XXIV Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» · ИКИ РАН · 9–13 ноября 2026 г.

Оценка многолетней динамики растительного покрова восточного макросклона Приполярного Урала по данным спутниковой съёмки Landsat

М.Д. Московченко, А.В. Фахретдинов

Тюменский научный центр СО РАН, Тюмень

moskovchenkomd@yandex.ru · arthurfahretdinov@gmail.com

XXIV.F.226 · Секция «Дистанционное зондирование растительных и почвенных покровов»

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность и цель работы

Горные ландшафты — высокочувствительные индикаторы современных изменений климата: смещаются высотные границы растительности, меняется видовая структура фитоценозов.

Полевые наблюдения на Приполярном Урале затруднены слабой транспортной доступностью. Количественная оценка трансформации растительного покрова требует многолетних рядов спутниковых данных и методов геопространственного моделирования.

Цель

Определить современные тенденции развития растительного покрова восточного макросклона Приполярного Урала по спутниковым данным Landsat

Задачи

1. Ретроспективно смоделировать породный состав, группы типов леса и классы бонитета за 2000–2024 гг.
2. Оценить тренды NDVImax за 1985–2025 гг. на разных высотных уровнях
3. Оценить вклад лесопотерь (включая пожары) в снижение фитомассы
4. Сопоставить динамику растительности с изменениями температуры воздуха и поверхности

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Восточный макросклон Приполярного Урала (ХМАО–Югра)

120 км
протяжённость территории в субмеридиональном направлении

1500–1895 м
абсолютные высоты основных хребтов; отроги — 500–900 м

–2,9 °C
среднегодовая температура воздуха (метеостанция Саранпауль, 1985–2025 гг.)

519 мм
годовая сумма осадков; коэффициент увлажнения 1,3

Высотная поясность растительности (сверху вниз)

Гольцы
выше ~1000 м · камни и скалы, накипные лишайники

Горные тундры
каменистые, лишайниковые, кустарничковые тундры; ерники

Редины и редколесья
400–600 м · лиственница, берёза, ель, реже сосна

Горно-лесной пояс
кедрово-елово-лиственничные и берёзовые редкостойные леса

Предгорья
таёжные среднесомкнутые леса с зеленомошным покровом

Данные и схема обработки

Исходные данные

- Landsat 5–9 (TM/ETM+/OLI), Collection 2, 1985–2025 гг.
- Материалы лесоустройства ХМАО–Югры (Берёзовское и Няксимвольское лесничества) — эталонные данные для моделирования
- ЦМР FABDEM, Copernicus GLO-30; климат CHELSA (4 переменные)
- ESA WorldCover, Global Forest Change v1.12, GABAM
- MODIS MOD21C3 (LST)
- Ряды наблюдений метеостанции Саранпауль

Обработка

- LandTrendr (GEE): ежегодные медианные композиты, индексы NDVI, NBR, dNBR
- SegFormer: семантическая сегментация, тайлы 256×256, выборки 3 : 1 : 1
- NDVImax по 8-дневным композитам, трёхлетние мозаики, маска NDVI > 0,3
- Тренды: ITA, тесты Манна–Кендалла, Кокса–Стюарта; точка перелома — Петтита, Ланзанте

Результаты

- Ежегодные карты преобладающих пород, групп типов леса и классов бонитета, 2000–2024 гг.
- Тренды NDVImax по высотным поясам (шаг 100 м)
- Карты пожаров и лесопотерь
- Связь NDVImax с температурой воздуха и LST

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Точность нейросетевой модели SegFormer

74,0 %

Преобладающая порода деревьев и кустарников

двукратная точность — 88,9 %

69,6 %

Группы типов леса

двукратная точность — 85,2 %

71,0 %

Классы бонитета

двукратная точность — 88,2 %

Очистка обучающих данных

Из 1 923 681 записи лесоустройства отсеяно 349 043 (более 18 %). Точность по преобладающей породе выросла с 68 до 74 %.

