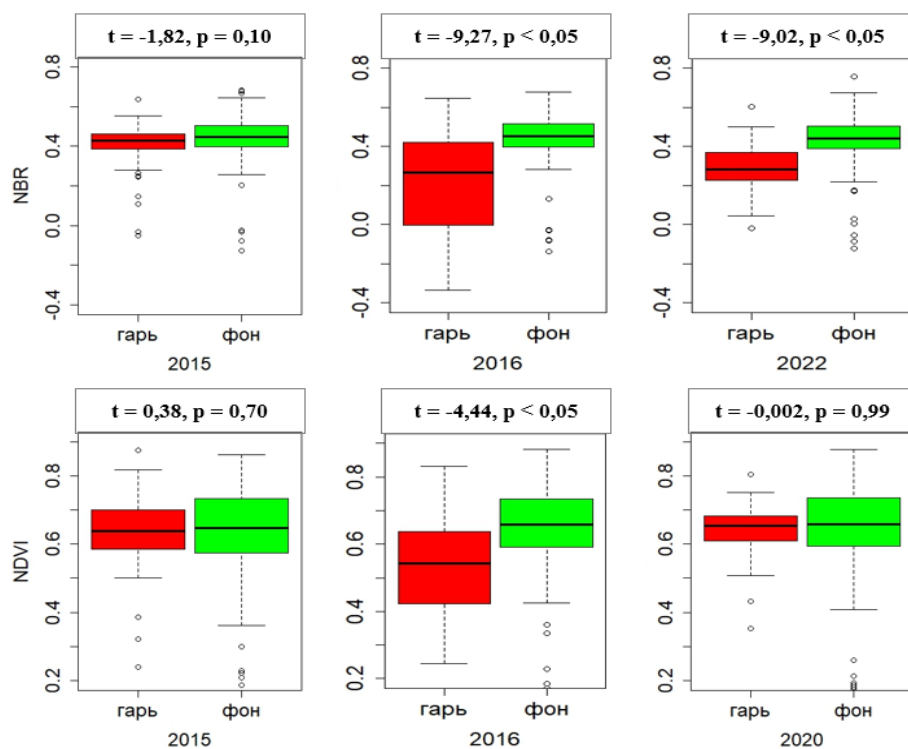


Рис. 9. Блочные диаграммы сравнения значений индексов на гари 2016 года и фоновом участке

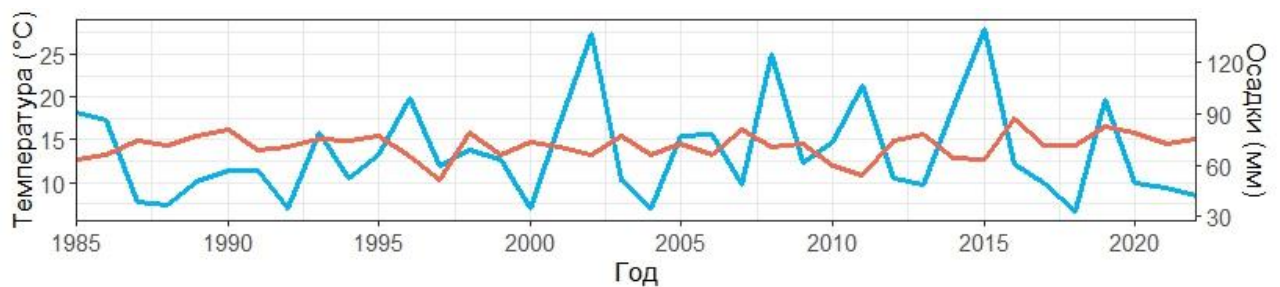


Рис. 10. Температура воздуха и количество осадков в период с 1985 по 2022 по данным метеостанции Надым

При анализе динамики вегетационного индекса NDVI в год пожара на гари 1990 года вблизи города Заполярный происходит падение медианного показателя на 0,2, восстановление до показателей фонового участка, характеризующееся последующим сохранением уровня, и произошло только к 1998 году, то есть через 8 лет после пожара. При анализе динамики NBR достижение уровня фонового участка, сохраняющееся в дальнейшем, происходит только к 2010 году, через 20 лет после пожарного события, что, вероятно, говорит о медленном увеличении проективного покрытия. Число элементов в выборках составляет от 100 до 150, достигается статистическая значимость значений, благодаря чему можно достоверно судить о наблюдаемых тенденциях.

