XXIV международная конференция
«СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА»
9 - 13 ноября 2026 г.

Методика мультисенсорного анализа постпирогенной динамики бореальных лесов

Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А. В., Кирбижекова И.И., Балтухаев А. К., Дамдинов З.Ш.
ИФМ СО РАН, г. Улан-Удэ,

Проблема и цель

Проблема

- Оптика смешивает сигналы хвойного подроста, лиственного подлеска, травы и кустарника
- Global Forest Change: восстановление кумулятивно и с ошибками
- Оптика слабо чувствительна к росту биомассы под сомкнутым пологом

Цель

Разработать методику анализа долговременных мультисенсорных рядов ДЗЗ для выделения неоднородности и траекторий постпирогенного восстановления бореальных лесов

Пример: пожар 2003 г., окрестности Улан-Удэ

Полигон и данные

Гарь 2003 г., светлохвойный лес, 51,90° с. ш., 107,64° в. д. Есть искусственные посадки, фрагментарное и плотное естественное возобновление.

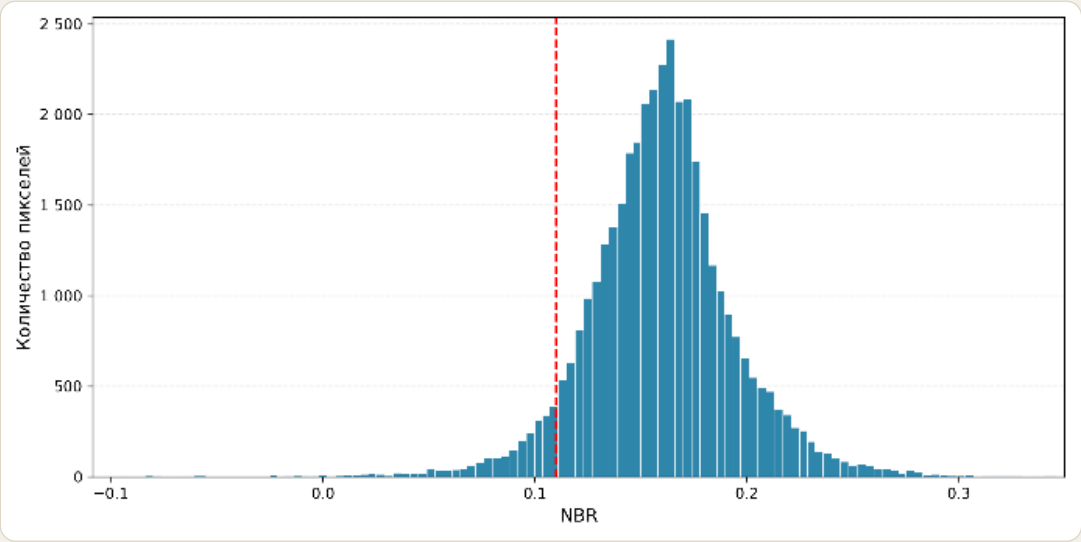
Спутник	Тип данных	Признаки
Landsat 5–9	Оптика, 30 м	NDVI, NBR: лето и зима
Sentinel-2	Оптика, 10–20 м	NDVI, NBR: лето и зима
ALOS-2 PALSAR-2	Радар L-диапазона, 25 м	HV, HH: летние композиты
Sentinel-1	Радар C-диапазона, 20 м	VH, VV: годовые медианы

12 признаков: 8 оптических и 4 радарных · период 2016–2021 гг. (одновременная работа всех сенсоров)