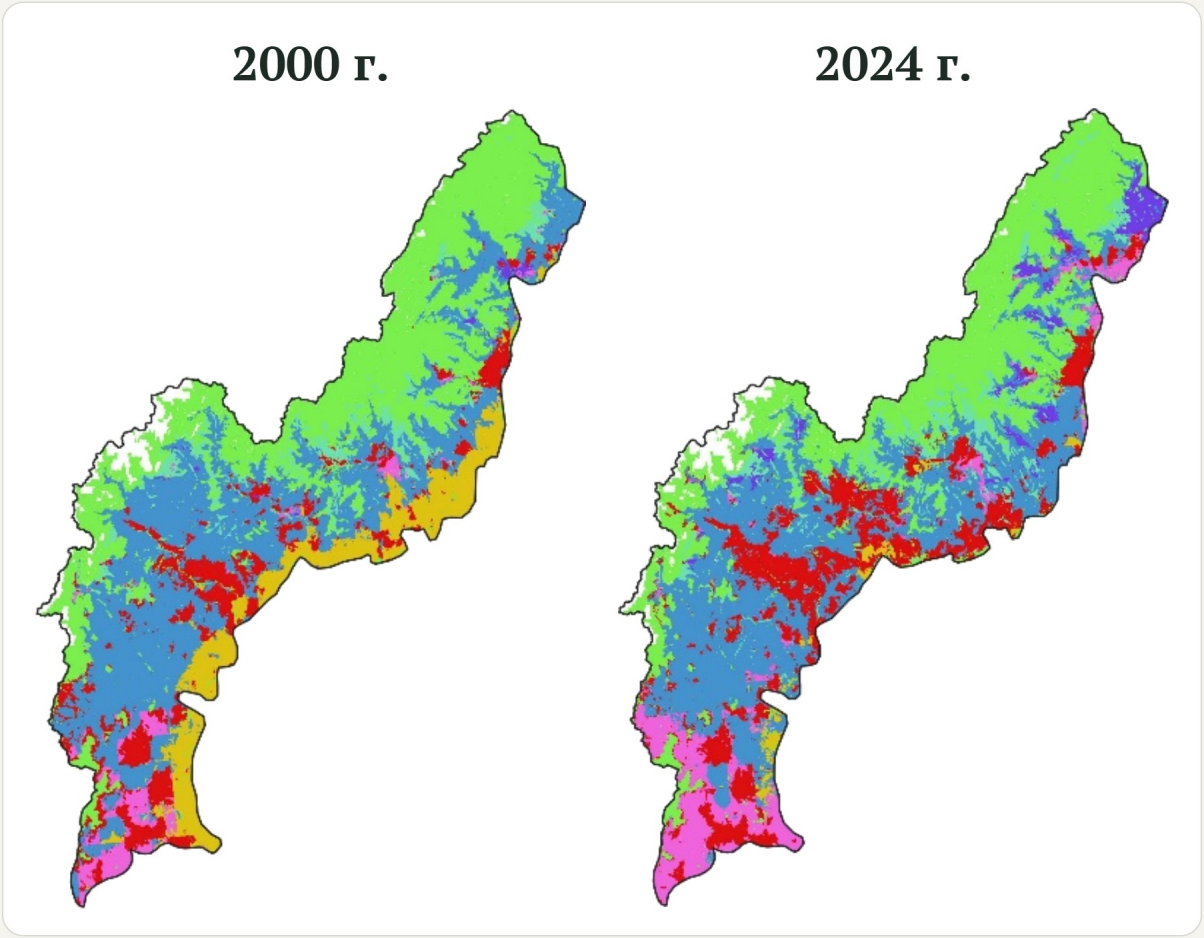
Ретроспективная проверка

По данным лесоустройства Ханты-Мансийского района 1999 и ХМАО 2013 гг. точность по преобладающей породе — 68,0 и 69,1 %: заметного падения точности во времени нет.

Выбор модели

SegFormer и DeepLabV3+ с разными экстракторами признаков, функциями потерь и скоростями обучения продемонстрировали близкую точность моделирования.