При рассмотрении данных с других гарей вышеописанные тенденции динамики NDVI и NBR сохраняются. На гари 2005 года возникновения, находящейся возле поселка Тибей-Сале, достижение медианных значений NDVI на месте пожара до фоновых значений составило 7 лет, и произошло в 2012 году. В отдельные годы, в частности в 2018, отмечается превышение NDVI на гари относительно фона, но сохранения этого превышения и дальнейшей тенденции пока не наблюдается.

Для более подробного изучения восстановления растительного покрова на современных гарях Тазовского района малой площади необходимо привлечь более детальные спутниковые снимки Sentinel-2, поскольку пространственного разрешения Landsat в 30 метров недостаточно для получения статистически значимых результатов. Стоит помнить, что временного ряда данных Sentinel недостаточно, поскольку начало спутниковой миссии приходится на 2015 год.

Кроме временной динамики были рассмотрены пространственные закономерности восстановления растительного покрова в зависимости от таких характеристик рельефа, как абсолютная высота и уклон, и исследовано воздействие расстояния до ближайших водных объектов. Однако, между расстоянием до ближайшего водного объекта и скоростью восстановления растительности значимой связи не выявлено. Это объясняется тем, что рельеф севера Западной Сибири плоский и пологоволнистый, а растительность наиболее

низких участков вдоль долин рек наименее подвержена возгоранию в связи с повышенной увлажненностью. Расстояние до ближайших водных объектов также не играет существенной роли в скорости восстановления растительного покрова.

Таким образом, на основании анализа спутниковых данных с применением вегетационных индексов NDVI и NBR восстановление фотосинтезирующей биомассы растительного покрова может проходить от 3 до 8 лет, однако причины различий достоверно выявить только по этим данным невозможно, требуются дальнейшие исследования. Данных по температуре воздуха и количеству осадков недостаточно, чтобы сказать о влиянии климатических параметров на значения вегетационных индексов. Однако, наблюдается закономерность, заключающаяся в зависимости скорости восстановления зеленой биомассы растительности по NDVI от возраста гари. На гари 1990 года индекс показывает восстановление до фоновых показателей в течение 8 лет, на гари 2005 года – в течение 7 лет, на гари 2016 года – 4 лет, на гари 2017 года – 3 лет. Таким образом, хоть и на основании наблюдений по небольшому числу гарей, можно выдвинуть следующую гипотезу: на более молодых лесотундровых гарях восстановление фотосинтезирующей биомассы растительного покрова происходит быстрее. Для подтверждения этой гипотезы требуется значительно увеличить число исследуемых гарей разного возраста и провести более масштабный анализ.

Имея в виду восстановление фотосинтезирующей биомассы растительности, мы не можем говорить о восстановлении изначальной флоры, поскольку сукцессии, как правило, начинаются с прихода пионерных видов, которые через определенное время сменяются флорой незатронутых пожаром территорий.

Можно сделать вывод, что на гарях относительно быстро восстанавливается зеленая биомасса, но проективное покрытие увеличивается медленнее, что, вероятно, может быть связано с изменением флористического состава и характеризует ранний этап восстановительной сукцессии, при котором пионерные виды существенно отличаются от коренных по морфологии.

Восстановление растительности не происходит в полной мере, если учитывать не только относительное количество фотосинтезирующей биомассы, но еще и проективное покрытие; оно тем более не происходит с учетом флористического состава и стадий сукцессии, продолжающихся в лесотундре десятки лет. Стоит также помнить, что возможны ситуации, когда значения NDVI завышены относительно реального количества биомассы, что может ввести в заблуждение. В любом случае изучаемые индексы всегда должны использоваться в качестве инструмента, дополняющего полевые исследования.

Таким образом, NDVI и NBR могут совместно использоваться в пространственно-временном анализе для отслеживания многолетних изменений растительного покрова на гарях, характеризуя с одной стороны количество фотосинтезирующей биомассы, а с другой – проективное покрытие. Однако, необходимы дальнейшие исследования для уточнения слабых сторон этого подхода. Возможно, существует способ разработать новый вегетационный индекс, который позволял бы с высокой степенью достоверности комплексно оценивать восстановление растительности на гарях, учитывая зеленую биомассу, общую биомассу растений, проективное покрытие и другие характеристики.

