Двадцать четвертая международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

Классификация состояния лесных насаждений по динамике спектральных индексов

Мартинов А.О., Катковский Л.В., Станчик В.В.

Научно-исследовательское учреждение
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ИМЕНИ А.Н. СЕВЧЕНКО»
Белорусского государственного университета

ИКИ РАН, Москва · 9-13 ноября 2026 г.

Классификация состояния насаждений по динамике спектральных индексов

Цель работы

Разработать алгоритм классификации состояния лесных насаждений на основе совместного анализа временной динамики спектральных индексов NDVI и NDMI.

Экспериментальная проверка

Применить алгоритм к данным и сопоставить полученные тематические маски с признаками усыхания, наблюдаемыми на RGB-ортофотопланах БПЛА

Участок	Sentinel-2	БПЛА RGB
А: усыхания	2023–2025	2024
Б: усыхания	2023–2025	2024
В: нет усыхания	2023–2025	2023

А и Б — усыхания видны на ортофото. В — без выявленного ухудшения по временному анализу.

Алгоритм: от временного ряда к карте классов динамики спектральных индексов

1 Совмещение и контроль качества

Единая геопривязка; исключение облаков, теней и NoData на любой дате.

2 Расчёт NDVI и NDMI

Для каждого пикселя - не менее трёх чистых наблюдений.

3 Оценка линейного тренда

$I(t) = G \cdot t + b$; G в сутки$^{-1}$. Порог допуска: $R^2 \geq 0{,}60$.

4 Объединение двух индексов

Класс по G; итог с учётом класса, весов и R^2. Нет допустимого тренда → нет класса.

Классы динамики спектральных индексов

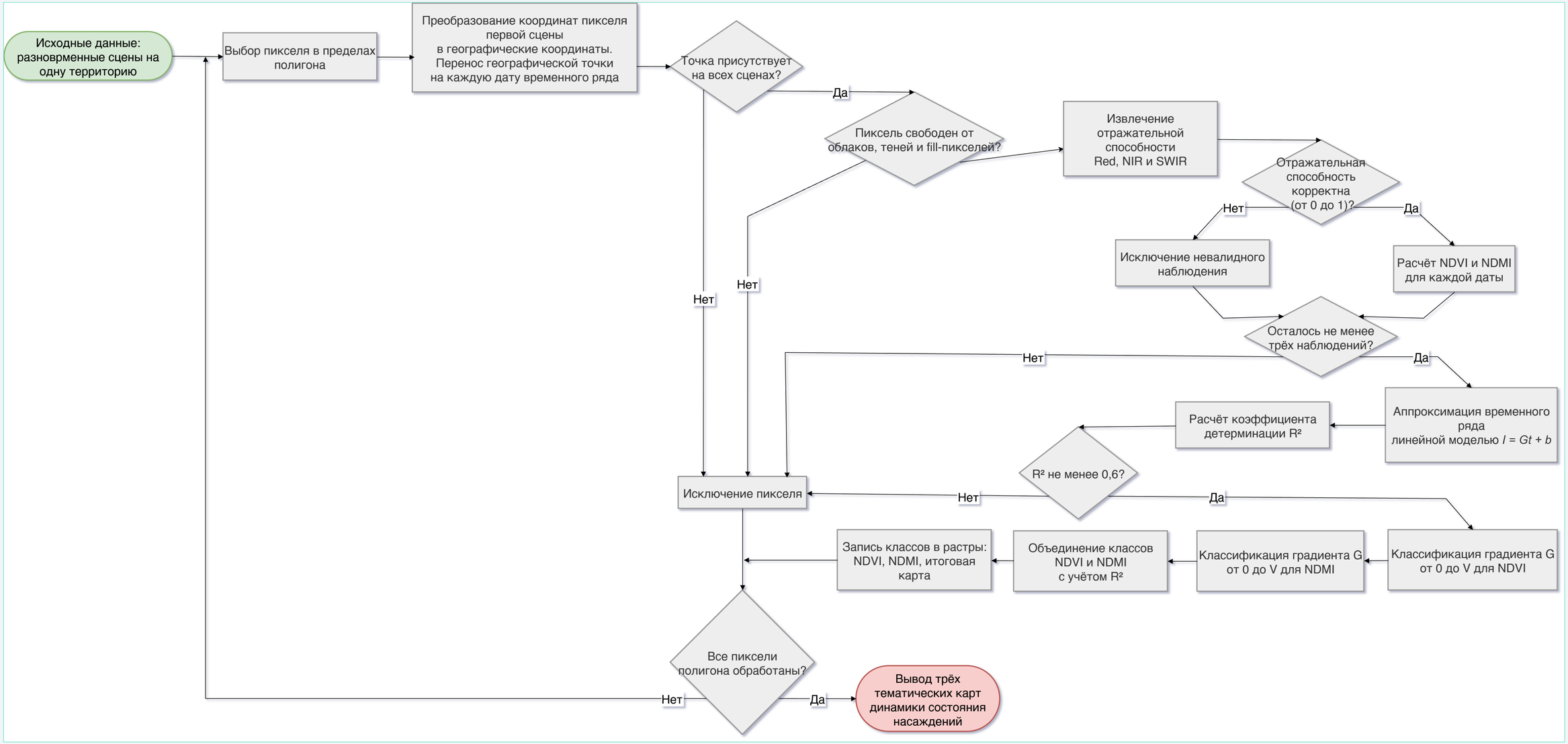
Класс	G, сутки$^{-1}$	Изменение индекса за год
0	$G \geq +0{,}00005$	от +0,018 и выше
I	$-0{,}00005 \leq G < +0{,}00005$	± 0,018
II	$-0{,}00010 \leq G < -0{,}00005$	-0,018 ... -0,036
III	$-0{,}00020 \leq G < -0{,}00010$	-0,036 ... -0,073
IV	$-0{,}00040 \leq G < -0{,}00020$	-0,073 ... -0,146
V	$G < -0{,}00040$	от -0,146 и ниже

