



Пространственно-временные тренды постагрогенного восстановления растительности на залежных землях степей Тывы по данным дистанционного зондирования

XXIII международная конференция
«Современные Проблемы Дистанционного Зондирования
Земли Из Космоса»
Москва, 10-14 ноября 2025

Ильинова Наталья Владимировна

Географический ф-т МГУ имени М.В. Ломоносова, аспирант
Кафедра Физической Географии и Ландшафтоведения



Цели и Задачи:

Актуальность:

- Динамика функционирования степной растительности — ключевой индикатор её устойчивости к изменениям климата и антропогенным нагрузкам.
- Слабая изученность пространственно-временной динамики фитомассы на залежах препятствует эффективному мониторингу пастбищ.

Установление начальной точки отсчета восстановления экосистем

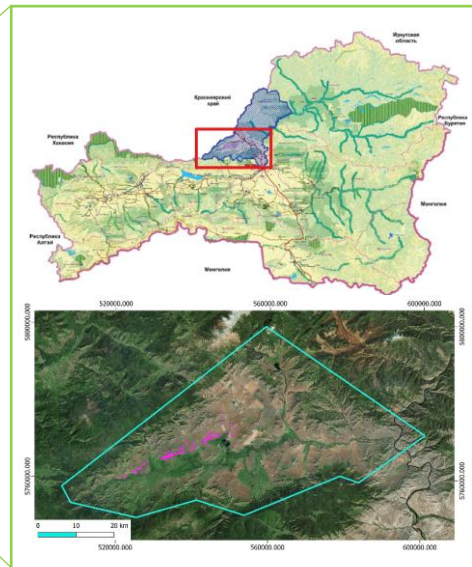
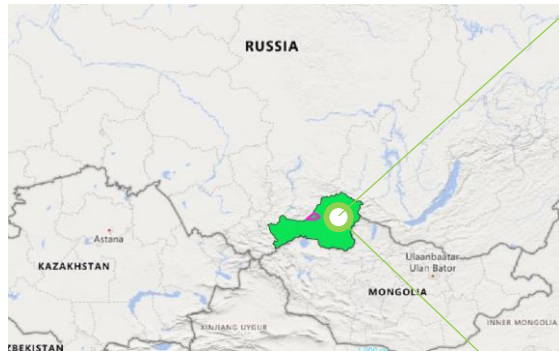
Выявление контрастных гидротермических условий (температуры и влажности)

Получение многосезонного ряда непрерывных наблюдений за вегетационной динамикой растительных сообществ внутри пикселей

Определить направленность и интенсивность изменений в динамике фитомассы за 35-летний период путем совмещения анализа пространственных трендов (Hot Spot Analysis аномалий NDVI) и эволюции сезонных паттернов развития фитомассы (кластерный анализ).

1. Выявить пространственные закономерности устойчивости растительности к изменчивости климата.
2. Оценить устойчивость фитомассы и определить ключевые факторы влияния за период экологической трансформации на заброшенных сельскохозяйственных землях Тувы.

Тыва, Турано-Чюкская котловина



- Межгорная котловина Западного Саяна
- Климат резко континентальный: T° июля $+19-20^{\circ}\text{C}$, января -23°C , осадки 300-350 мм/год
- Степной ландшафт с фрагментами лиственных лесов и луговыми поймами
- Температурная инверсия: многолетняя мерзлота в пойме р. Уюк

Преобладающие формы рельефа:

- Низкогорья и останцовые хребты
- Предгорные равнины, перекрытые делювиально-пролювиальными шлейфами
- Засоленные озерные котловины
- Заболоченные поймы

Региональные факторы:

Почвенное засоление и карбонатность пород

Эрозионная расчлененность предгорных равнин

Малая мощность почвенного слоя и высокая каменистость

Многолетняя мерзлота в пределах поймы и позднее оттаивание



Материалы:

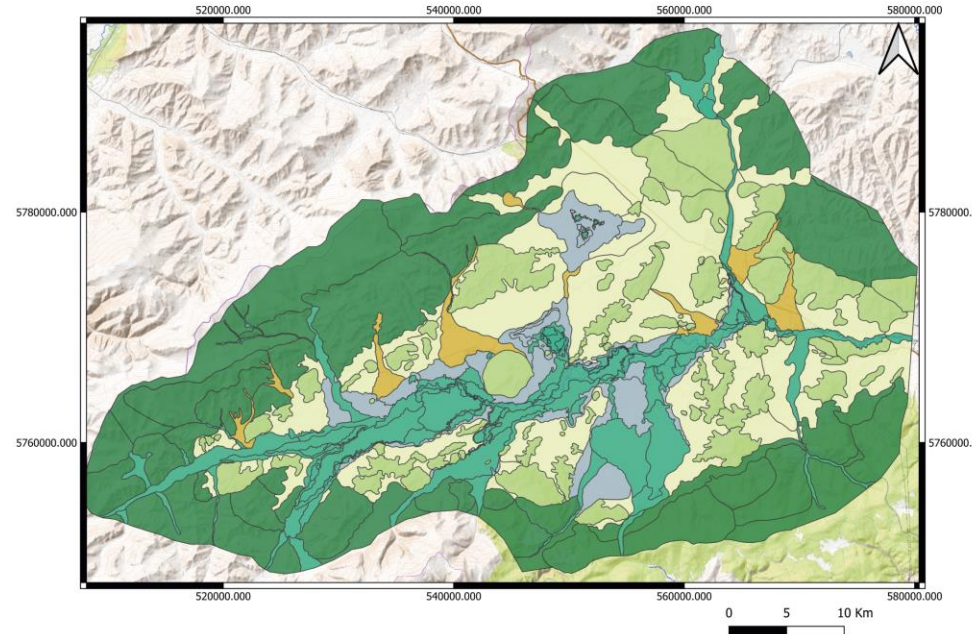
- Полевые работы и маршрутные наблюдения
- Временные ряды спутниковых снимков - Landsat-5 и Landsat-8, MODIS
- Индексные изображения (NDVI, NDWI, SAVI, VCI)
- Аэрофотоснимки, полученные с квадрокоптера
- Ландшафтная карта Турано-Уюкской котловины

Количество использованных для осреднения сцен Landsat 5, 8 за вегетационный сезон по годам



Number of available space images	
Year	clouds less than 80 for L5, clouds less than 50 for L8
1990	13
1991	31
1992	24
1993	22
1994	9
1995	6
1996	26
1997	23
1998	15
1999	0
2000	4
2001	27
2002	18
2003	23
2004	30
2005	31
2006	31
2007	29
2008	23
2009	34
2010	29
2011	27
2012	0
2013	19
2014	22
2015	26
2016	24
2017	24
2018	35
2019	27
2020	21
2021	22
2022	24
2023	21

Категории типов местностей Турано-Уюкской котловины



- Лугово-болотные пойменные территории
- Светлохвойные леса на горных склонах
- Сухостепные со скальными выходами горные склоны
- Степные равнины
- Степные конусы выносов
- Галофитные равнины