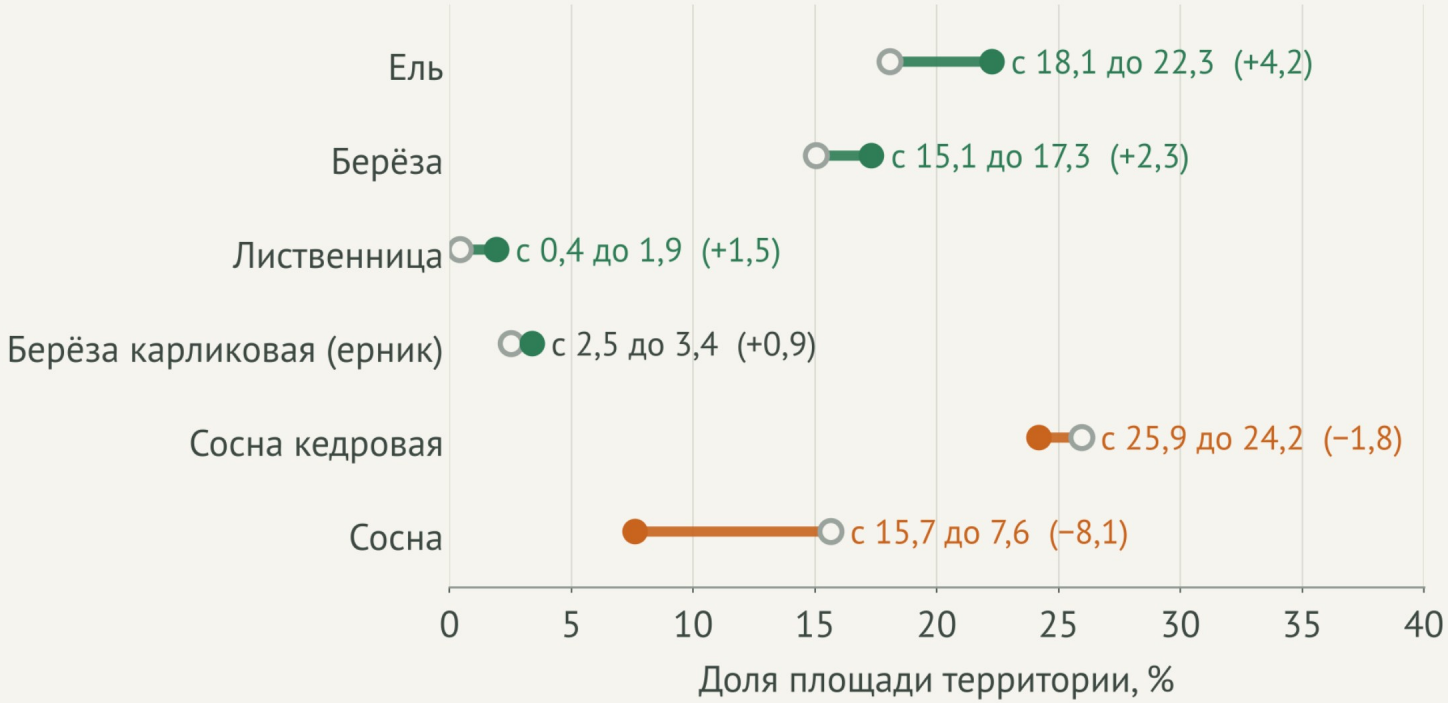
Преобладающие породы: 2000 и 2024 гг.



- безлесные территории
- сосна
- лиственница
- сосна кедровая
- ель
- берёза
- берёза карликовая (ерник)

> Увеличились площади ельников и берёзовых лесов, лиственница продвигается в верхние части склонов; площадь сосняков сократилась более чем вдвое (с 15,7 до 7,6 %).

Доля лесов по преобладающим породам: 2000–2004 и 2020–2024 гг.