0 – положительная динамика;
I – слабая динамика;
II–V – возрастающая выраженность снижения индексов;
Не определён – облачность / отсутствие явного тренда.

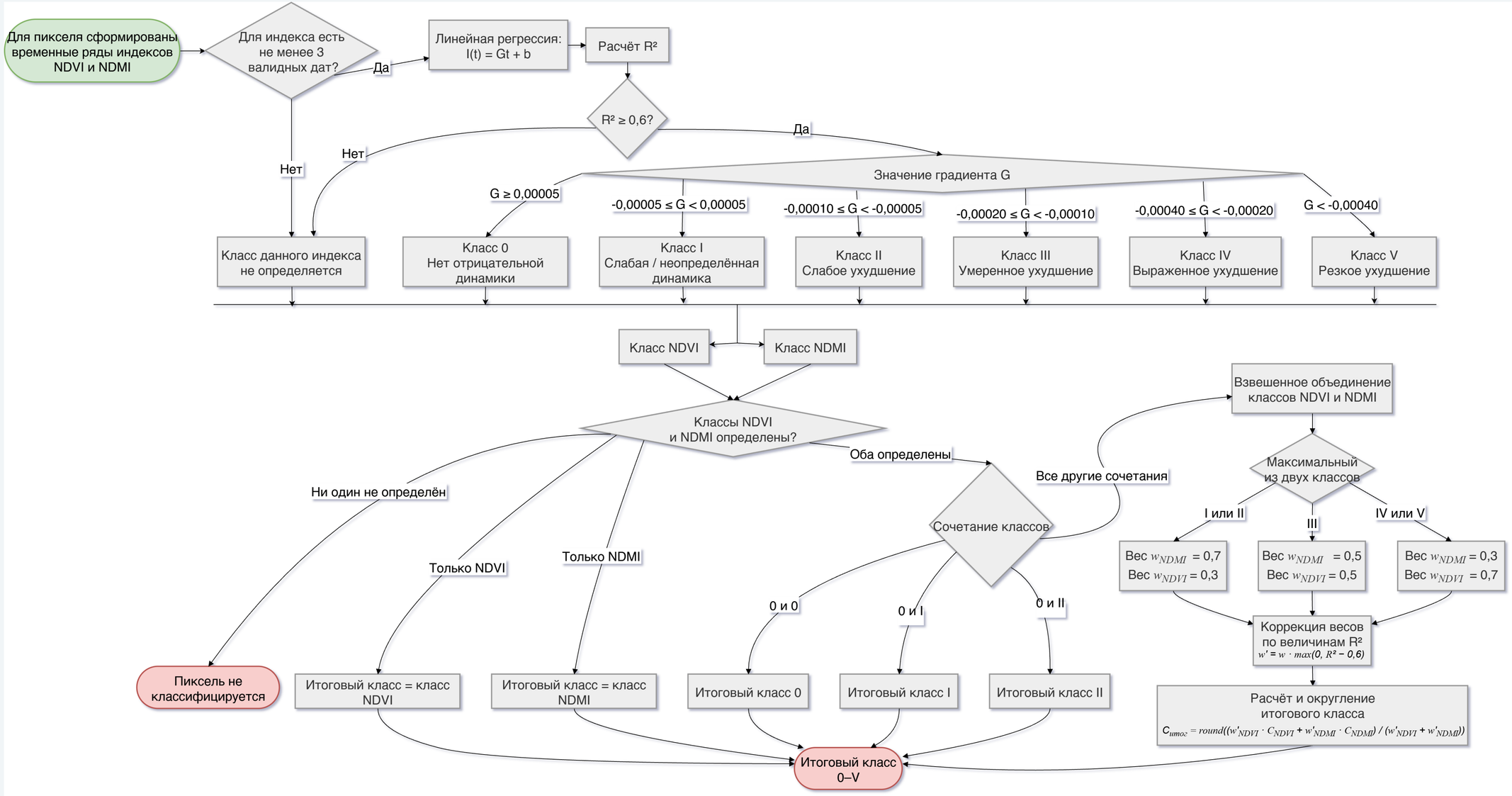
Карта с классами отражает динамику за период, а не санитарное состояние каждого дерева на одну дату.