Доступ к веб-карте снимков, полученных с дрона



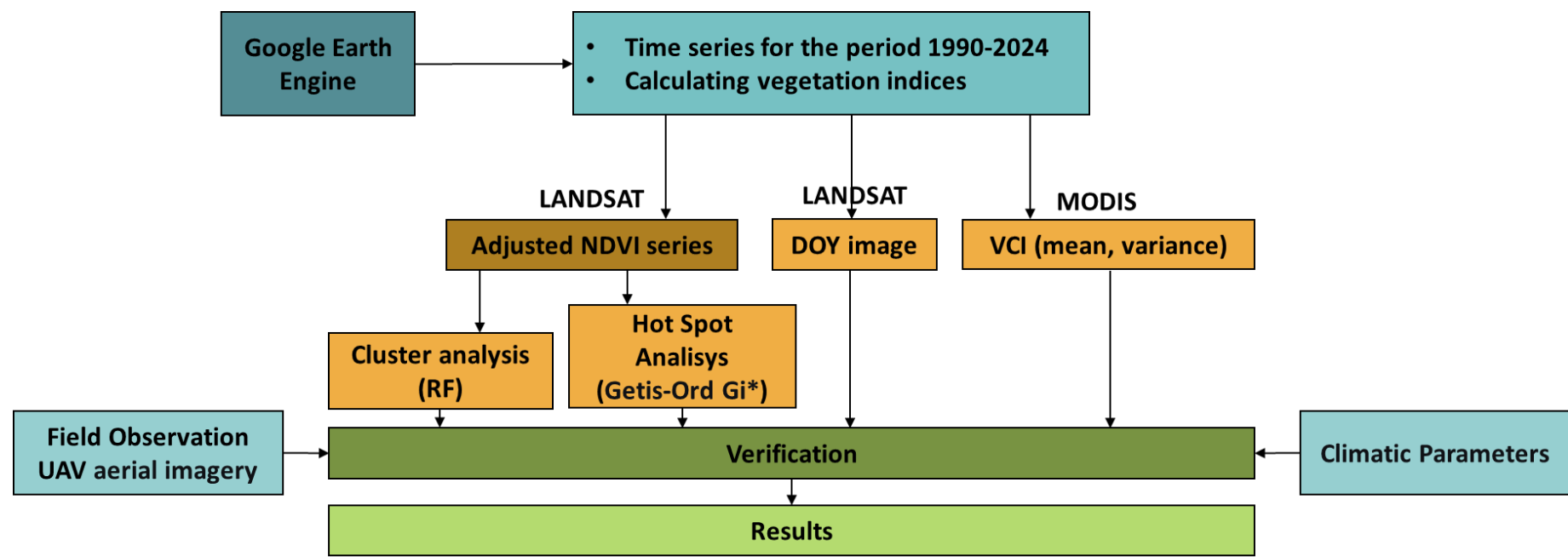
Методы

Vegetation Condition Index

$$VCI \text{ data} = (NDM \text{ data} - NDM_{\min}) / (NDM_{\max} - NDM_{\min}) \times 100\%$$

Normalized Difference Vegetation Index

$$NDM = (NR - Red) / (NR + Red)$$



1. Данные и Временные рамки

- Период исследования: 1990–2024 (35-летний анализ)
- Спутниковые снимки: Landsat-5, -7, -8 (разрешение 30 м), MODIS (90 м)
- Производные индексы: NDVI (зеленая фитомасса), VCI (водный стресс)
- Вспомогательные данные: Ландшафтная карта Турано-Уюкской котловины, аэрофотоснимки с БПЛА
- Временные периоды: 1990–2000, 2001–2011, 2013–2024.