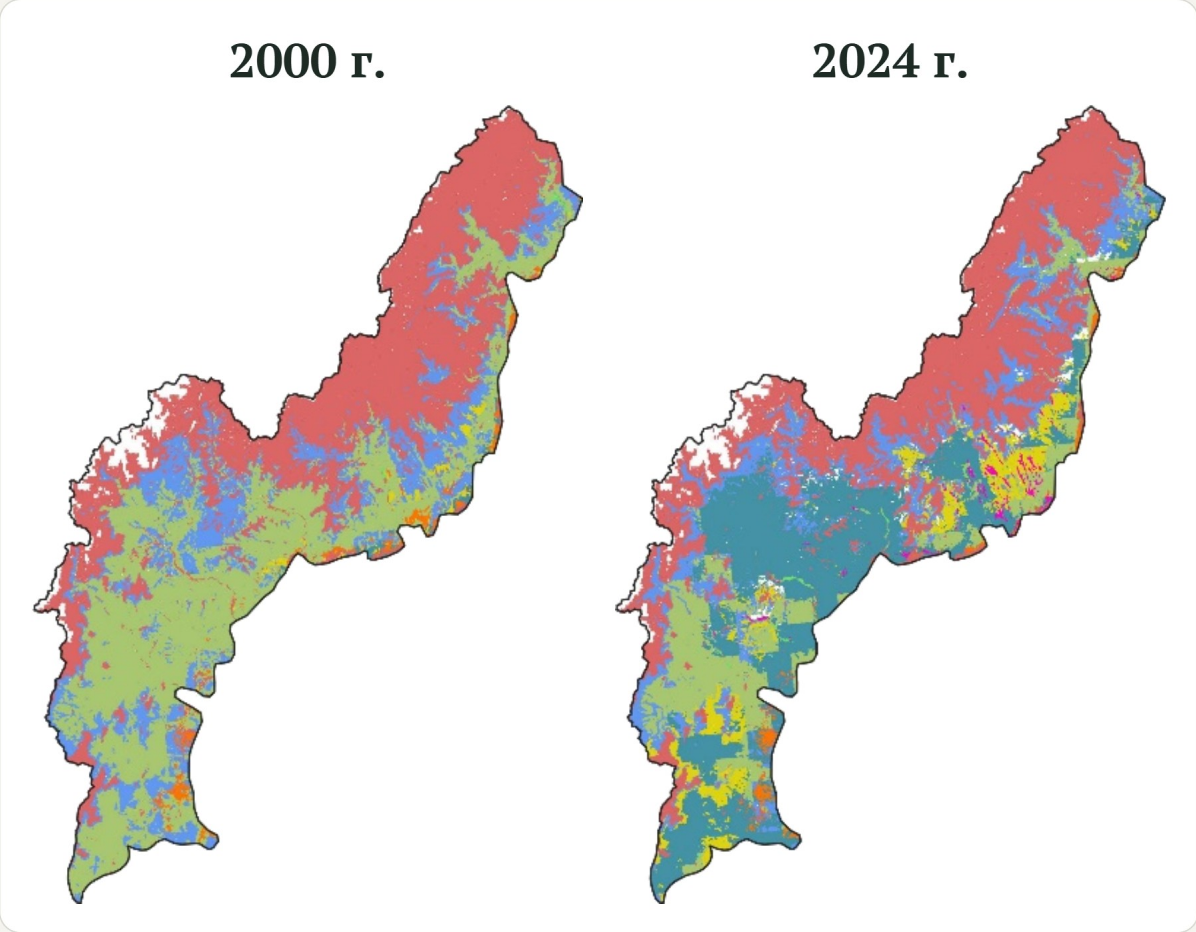
65,5 → 68,5 %

лесопокрытая площадь, 2001 → 2023 гг.

Тренды роста площади ельников, березняков, лиственничников и ерников, а также лесистости в целом достоверны (тест Манна–Кендалла, $p < 0{,}01$).

○ 2000–2004 гг. ● 2020–2024 гг.; в скобках — изменение, п.п. (по неокруглённым значениям таблиц)

Группы типов леса: 2000 и 2024 гг.

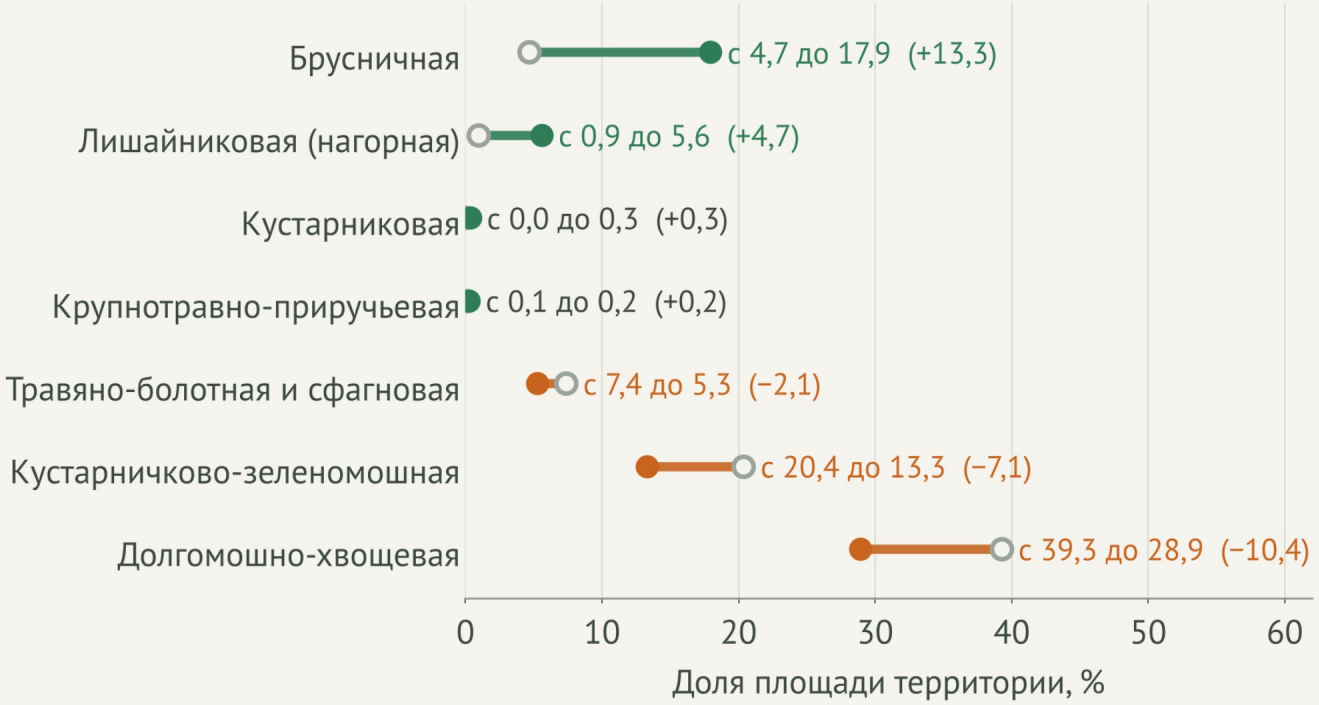


- безлесные территории
- лишайниковая (нагорная)
- брусничная
- кустарничково-зеленомошная
- крупнотравно-приручьевая
- долгомошно-хвощевая
- травяно-болотная и сфагновая
- кустарниковая