Мартинов А.О., Катковский Л.В., Станчик В.В. • НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ • remsens@mail.ru

Блок-схема формирования временного ряда и расчета трендов для отдельного пикселя



Логика объединения классов NDVI и NDMI в итоговый тематический класс динамики



Пространственная картина и динамика индексов

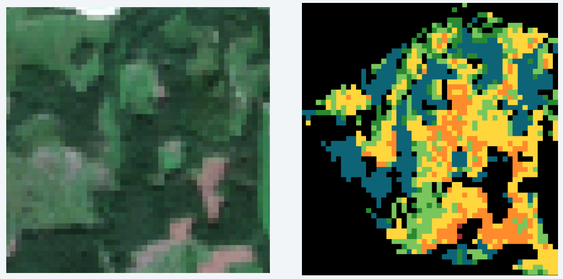
Легенда

- 0 - Растет
- I - Стабильно
- II - Слабое ухудшение
- III - Умеренное ухудшение
- IV - Сильное ухудшение
- V - Очень сильное ухудшение

А (Борисовское лесничество) / Участок с усыханиями

Lat: 54.34433705°N, Lon: 28.44900165°E

Sentinel-2, 2024 г. 2023–2025 гг.

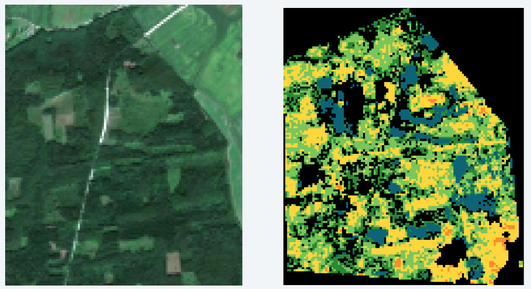


Есть RGB-ортофото БПЛА 2024 г.

Б (Неманицкое лесничество) / Участок с усыханиями

Lat: 54.30472046°N, Lon: 28.65539551°E

Sentinel-2, 2024 г. 2023–2025 гг.

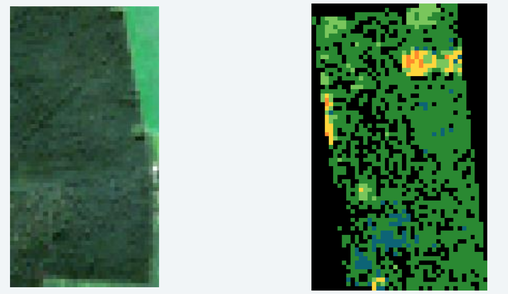


Есть RGB-ортофото БПЛА 2024 г.

В / Участок для сравнения. Неусыхающий лес

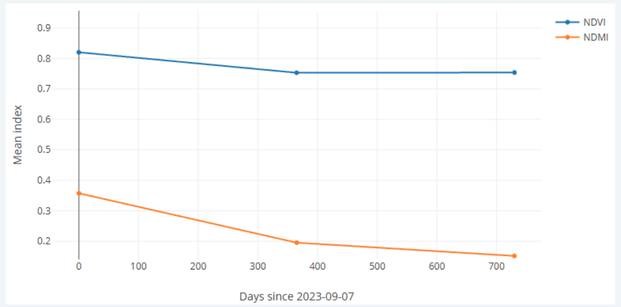
54.32017309°N , Lon: 28.53655424°E

Sentinel-2, 2024 г. 2023–2025 гг.

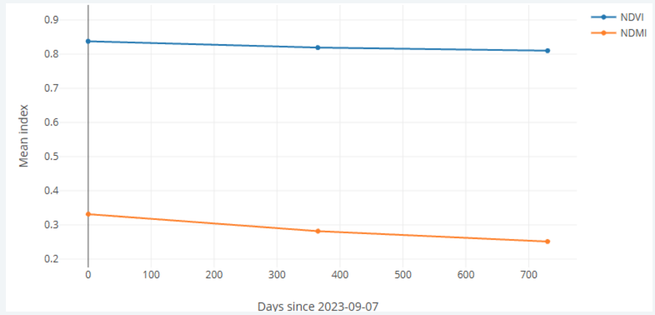


Есть RGB-ортофото БПЛА 2023 г.