Количество фитомассы, фиксируемой NDVI, серьезно уменьшается в первые 1-2 года после пожара и в нашем случае восстанавливается в течение 5-10 лет и показывает дальнейший непрерывный рост, что также отмечается работе по Аляске [Epting, Verbyla, p. 1367-1377]. В многочисленных публикациях говорится о том, что значения фитомассы на бывших гарях через указанное время значительно превышают значения фитомассы на участках, где пожаров не было [Fire and vegetation..., p. 218], [Fire-induced changes..., p. 5], [Masyagina, p. 4], [The footprint of Alaskan tundra..., p. 6–7], [MODIS-informed greenness, p. 2187-2199].

Наконец, на основании расчетов временной динамики вегетационного индекса NDVI, а также дополнительного рассмотрения климатических данных выдвинута гипотеза о зависимости скорости восстановления фитомассы от возраста гари. Для лучшего понимания процессов восстановительной динамики растительности необходимы дополнительные исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методы дистанционного зондирования имеют высокую достоверность, подтверждающуюся полевыми наблюдениями, являются дешевыми, эффективными и достоверными при проведении долгосрочного мониторинга пожаров и вызываемых ими изменений почвенно-растительного покрова с течением времени. Пожары влияют на множество характеристик северных экосистем, влияющих на состояние растительного покрова, особенно на видовой состав и структуру. Важной фактором является тенденция к замещению тундровой растительности лесными формациями в лесотундровой зоне.

Район исследования находится в природной зоне лесотундры Западной Сибири. Территории гарей, расположенные в субарктическом климатическом поясе, вблизи крупных рек на ледниково-морской плосковолнистой равнине и надпойменных террасах, сложены ледниковыми, озерно-ледниковыми и аллювиальными четвертичными отложениями. Почвенно-растительный покров представлен типичными для границы тундры и северной тайги переходными ландшафтами, от редкостойных лесов до тундр, перемежающихся плоскобугристыми болотными комплексами. Выбор территории Тазовского и Надымского районов для изучения динамики восстановления растительного покрова на гарях обусловлен переходным характером зоны лесотундры и возрастающей техногенной нагрузкой инфраструктуры газовых месторождений на экосистемы.

В исследовании используются мультиспектральные спутниковые снимки Landsat, обработка которых проходит на общедоступной платформе для работы с геопространственными данными Google Earth Engine. Статистические расчеты и визуализация выполняются в свободной программной среде R с использованием специальных пакетов для работы с табличными данными и представления результатов в графическом виде. Преимуществами этой методики служат минимальные затраты времени, эффективность и общедоступность. Недостатком является слабая применимость метода в отношении анализа малых

гарей площадью в несколько десятков квадратных километров. Для работы по данной методике требуются навыки программирования.