2. Обработка и Анализ Данных

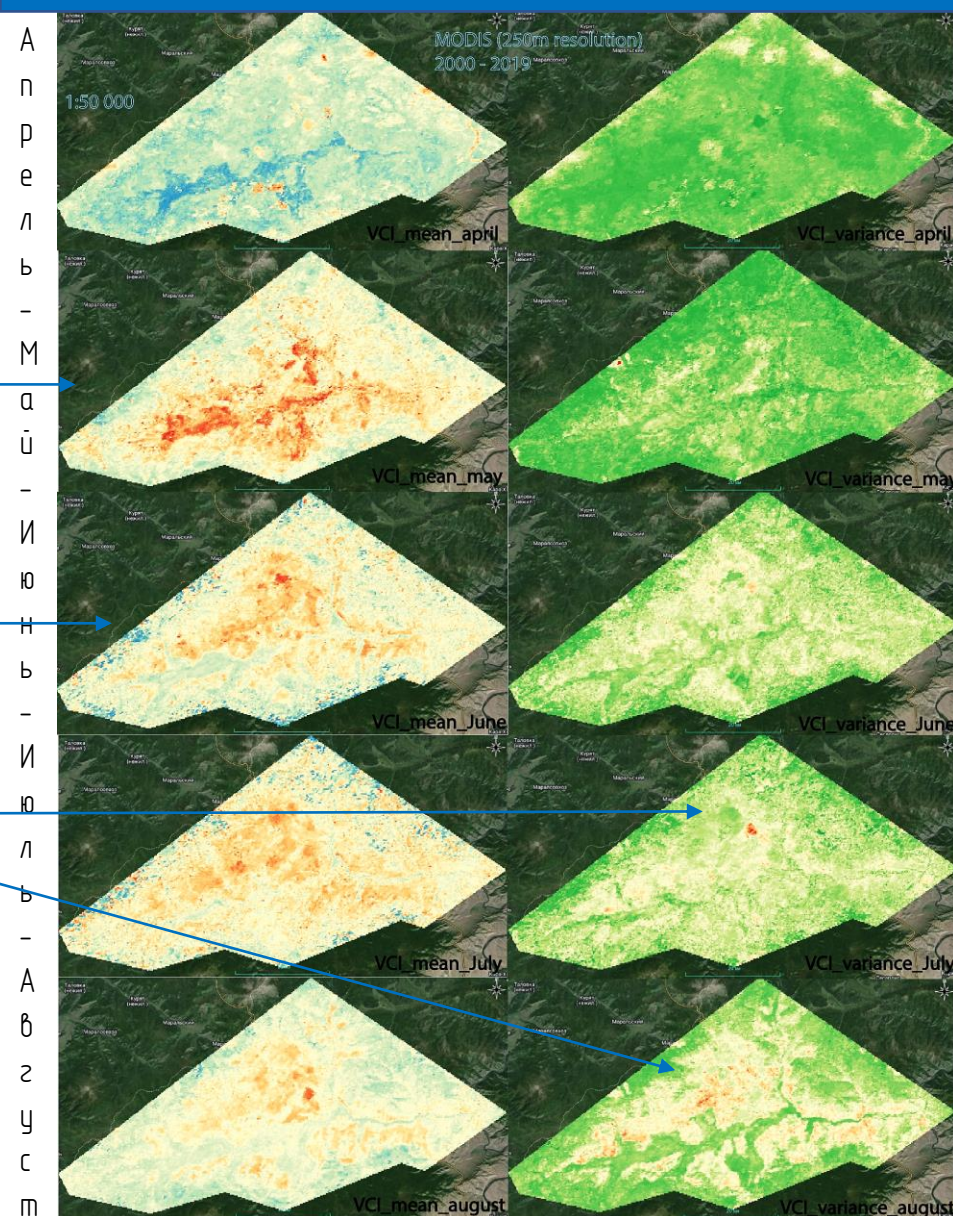
- Анализ трендов: Декомпозиция сезонных временных рядов NDVI/VCI
- Время пика растительности: Метод самого зеленого дня года (Greenest Day of Year, DOY), MODIS
- Изменение земного покрова: Кластерный анализ сезонной динамики NDVI, 10 кластеров, Landsat
- Пространственные аномалии фитомассы: Анализ горячих точек (Hot Spot, Getis-Ord Gi*), дистанция 150 м, обратновзвешенное расстояние, NDVI, K-means

Анализ гидротермических показателей:

Дисперсия (справа) и среднее значение индекса VCI (MODIS 250m 16-дневный период) за 5 вегетационных месяцев (2000-2019 гг.)

- Высокие значения засухи в мае на пойме свидетельствуют о влиянии климатической инверсии и долгом прогревании обводненных территорий, что задерживает начало вегетации
- К июню степные сообщества теряют запасы влаги, в то время как луговые - приобретают
- Разброс индексных значений (дисперсия) наиболее высок в августе в степных равнинных сообществах, в июле – наиболее значителен в галофитных сообществах в бессточной засоленной части котловины

Среднее значение VCI Дисперсия VCI



Индекс условий
вегетации (Vegetation
Condition Index, VCI)

$$VCI \text{ data} = \frac{(NDVI \text{ data} - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \times 100\%$$