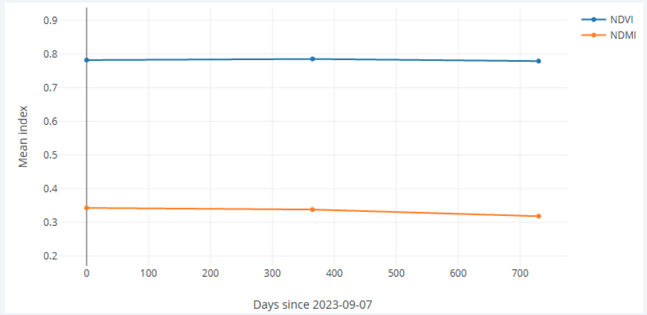
А – Динамика NDVI и NDMI



Б – Динамика NDVI и NDMI



В – Динамика NDVI и NDMI

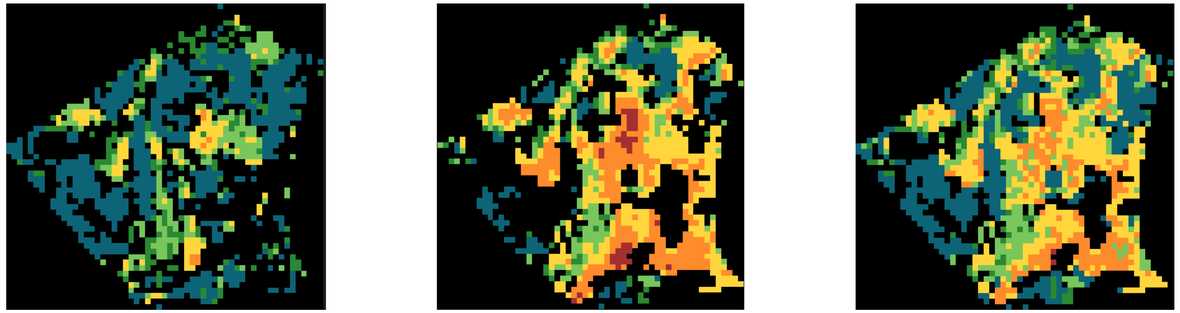


Мартинов А.О., Катковский Л.В., Станчик В.В. • НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ • remsens@mail.ru

Сравнение классификации по NDVI, NDMI и объединённому показателю

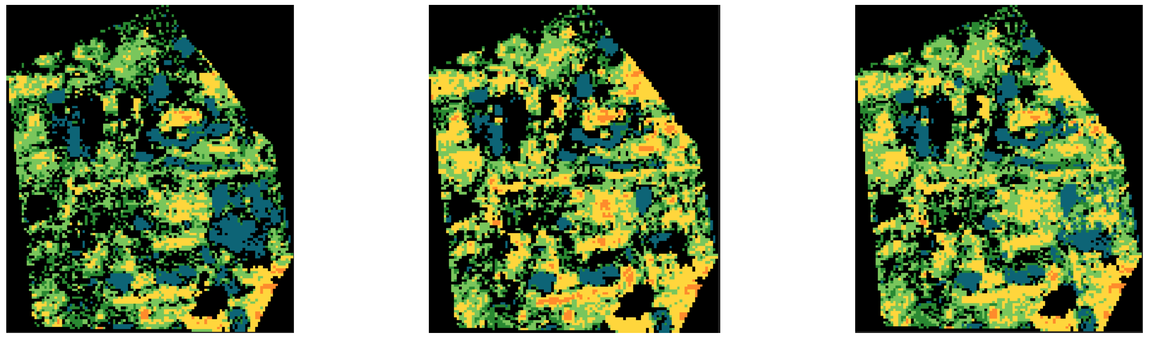
1 А (Борисовское лесничество)

NDVI | NDMI | NDVI + NDMI



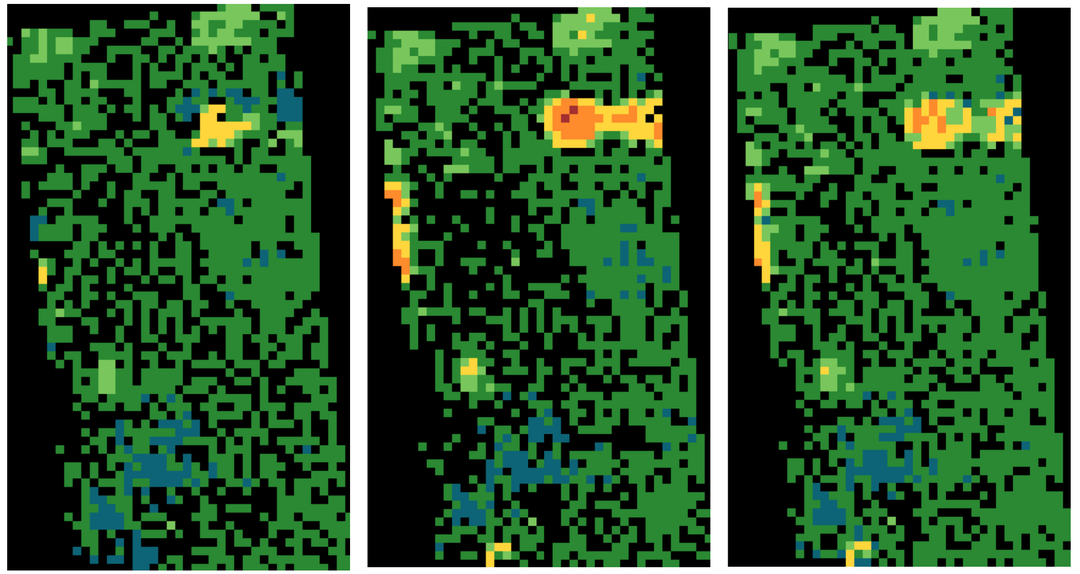
2 Б (Неманицкое лесничество)