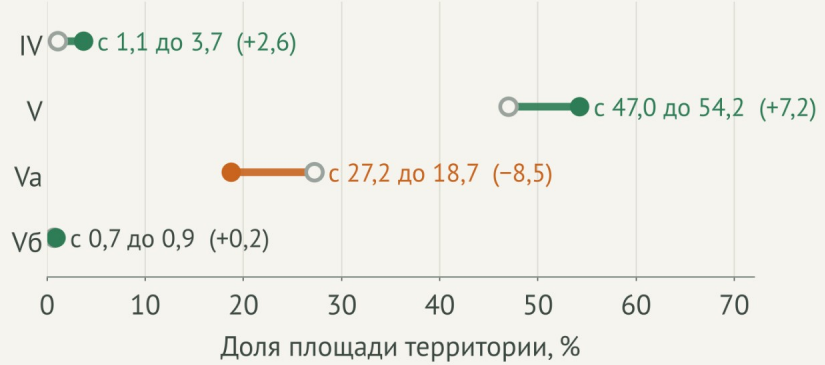
> Брусничная группа заняла значительную часть территории, ранее относившейся к долгомошно-хвощевой.

Смена групп типов леса и классов бонитета

Группы типов леса, % площади (2000–2004 → 2020–2024 гг.)

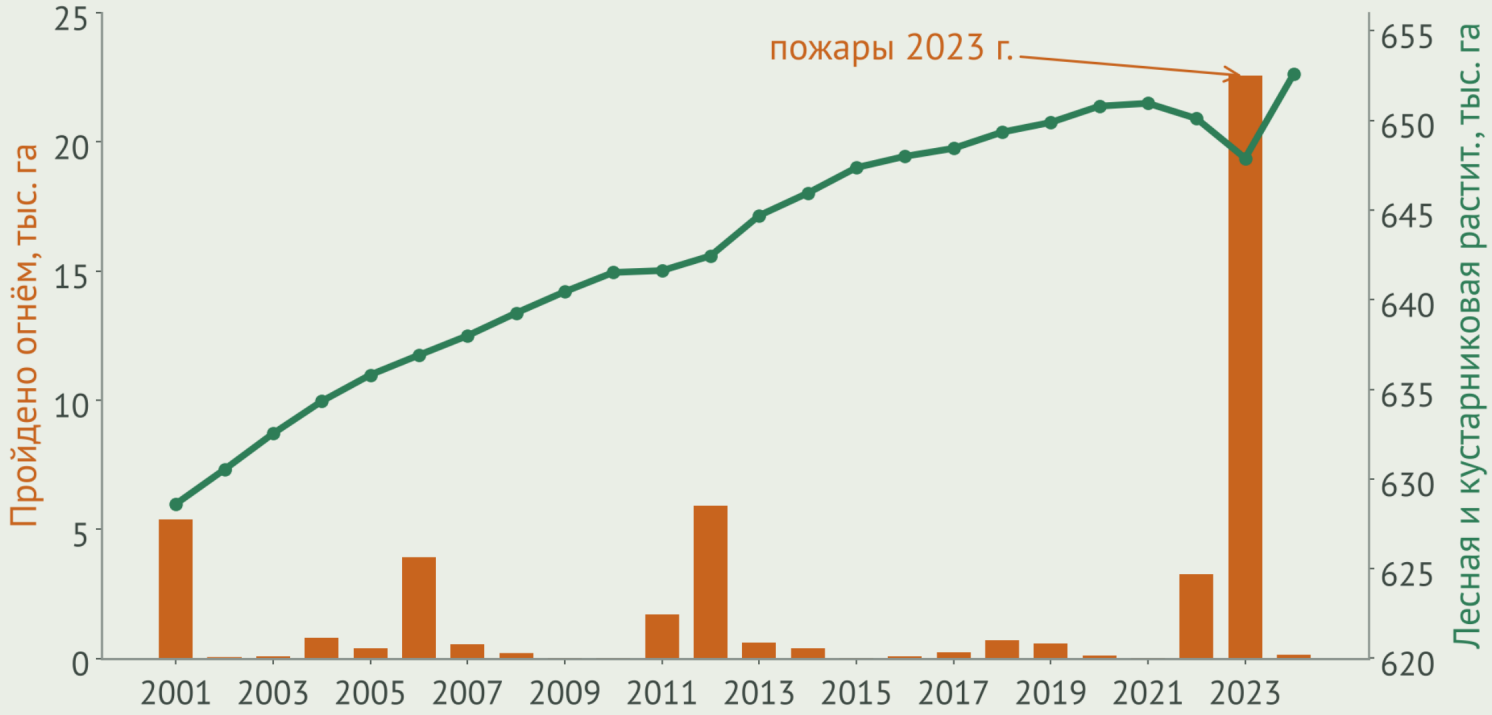


Классы бонитета, % площади



Местообитания смещаются от полугидроморфных к более автоморфным; растёт доля мезофитов (брусника, черника).