VCI Range	Numeric Index	Dryness Level
(0-20)	5	Extreme
(20-40)	4	Severe
(40-60)	3	Moderate
(60-80)	2	Light
(80-100)	1	Very light

Сезонный максимум вегетации

По типам водного питания:

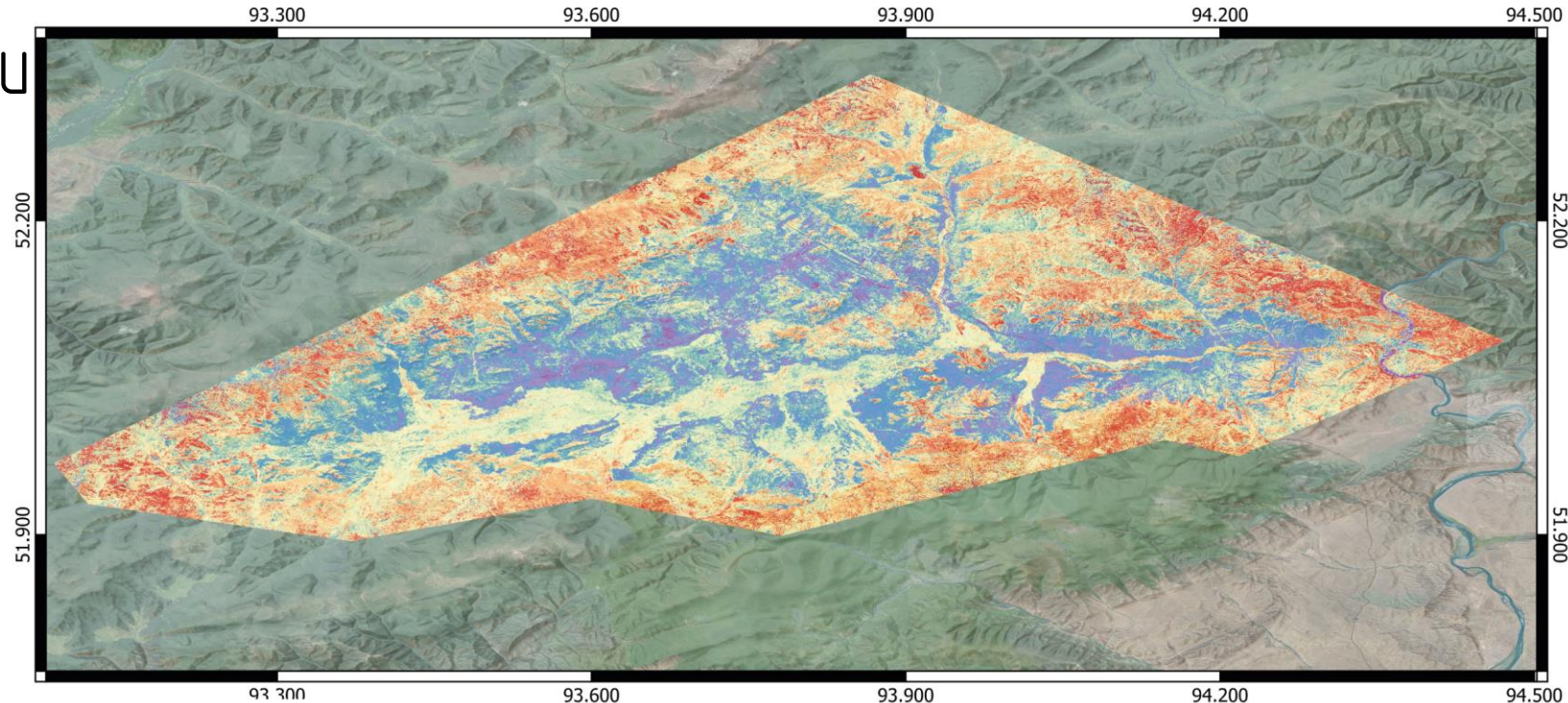
Атмосферный тип увлажнения:

- Пенепленизированные ксерофильные дерновиннозлаковые степные равнины в автономном положении
- Пик вегетации наиболее поздний - 08.08 - 23.08