На основании анализа спутниковых данных с применением вегетационного индекса NDVI восстановление фотосинтезирующей биомассы растительного покрова на лесотундровых гарях может занимать разное время, в нашем случае от 3 до 8 лет. Значения NBR по гари 1990 года показывают длительность сукцессии в течение 20 лет после пожара. NDVI в некоторых случаях склонен завышать темпы восстановления растительности в сравнении с истинной биомассой, к тому же он не учитывает состав и структуру, в то время как NBR более чувствителен к состоянию растительности и отраженному излучению почвы и медленнее восстанавливается. Таким образом, восстановление растительности не происходит в полной мере, если брать в расчет другие характеристики помимо биомассы. NDVI и NBR должны совместно использоваться в пространственно-временном анализе для отслеживания многолетних изменений растительного покрова на гарях, характеризуя с одной стороны количество фотосинтезирующей биомассы, а с другой – проективное покрытие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Barrett K. et al. Vegetation shifts observed in arctic tundra 17 years after fire // *Remote Sensing Letters*. 2012. Т. 3. №. 8. P. 729-736.
2. Boelman N. T., Rocha A. V., Shaver G. R. Understanding burn severity sensing in Arctic tundra: exploring vegetation indices, suboptimal assessment timing and the impact of increasing pixel size // *International Journal of Remote Sensing*. 2011. Т. 32. №. 22. С. 7033-7056.
3. Chen D., Loboda T. V., Hall J. V. A systematic evaluation of influence of image selection process on remote sensing-based burn severity indices in North American boreal forest and tundra ecosystems // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Т. 159. С. 63-77.
4. Chen D. et al. Strong cooling induced by stand-replacing fires through albedo in Siberian larch forests // *Scientific Reports*. 2018. Т. 8. №. 1. С. 1-10.
5. Dvornikov Y. et al. Wildfire dynamics along a North-Central Siberian latitudinal transect assessed using Landsat imagery // *Remote Sensing*. 2022. Т. 14. №. 3. С. 790.
6. Epting J., Verbyla D. Landscape-level interactions of prefire vegetation, burn severity, and postfire vegetation over a 16-year period in interior Alaska // *Canadian Journal of Forest Research*. 2005. Т. 35. №. 6. P. 1367-1377.
7. Fire and vegetation dynamics in northwest Siberia during the last 60 years based on high-resolution remote sensing / Sizov O. [et al.]. // *Biogeosciences*. 2021. Т. 18. №. 1. P. 207–228.
8. Fire-induced changes in soil and vegetation in the forest-tundra of Western Siberia / Sizov O. [et al.]. // *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences, 2020. Т. 223. P. 03001.
9. Frost G. V., Epstein H. E. Tall shrub and tree expansion in Siberian tundra ecotones since the 1960s // *Global change biology*. 2014. Т. 20. №. 4. С. 1264-1277.
10. García M. J. L., Caselles V. Mapping burns and natural reforestation using Thematic Mapper data // *Geocarto International*. 1991. Т. 6. №. 1. С. 31-37.

11. Gorelick N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // *Remote sensing of Environment*. 2017. Т. 202. Р. 18-27. URL: <https://earthengine.google.com/> (дата обращения: 02.05.2023).
12. Jorgenson M. T., Grosse G. Remote sensing of landscape change in permafrost regions // *Permafrost and periglacial processes*. 2016. Т. 27. №. 4. С. 324-338.
13. Krawchuk M. A. et al. Global pyrogeography: the current and future distribution of wildfire // *PloS one*. 2009. Т. 4. №. 4. С. e5102.
14. Landhausser S. M., Wein R. W. Postfire vegetation recovery and tree establishment at the Arctic treeline: climate-change-vegetation-response hypotheses // *Journal of Ecology*. 1993. С. 665-672.
15. Lorantý M. M. et al. Siberian tundra ecosystem vegetation and carbon stocks four decades after wildfire // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2014. Т. 119. №. 11. С. 2144-2154.
16. Mack M. C. et al. Carbon loss from an unprecedented Arctic tundra wildfire // *Nature*. 2011. Т. 475. №. 7357. С. 489-492.
17. Masyagina O. V. Carbon dioxide emissions and vegetation recovery in fire-affected forest ecosystems of Siberia: recent local estimations // *Current Opinion in Environmental Science & Health*. 2021. Т. 23. Р. 100283.
18. Post-fire vegetation succession in the Siberian subarctic tundra over 45 years / R.J. Heim, A. Bucharova, L. Brodt, J. Kamp, D. Rieker, A.V. Soromotin, A. Yurtaev, N. Hölzel // *Science of the Total Environment*. 2020. № 143425.
19. Rouse J. W. et al. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS // *NASA Spec. Publ.* 1974. Т. 351. №. 1. С. 309.
20. RStudio T. et al. RStudio: integrated development for R // Rstudio Team, PBC, Boston, MA. 2020. URL: <http://www.rstudio.com> (дата обращения: 02.05.2023).
21. Talucci A. C. et al. Evaluating post-fire vegetation recovery in Cajander Larch Forests in Northeastern Siberia using UAV derived vegetation indices // *Remote Sensing*. 2020. Т. 12. №. 18. С. 2970.