Рост площади лесной и кустарниковой растительности, 2001–2024 гг.



+3 п.п.

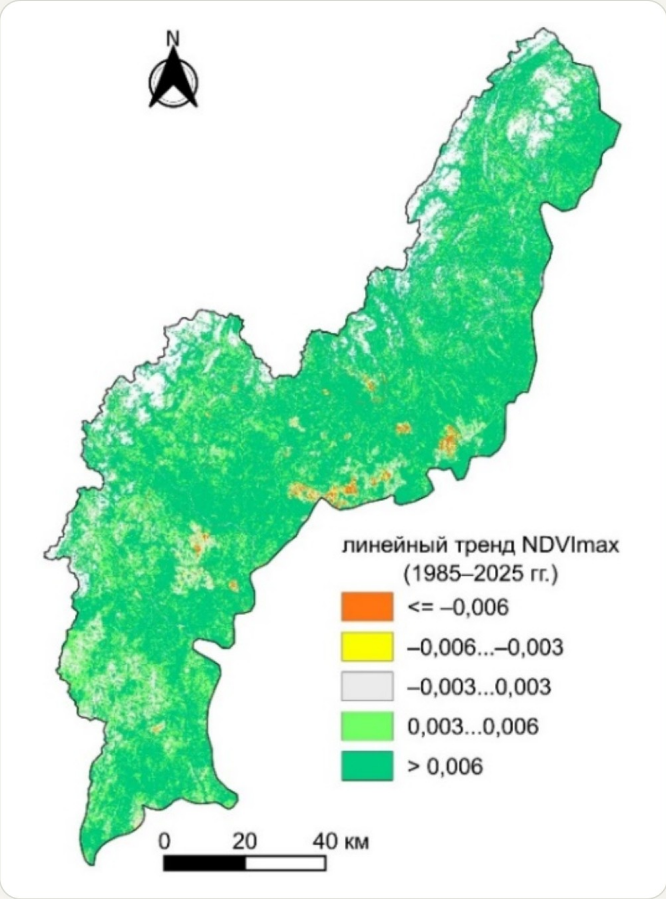
рост лесопокрытой площади: с 65,5 % (2001 г.) до 68,5 % (2023 г.)

2023 г.

кратковременное снижение после масштабных лесных пожаров

По оценке середины 2000-х гг. лесистость горной части Приполярного Урала — около 66% (Казанцева, Казанцев, 2010), что укладывается в полученный диапазон.

Тренды NDVImax за 1985–2025 гг.



Доля территории по интенсивности тренда (градация по Goetz et al., 2005), ед./год