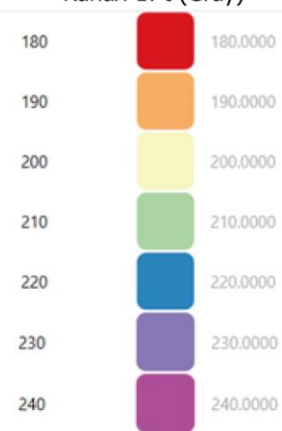
Атмосферный + Грунтовой тип увлажнения:

- Пойменные мезофильные и гигромезофильные луга, а также ложбины и конусы выноса под ксеромезофильными разнотравно-дерновиннозлаковыми степями
- Пик вегетации наступает 18.07 – 08.08

Разница пиков вегетации при разных условиях водного питания соответствует 15 дням



Median_Greenest_DOY_13_24
Канал 1: t (Gray)



Greenest DOY (NDVI) from 2013 to 2024
Based on Landsat-8 (30m), ESPG:4325

Растр отображает медианное значение порядкового номера дня с максимальным зафиксированным значением NDVI рассчитанное на основе сезонов с 2013 по 2024 гг.



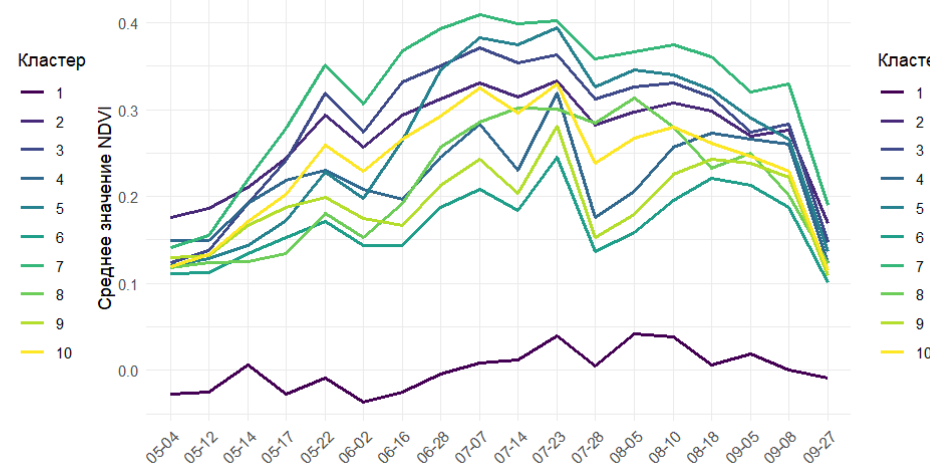
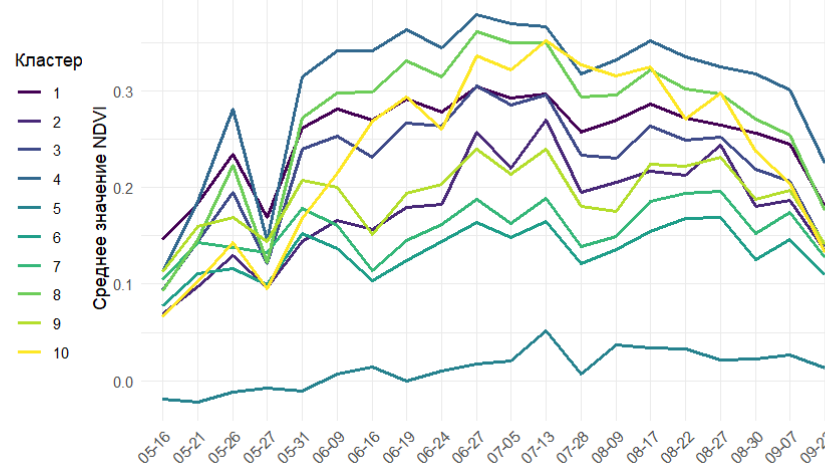
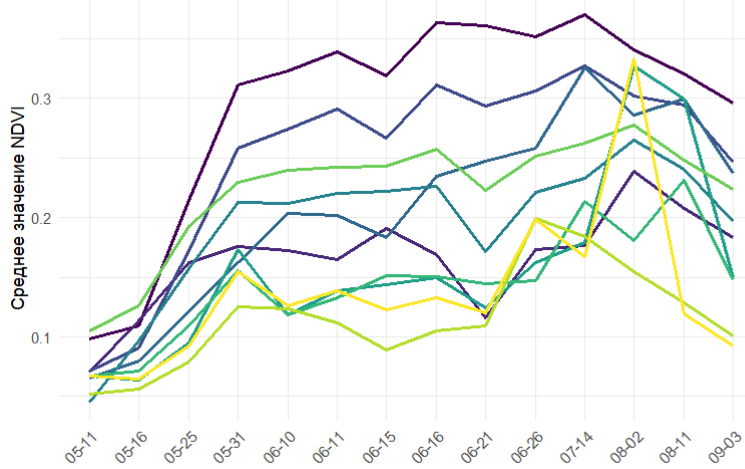
Большинство значений относится к промежутку с 180 по 230 дни (29 июня - 18 августа)