NDVI | NDMI | NDVI + NDMI



3 В

NDVI | NDMI | NDVI + NDMI



Временной ряд снимков Sentinel-2

2 А (Борисовское лесничество) · карта классов динамики · временной ряд



1 Б (Неманицкое лесничество) · карта классов динамики · временной ряд



3 В · карта классов динамики · временной ряд



Анализ снимков

ПЕРИОД 2023 · 2024 · 2025

ИНДЕКСЫ Агрегированный NDVI и NDMI

ОЦЕНКА ДИНАМИКИ

А – санитарные вырубки каждый год подтверждают патологию данного участка

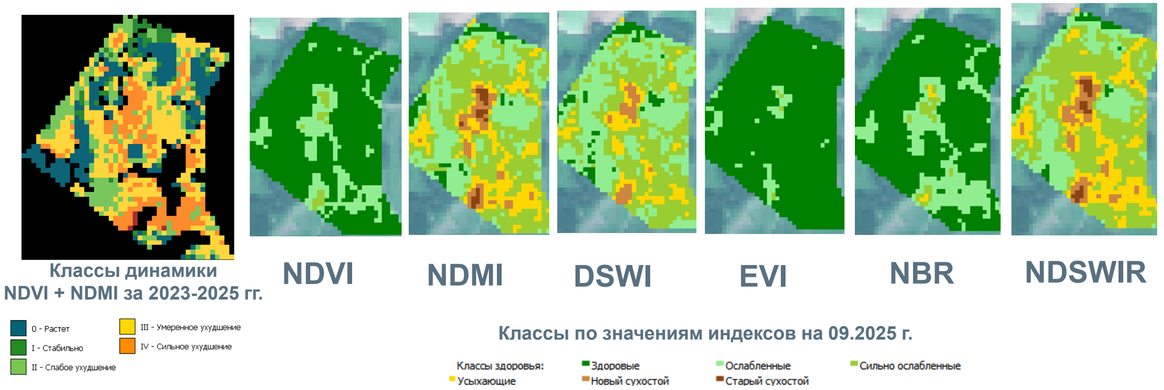
Б – количество санитарных вырубок значительно меньше. Это не противоречит более слабой динамике усыханий по трендовой карте классов

В – доминирующий класс стабильности лесного покрова на трендовой карте подтверждается визуальными наблюдениями

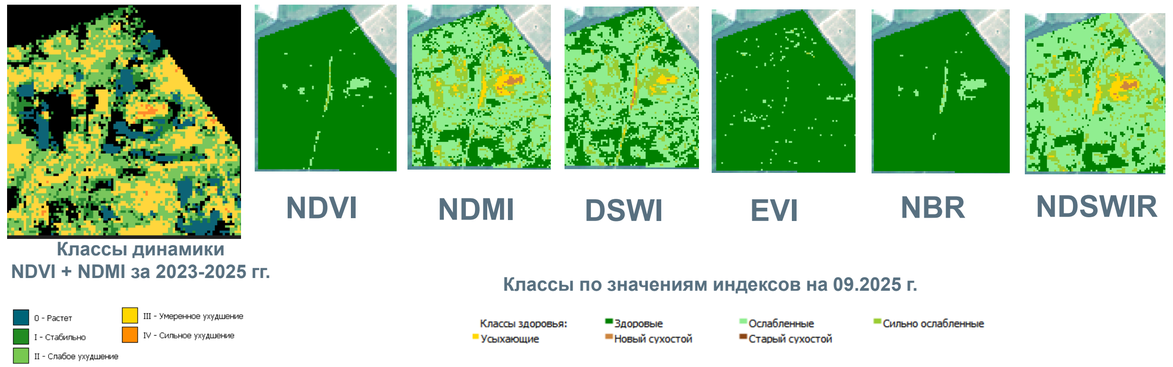
Мартинов А.О., Катковский Л.В., Станчик В.В. • НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ • remsens@mail.ru

Сравнение с масками индексов за 2025 г.

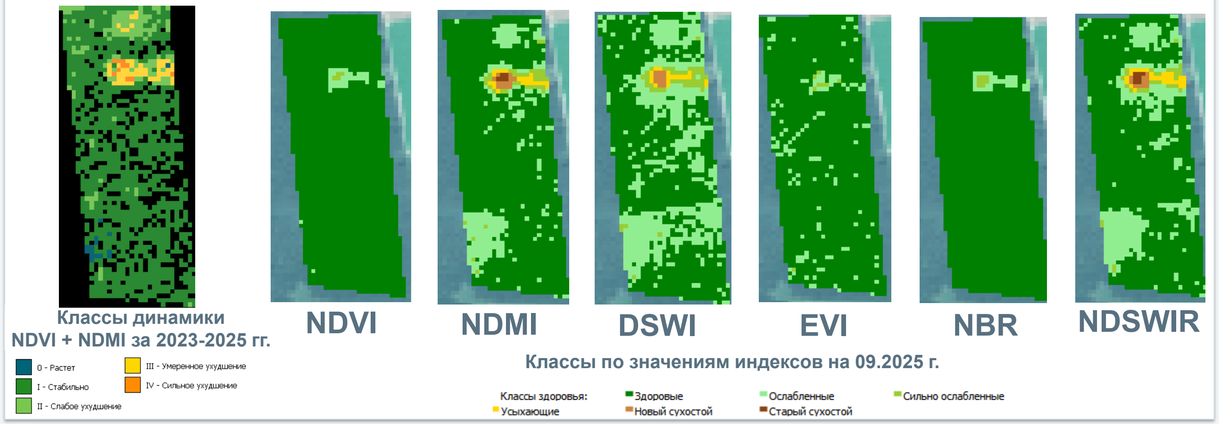
2 А (Борисовское лесничество) · карта классов динамики · маски индексов на 09.2025