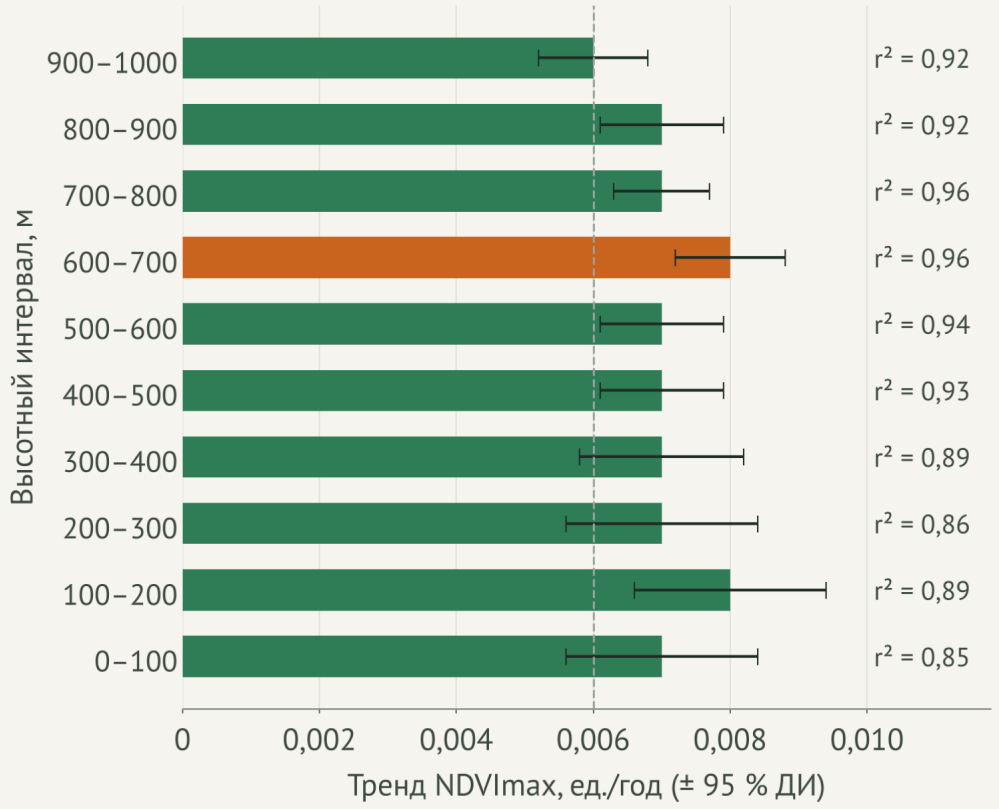
сильный рост: β > 0,006 — **68 %**

слабый рост: 0,003 < β ≤ 0,006 — **24 %**

несущественные или отрицательные: β ≤ 0,003 — **< 10 %**

> Рост NDVImax на Приполярном Урале интенсивнее, чем на Полярном Урале, где преобладают несущественные положительные изменения (до 0,003/год).

Тренд NDVImax на разных гипсометрических уровнях



0,008 / год

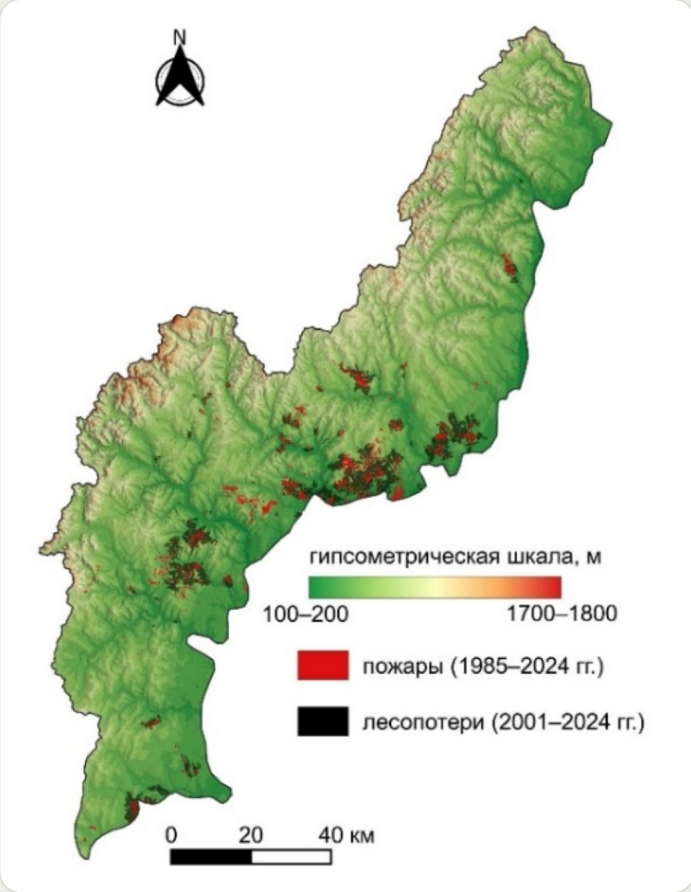
наиболее интенсивный и устойчивый рост NDVImax — на высотах 600–700 м, у верхней границы леса (95 % ДИ 0,0072–0,0088; $r^2 = 0,96$)

На всех высотах до 900 м тренд статистически значим (β = 0,007–0,008); в горной тундре 900–1000 м — слабее (0,006).

Аппроксимация линейной функцией надёжна: $r^2 = 0,85–0,96$; тест Манна–Кендалла 0,71–0,87 ($p < 0,01$).

Статистических различий динамики между высотными уровнями не выявлено (F-тест, $p > 0,05$).