Классификация фитоценозов :

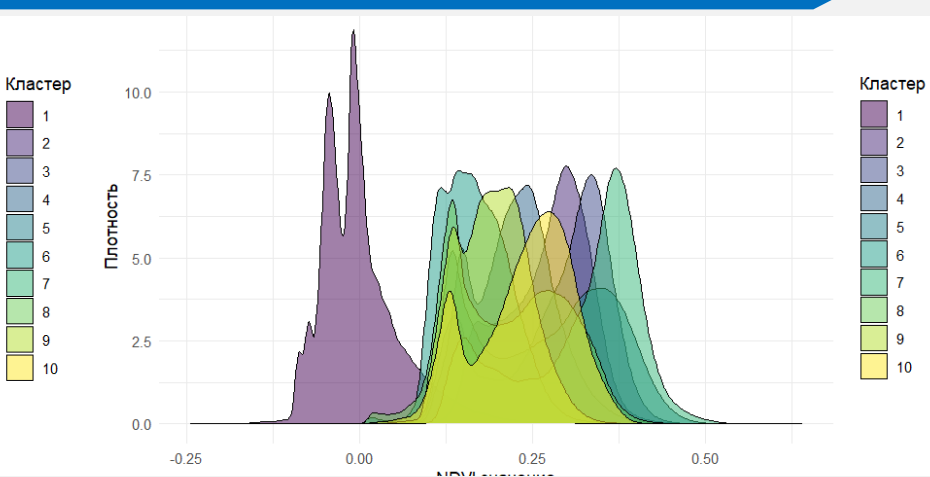
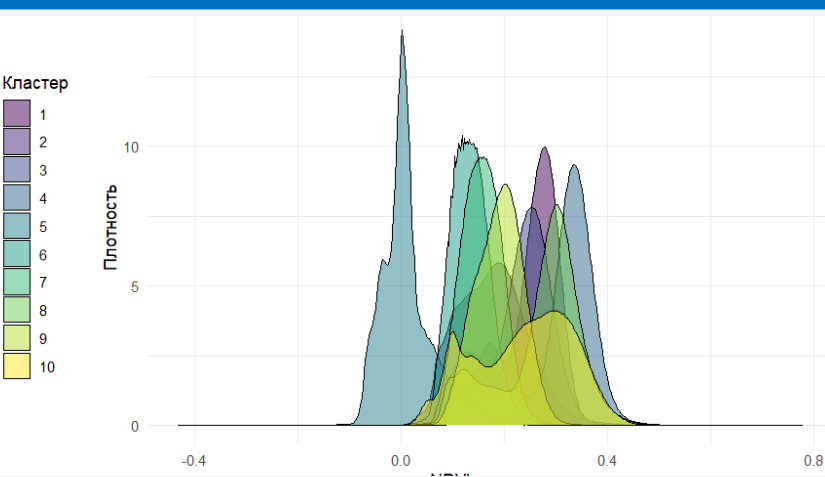
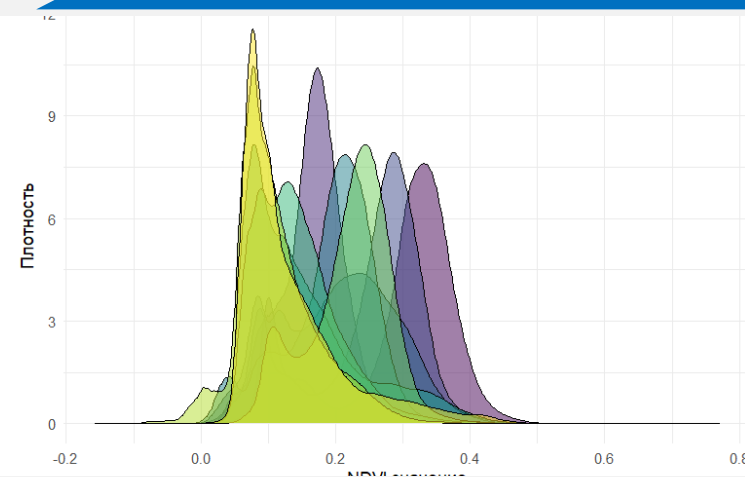
Метод: Random Forest на NDVI временных рядов