1 Б (Неманицкое лесничество) · карта классов динамики · маски индексов на 09.2025



3 В · временной ряд · карта классов динамики · маски индексов на 09.2025



Анализ классификации по индексам и временным рядам

ПЕРИОД — **2023 · 2024 · 2025**

ИНДЕКСЫ — Совместная классификация по трендам NDVI и NDMI · NDVI · NDMI · DSWI · EVI · NBR · NDSWIR

А – наиболее выраженные различия между индексами: маски NDVI и NBR преимущественно зелёные, тогда как DSWI, EVI и NDSWIR выделяют больше областей жёлтых, оранжевых и коричневых оттенков

Б – различия сохраняются, но тёплые оттенки выражены слабее, чем на участке А.

В – Все индексные маски преимущественно зелёные. На всех кроме EVI четко выделяется область с вырубкой леса.

Одномоментная классификация существенно зависит от индекса и выбранных порогов. Анализ временной динамики дополняет её, характеризуя направление изменений за 2023–2025 гг., а не только значения индексов на конечную дату

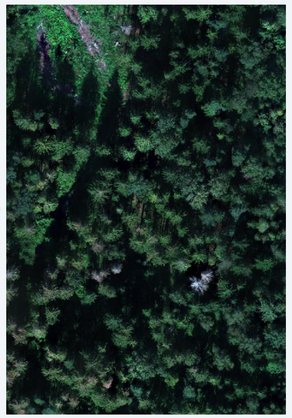
Мартинов А.О., Катковский Л.В., Станчик В.В. • НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ • remsens@mail.ru

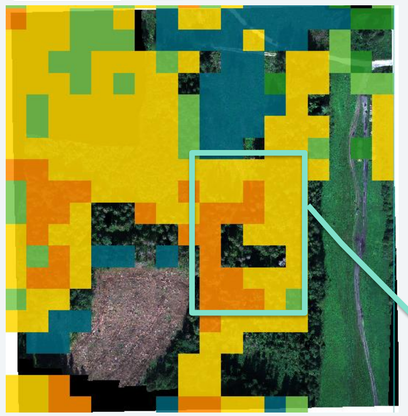
Сопоставление карты классов динамики спектральных индексов с ортофотопланами БПЛА

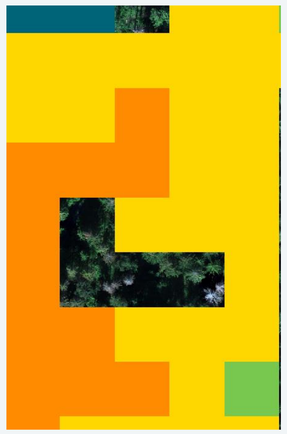
А (Борисовское лесничество) / Участок с усыханиями



Ортофотоплан:
29.08.2024





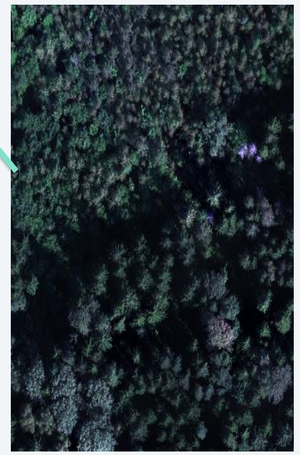


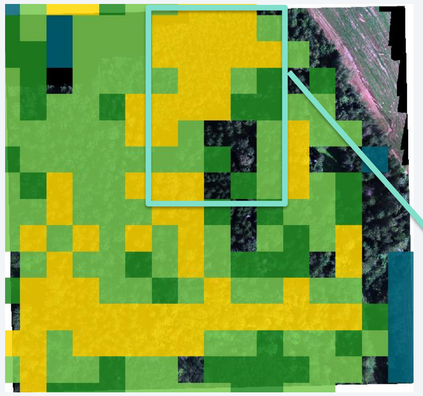
Карта классов динамики построена на основе снимков Sentinel-2:
07.09.2023
06.09.2024
06.09.2025