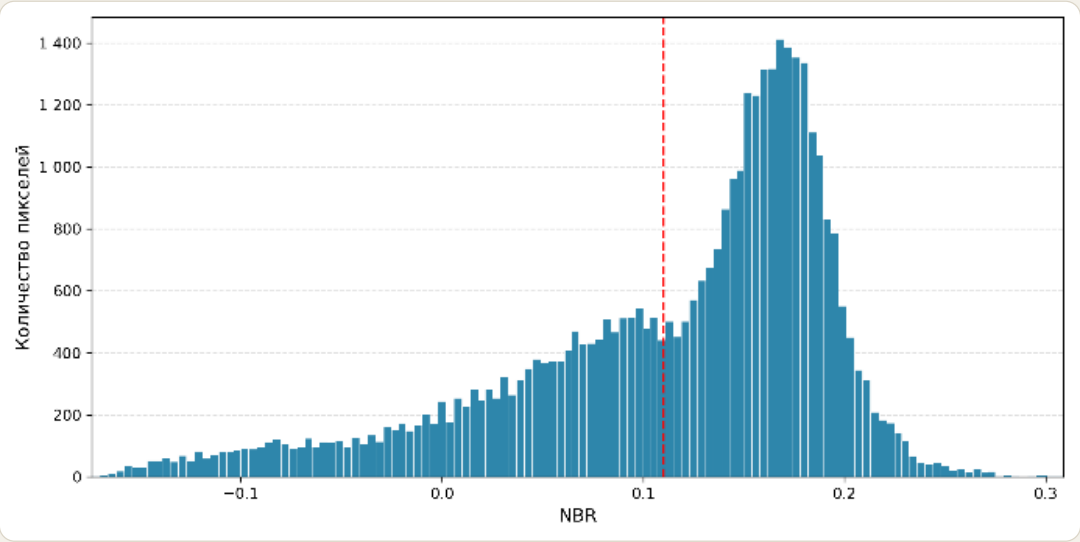
Методика обработки в GEE

1	**Маска хвойного леса**	Медианы NDVI в переходные периоды, порог NDVI > 0,3; 1990–2000 гг.
2	**Маска потерь 2003 г.**	NBR ниже 0,11: минимум между модами бимодальной гистограммы
3	**Стек из 12 признаков**	Параметры линейного тренда каждого признака за 2016–2021 гг.
4	**Метод главных компонент**	Корреляционная матрица, отбор первых трёх компонент
5	**Каскадный K-Means**	Число кластеров по индексу Калински–Харабаша, без обучающих выборок