22. Tan Z. et al. MODIS-informed greenness responses to daytime land surface temperature fluctuations and wildfire disturbances in the Alaskan Yukon River Basin // International journal of remote sensing. 2013. Т. 34. №. 6. P. 2187-2199.
23. Team R. D. C. A language and environment for statistical computing // URL: <http://www.R-project.org> (дата обращения: 02.05.2023).
24. The footprint of Alaskan tundra fires during the past half-century: implications for surface properties and radiative forcing / Rocha A. V. [et al.]. // Environmental Research Letters. 2012. Т. 7. №. 4. P. 044039.
25. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote sensing of Environment. 1979. Т. 8. №. 2. С. 127-150.
26. Viereck L. A. et al. Effect of wildfire and fireline construction on the annual depth of thaw in a black spruce permafrost forest in interior Alaska: a 36-year record of recovery // Proceedings of the Ninth International Conference on Permafrost, University of Alaska Fairbanks, Fairbanks, Alaska. 2008. Т. 29. С. 1845-1850.
27. Walker D. A. et al. Circumpolar Arctic vegetation: a hierarchic review and roadmap toward an internationally consistent approach to survey, archive and classify tundra plot data // Environmental Research Letters. 2016. Т. 11. №. 5. С. 055005.
28. Бродт Л. В. и др. Постпирогенная трансформация растительного покрова в тундровой зоне за 5 лет // Проблемы региональной экологии. 2022. №. 2. С. 62-66.
29. Габышева Л. П. Растительность гарей Лено-Амгинского междуречья (Центральная Якутия) как кормовая база копытных // Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2017. №. 3. С. 18-28.
30. Замаараева Т. А. Возобновление шиловидных и бокальчатых лишайников после пожаров в лиственничных лесах лесотундры Западной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Медико-биологические науки. 2012. № 6. 2012. Т. 6. С. 104-108.
31. Застрожнов А. С. и др. Карта четвертичных образований территории Российской Федерации (масштаб 1: 2 500 000). 2016. Т. 1. №. 2. С. 500.

- 32.Кофтан Ю. Р., Мирзеабасов О. А., Зверева Г. Н. Модернизированная Web-система удаленного доступа к ЯОД-архивам ЕГФД (Web АИСОРИ М) // URL: <http://meteo.ru/data> (дата обращения: 02.05.2023).
- 33.Лазуков Г. И. Карта четвертичных отложений и геоморфологическая карта // Атлас Тюменской области. 1971. №. 1.
- 34.Ларин С. И. Атлас Ямало-Ненецкого автономного округа // Омск: Омская картографическая фабрика. 2004.
- 35.Лыткина Л. П., Миронова С. И. Послепожарная сукцессия в лесах криолитозоны (на примере Центральной Якутии) // Экология. 2009. №. 3. С. 168-173.
- 36.Магомедова М. А. Восстановление лишайникового покрова на гарях в предтундровых лесах Западной Сибири // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2006. №. 1. С. 27-38.
- 37.Миляев И. А. Восстановление растительного покрова на гарях лесотундры Западной Сибири по данным дистанционного зондирования // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды. 2023. С. 404-408.
- 38.Московченко Д. В., Московченко М. Д. Оценка современной динамики ландшафтов Заполярного месторождения с использованием спутниковых данных // Вестник Тюменского государственного университета. Серия: Экология и природопользование. 2018. Т. 2. №. 4. С. 6-16.
- 39.NDVI: теория и практика // GIS–Lab [сайт]. URL: <https://gis-lab.info/qa/ndvi.html> (дата обращения: 10.04.2023).
- 40.Пространственно-временной анализ природных пожаров в лесотундре Западной Сибири / Московченко Д. В. [и др.]. // Сибирский экологический журнал. 2020. Т. 27. №. 2. С. 243–255.
- 41.Родионова Н. В., Вахнина И. Л., Желибо Т. В. Оценка динамики послепожарного состояния растительности на территории Ивано-Арахлейского природного парка (Забайкальский край) по радарным и оптическим данным спутников SENTINEL-1/2 // Исследование Земли из космоса. 2020. №. 3. С. 14-25.

42. Сизов О. С. и др. Оценка постпирогенной динамики тундровой растительности на севере Западной Сибири за последние 50 лет (1968-2018) на основе данных ДЗЗ детального и высокого разрешения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. №. 4. С. 137-153.
43. Чевычелов А. П. Постпирогенные трансформации мерзлотных почв Северо-Востока России // Проблемы региональной экологии. 2018. №. 6. С. 101-103.