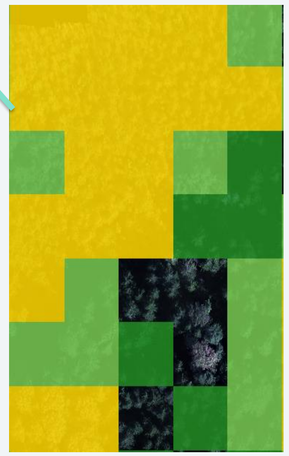
Б (Неманицкое лесничество) / Участок с усыханиями



Ортофотоплан:
29.08.2024





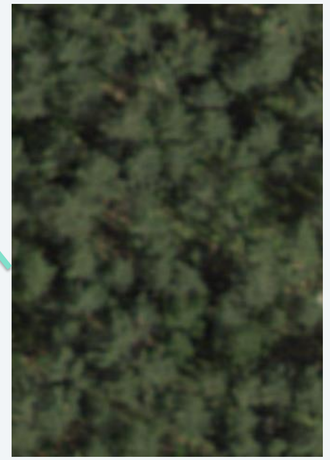


Карта классов динамики построена на основе снимков Sentinel-2:
07.09.2023
06.09.2024
06.09.2025

В / Участок без усыханий для сравнения

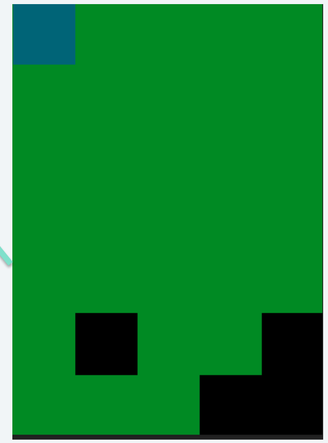


Ортофотоплан:
03.07.2023





Карта классов динамики построена на основе снимков Sentinel-2:
07.09.2023
06.09.2024
06.09.2025



Мартинов А.О., Катковский Л.В., Станчик В.В. • НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ • remsens@mail.ru

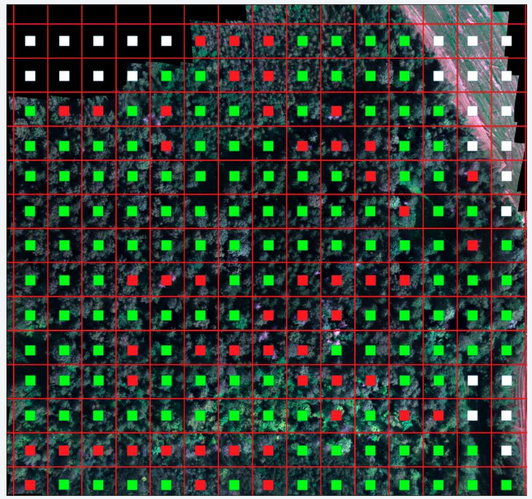
Валидация по ортофотопланам БПЛА

Методика проверки

Ортофотоплан независимо дешифрировался в пределах сетки, совпадающей с пиксельной сеткой карты классов динамики по данным Sentinel-2. Ячейка относилась к классу наличия усыхания при обнаружении хотя бы одной визуально различимой сухой кроны. Полученная разметка сопоставлялась с бинарной маской отрицательной динамики спектральных индексов. Неклассифицированные пиксели исключались из оценки

Неманицкое лесничество

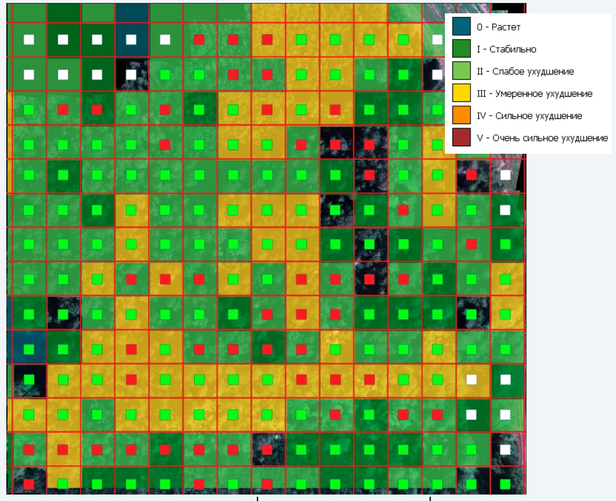
Ручная разметка 2024 г.



■ - есть сухие кроны ■ - нет сухих крон

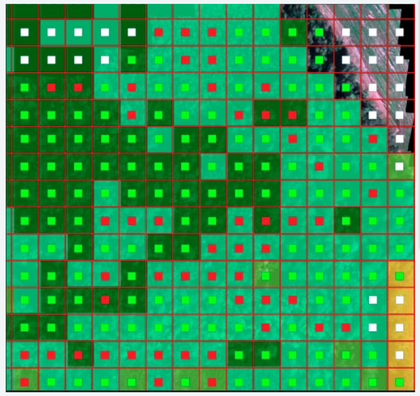
По ортофотоплану	Отрицательная динамика	Стабильность / рост	Всего
Есть видимые усыхания	40 — верное выделение, TP	3 — пропуск, FN	43
Нет видимых усыханий	95 — несовпадение, FP	27 — верное отрицательное решение, TN	122
Всего	135	30	165

Классы динамики NDVI + NDMI за 2023-2025 гг.