Выбор порога NBR для маски потерь



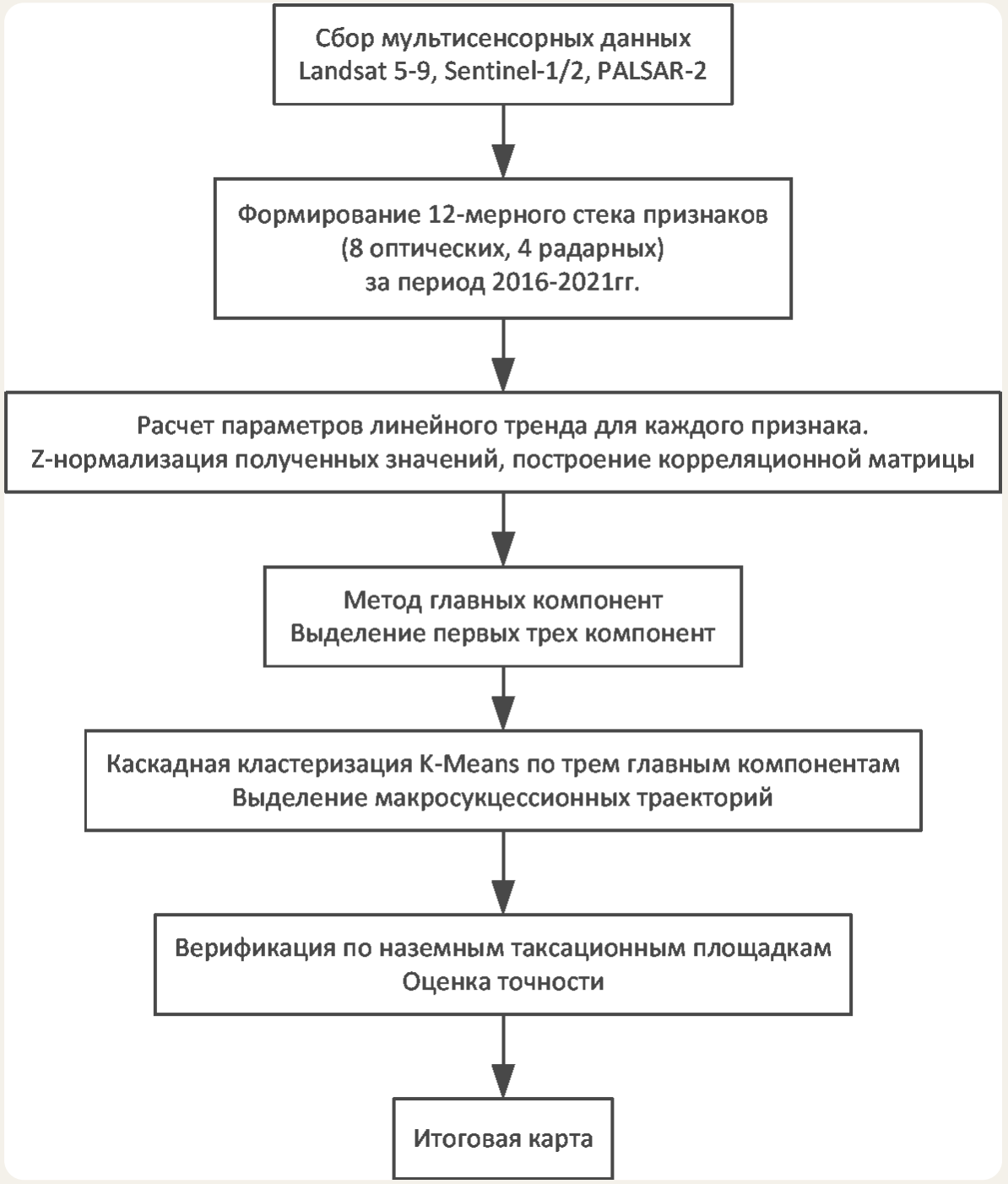
а) до пожара: одна мода



б) после пожара 2003 г.: две моды

Порог NBR = 0,11 выбран в локальном минимуме между модами. Маска потерь = маска хвойного леса ∩ NBR ниже порога: это исключает воду, пашню и застройку.

Блок-схема анализа



Факторные нагрузки первых трех главных компонент (2016–2021 гг.)

Исходный признак (тренд)	Нагрузка на PC1	Нагрузка на PC2	Нагрузка на PC3
Sentinel-2_Лето NBR	**-0,81**	0,12	0,00
Landsat_Лето NBR	**-0,73**	-0,08	0,25
PALSAR_HV (Радар L-band)	**-0,68**	-0,25	-0,13
PALSAR_HH (Радар L-band)	**-0,62**	-0,25	-0,14
Sentinel-2 Лето NDVI	-0,41	**0,63**	0,20
Sentinel-2 Зима NBR	0,38	**0,63**	-0,12
Landsat Зима NDVI	-0,29	**0,51**	-0,10
Landsat Зима NBR	-0,07	-0,37	**0,54**
Sentinel-1 VH (Радар C-band)	-0,34	-0,16	**-0,52**
Sentinel-1 VV (Радар C-band)	-0,15	-0,24	**-0,48**
Landsat Лето NDVI	-0,38	0,08	**0,48**
Sentinel-2 Зима NDVI	-0,45	0,48	-0,17