Пожары и лесопотери



484 км²

лесопотери 2001–2024 гг. — 5,4 % покрытой растительностью территории

45 %

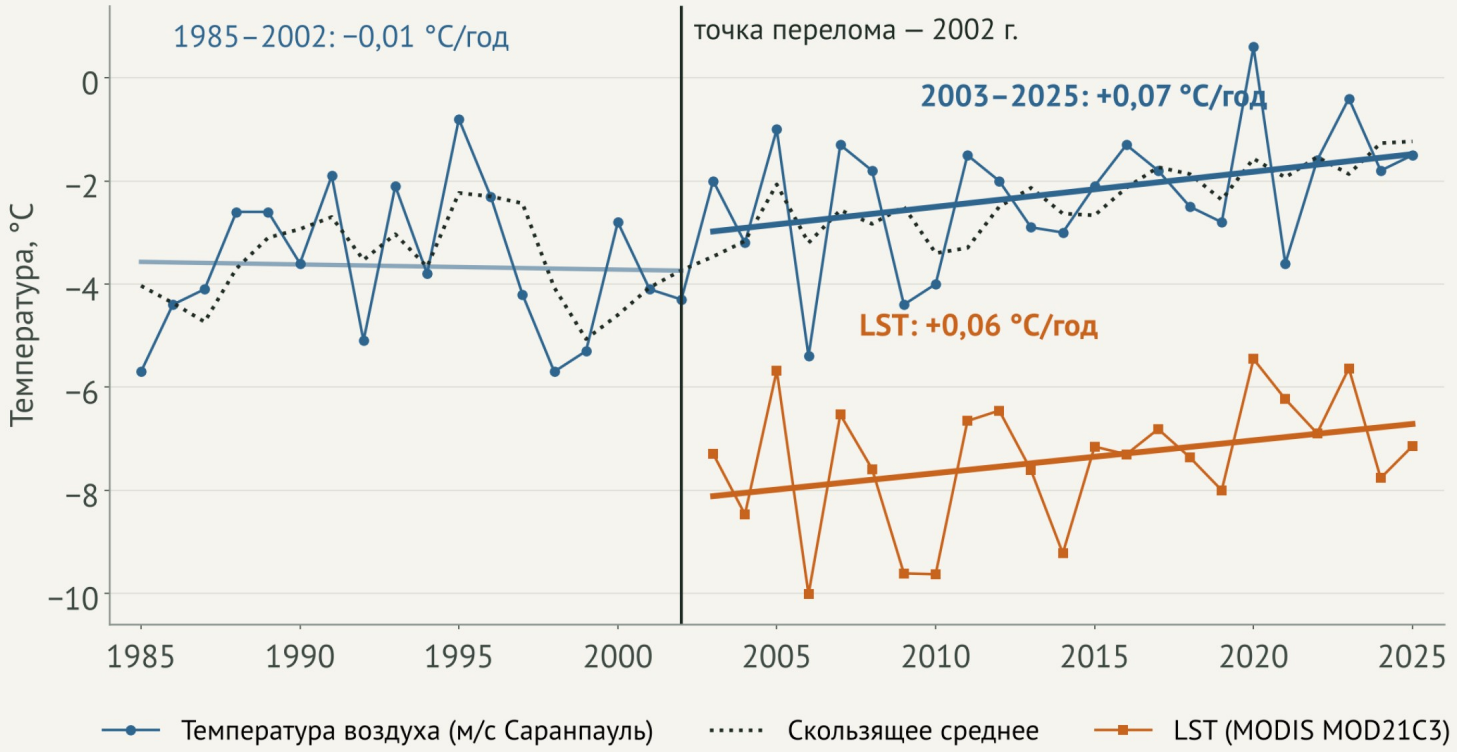
лесопотерь обусловлены пожарами ($r = 0{,}67$, $p < 0{,}05$)

Площадь гарей за 2000–2023 гг. — 117 км² (1,3 % территории). Значимого тренда нарушений нет: пожары и другие причины лесопотерь стихийны.

Степень воздействия пожаров по dNBR (годы с площадью пожаров > 10 км²), доля площади гарей

низкая (0,10–0,27)	**41,4–49,8 %**
низкая–средняя (0,27–0,44)	**32,8–37,2 %**
средняя–высокая (0,44–0,66)	**12,3–17,1 %**
высокая (> 0,66)	**2,1–4,3 %**

Потепление после 2002 г. и связь с NDVImax



−3,6 → −2,2 °C

средняя температура воздуха до и после 2002 г. (t-тест, p < 0,01)

0,66 → 0,71

среднее NDVImax за те же периоды

r = 0,56

корреляция NDVImax с температурой воздуха (p < 0,05); со скользящим средним — 0,68 (p < 0,01)

Связи с осадками не выявлено.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы

1. Лесопокрытая площадь выросла с 65,5 до 68,5 %: растёт доля ельников (+4,2 п.п.), берёзовых (+2,3) и лиственничных (+1,5) лесов и ерников, сокращаются сосняки (−8,1).
2. Местообитания смещаются к более автоморфным: брусничная группа +13,3 п.п., лишайниковая +4,7; долгомошно-хвощевая −10,4, сфагновая −2,1.
3. NDVImax растёт на 68 % территории (тренд > 0,006/год); наиболее интенсивный рост (0,008/год) — у верхней границы леса, на высотах 600–700 м.
4. Снижение фитомассы локально и связано прежде всего с пожарами (45 % лесопотерь); преобладают пожары с низким уровнем воздействия на растительность (по dNBR).
5. После 2002 г. потепление ускорилось (+0,07 °C/год), рост NDVImax связан с температурой (r = 0,56–0,68) — подтверждается климатогенное продвижение леса вверх по склонам.

Работа выполнена при поддержке РНФ, проект № 26-77-00090 «ГИС-анализ современной динамики растительного покрова Полярного Урала»