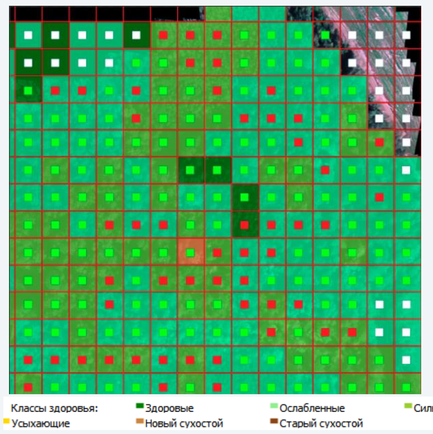


Показатель	Расчёт	Результат
Полнота выявления усыханий — Recall	40/43	93,0%
Точность положительных выделений — Precision	40/135	29,6%
Специфичность — распознавание ячеек без усыханий (Specificity (TNR))	27/122	22,1%
Общая доля совпадений — Accuracy	67/165	40,6%
F1 — совместная оценка Precision и Recall	80/178	44,9%
Сбалансированная точность	Среднее Recall и специфичности	57,6%

DSWI 2024 г.



DSWI 2025 г.



Сравнение размеченных данных БПЛА с маской индекса DSWI

DSWI выбран как пример одномоментной классификации: при принятых порогах его маска выделяла как благополучные, так и неблагополучные участки, тогда как маски некоторых других индексов преимущественно относили территорию к одному классу

- маска DSWI за 2025 г. приведена для визуального сравнения;
- показатели точности рассчитаны для 2024 г.

По ортофотоплану	«Нездоровый» по DSWI 2024	«Здоровый» по DSWI 2024	Всего
Есть видимые усыхания	44 — верное выделение	7 — пропуск	51
Нет видимых усыханий	78 — ложноположительное выделение относительно эталона	51 — верное отрицательное решение	129

Показатель	Тренд 2023–2025	DSWI 2024
Полнота выявления усыханий, Recall	93,0%	86,3%
Точность положительных выделений, Precision	29,6%	36,1%
Специфичность - распознавание ячеек без усыханий, Specificity	22,1%	39,5%
Общая доля совпадений, Accuracy	40,6%	52,8%
F1	44,9%	50,9%
Сбалансированная точность	57,6%	62,9%
Число оценённых ячеек	165	180

Результат

Отрицательная динамика выявлена в 40 из 43 ячеек с видимыми усыханиями, что соответствует полноте 93,0%. Вместе с тем в 95 ячейках отрицательная динамика не сопровождалась наличием сухих крон на ортофотоплане. Таким образом, карта классов динамики спектральных индексов характеризуется высокой полнотой охвата видимых усыханий, но низкой избирательностью относительно принятого эталонного признака

ВАЖНО: ортофото 2024 г. не позволяет установить, что произошло в этих 95 ячейках к 2025 г.

Мартинов А.О., Катковский Л.В., Станчик В.В. • НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ • remsens@mail.ru

Основные результаты и границы применимости

Количественная проверка

Выполнена предварительная количественная проверка по независимой разметке ортофотоплана. Полученные оценки характеризуют результаты на исследованном участке и требуют уточнения на расширенной выборке

Эталон: наличие хотя бы одной видимой сухой кроны в ячейке.

Тренды NDVI + NDMI · 2023–2025

93,0% / 57,6%

Полнота / сбалансированная точность

DSWI · 2024

86,3% / 62,9%

Полнота / сбалансированная точность

Высокая полнота сопровождается большим числом выделений без видимых сухих крон.

Выводы

- Разработан алгоритм совместной классификации по трендам NDVI и NDMI; построены карты динамики за 2023–2025 гг.
- Трендовый анализ дополняет одномоментную классификацию, но не заменяет проверку состояния леса
- Предварительная проверка показала, что трендовая маска охватывает большинство ячеек с видимыми усыханиями: полнота составила 93,0%, сбалансированная точность 57,6%. Вместе с тем значительная часть выделений не подтверждается наличием сухих крон на ортофотоплане 2024 г. Это определяет необходимость, в первую очередь, сбора большего числа данных для валидации метода, а также дальнейшей проверки и уточнения правил классификации

Практическое применение

- Картографирование направления и выраженности изменений индексов.
- Предварительное выделение участков для проверки и полевого обследования.
- Совместная интерпретация со снимками БПЛА и лесопатологическими данными.

Ограничения метода и проведенного исследования

- БПЛА: только 2024 г.; нет проверки изменений 2025 г.
- Участок В не обследован по БПЛА.
- При одной сцене в год — всего 3 точки тренда.
- Стабильные индексы не исключают уже существующий сухостой.

Контакты

НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ

Отдел аэрокосмических исследований

Минск, Республика Беларусь

+375 (17) 368 67 96

remsens@mail.ru · remsens.by