Физический смысл главных компонент

PC1

Интегральное восстановление

Проективное покрытие и биомасса молодняка

NBR лето: Sentinel-2 −0,81, Landsat −0,73
PALSAR: HV −0,68, HH −0,62

PC2

Хвоя на фоне снега

Хвойный подрост отделяется от лиственных пород и кустарников

Sentinel-2: NBR зима 0,63, NDVI лето 0,63
Landsat: NDVI зима 0,51

PC3

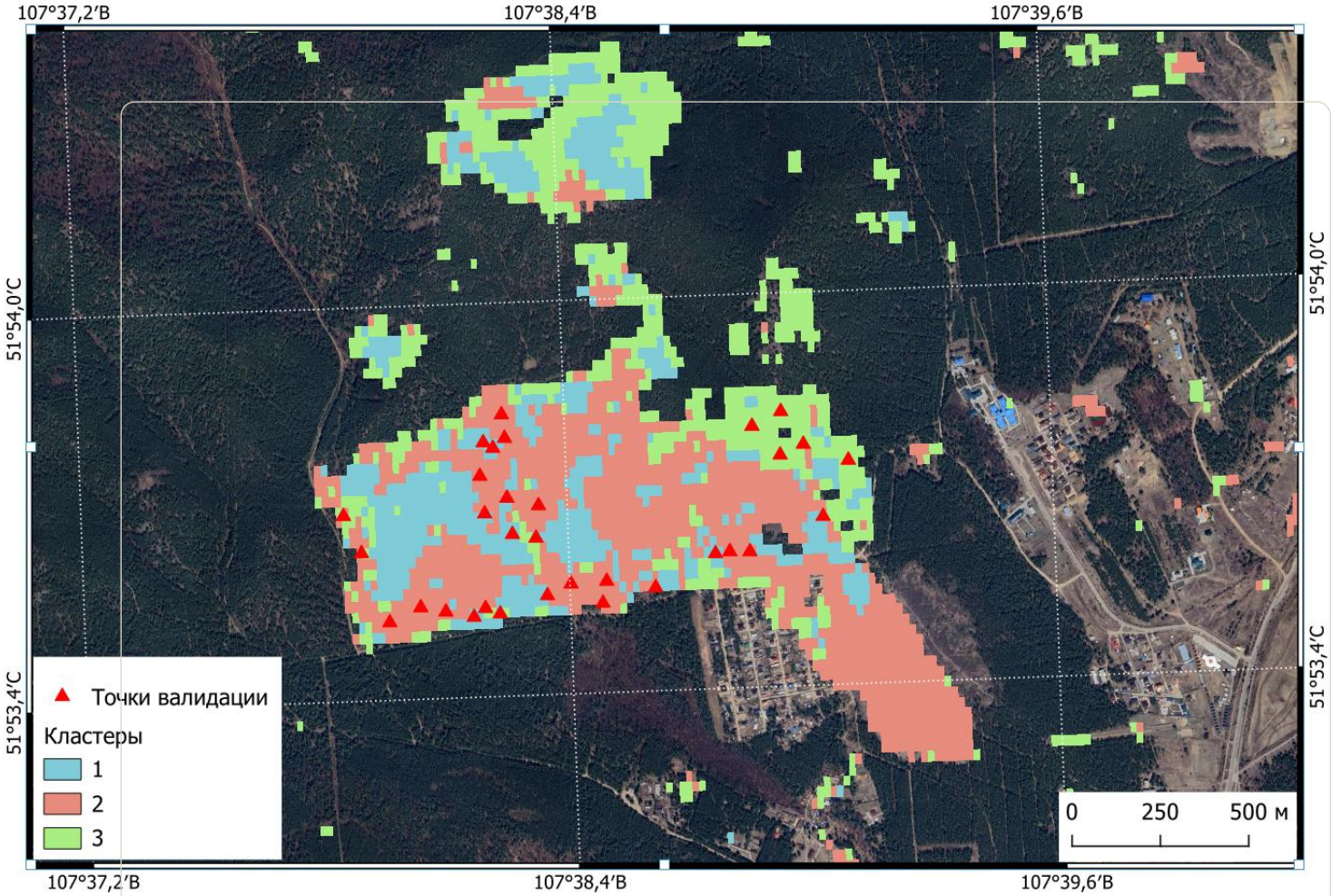
Структура кроны

Мелкие элементы кроны по C-диапазону и дополнительное разделение хвои и лиственных

Sentinel-1: VH −0,52, VV −0,48
Landsat: NBR зима 0,54

PC1 объединяет летний NBR и L-диапазон: общий рост зелёной массы и стволов. PC2 характеризует наличие хвои зимой. PC3 отделяет вклад C-диапазона, который быстрее насыщается, чем L-диапазон.

Результат кластеризации на полигоне



Три макротраектории

1. Искусственные посадки сосны - одновозрастные регулярные сосны, характеризуются высокой линейной однородностью полога.
2. Разреженное мозаичное восстановление.
3. Плотное естественное сукцессионное возобновление на гарях протекает неравномерно (куртинно) и характеризуется выраженной дифференциацией по возрасту и по высоте (многоярусностью).

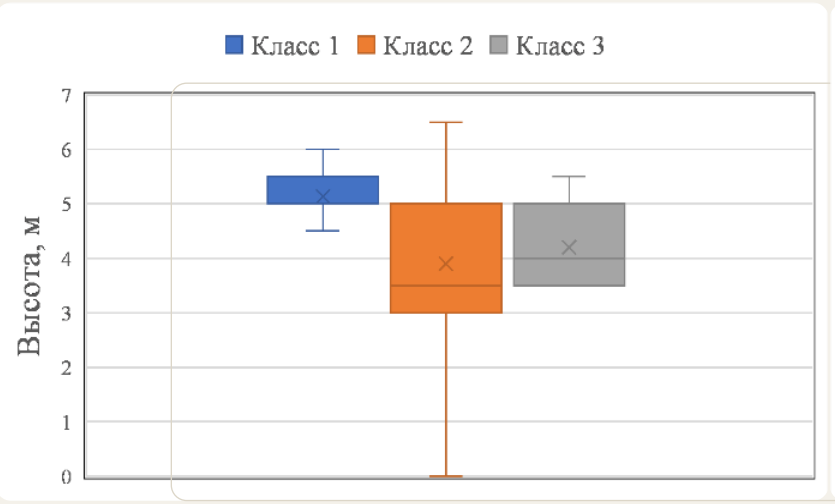
Оптимум из трёх кластеров исключает излишнюю пестроту карты. 32 круговые площадки, радиус 10 м.

Три траектории восстановления и верификация

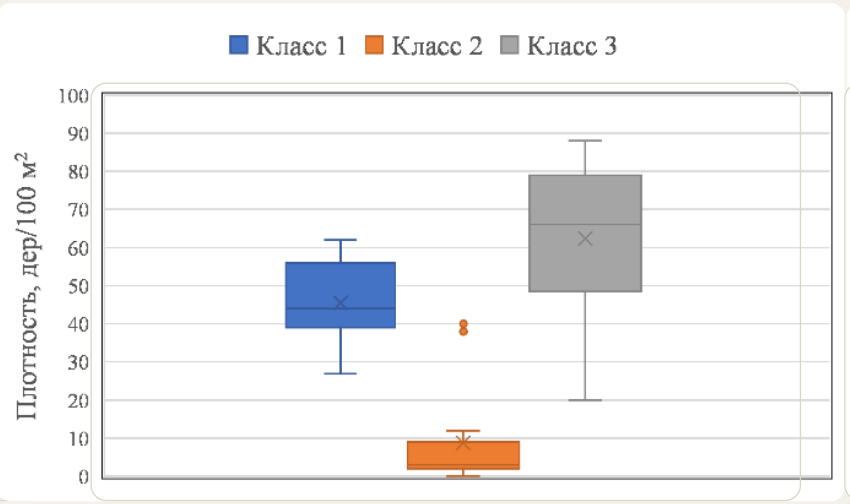
1. Регулярные посадки сосны (9 тестовых участков) - одновозрастный полог, быстрый рост по высоте.
2. Разреженное мозаичное (17 тестовых участков), фрагментарный подрост.
3. Плотное естественное (6 участков) многоярусное; от класса 1 отличается высотой.

Ошибки на границах классов, пиксель 30 м

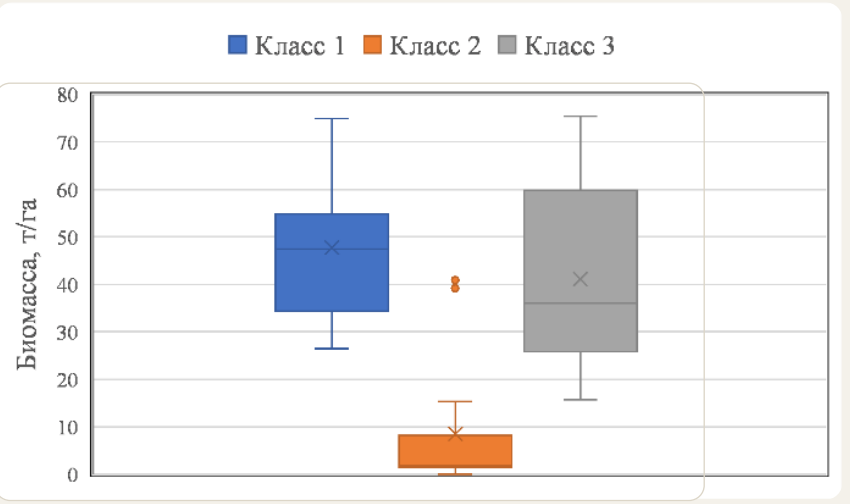
Таксационные параметры по классам (32 тестовые площадки.)



а) высота деревьев



б) плотность древостоя



в) надземная биомасса

- Класс 2 обособлен и имеет минимальный разброс: плотность до нескольких сотен стволов на гектар
- Классы 1 и 3 перекрываются по плотности и биомассе, но уверенно разделяются по высоте

Преимущества комплексирования: разделение классов 1 и 3 по структуре лесного полога при равной биомассе.

Класс 1: культуры сосны

Одновозрастные регулярные посадки, однородный полог, быстрый рост по высоте без конкуренции

Класс 3: естественное возобновление

Разновозрастное, многоярусное; верхний ярус часто из мелколиственных, поэтому хвойный ярус ниже при сопоставимой биомассе

PC1 (L-диапазон) характеризует общую биомассу, **PC2** и **PC3** (зимние индексы, C-диапазон) структуру и высоту полога.

Ортогональность признакового пространства позволила увеличить чувствительность и к геометрии полога

Выводы и ограничения

Выводы

- Оптика зимой и летом плюс радар L и C в одном пространстве признаков разделяют траектории восстановления
- Три главные компоненты физически интерпретируются
- Метод без обучающих выборок масштабируется на Сибирь

Ограничения

- NBR не определяет причину нарушения
- Смешение пикселей 30 м на границах классов
- Стек ограничен 2016–2021 гг.
- 32 площадки, в классе 3 только 6

Работа поддержана грантом РНФ № 26-27-20057