- 15 сцен (1990–2000)
- 22 сцены (2000–2011)
- 19 сцен (2013–2024)

Классы вегетационного хода (Средние значения сезонного хода NDVI) 1990е – 2000е – 2010е



Классы вегетационного хода (Распределение NDVI) 1990е – 2000е – 2010е

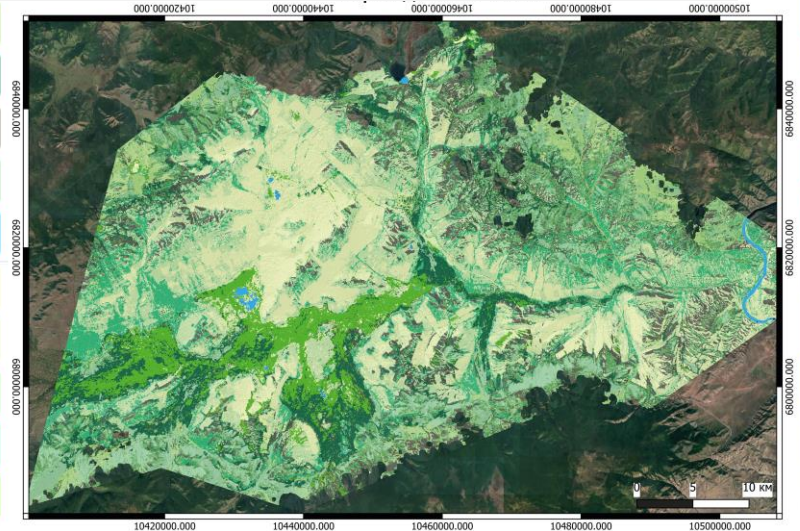


Классификация фитоценозов по годовому ходу NDVI на разных стадиях восстановительной сукцессии: кластерный анализ

1990–2000

2000–2011

2013–2024



Выделено 4 кластерные группы комплексов (всего 10 классов):

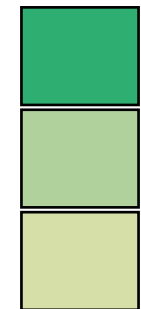
- Залесенные низкогорья
- Закустаренные и луговые поймы
- Степные равнины
- Степные низкогорья

- Группы кластеров объединены однотипным режимом функционирования
- Различия внутри групп связаны с разной амплитудой колебаний значений

По мере восстановления режима функционирования внутренняя асинхронность природно-территориальных комплексов возрастает

Восстановительные сукцессии:

- Увеличение внутренней мозаичности кластерных контуров и усложнение их структуры.
- Формирование ландшафтного рисунка, обусловленного микрорельефом.
- Ведущий фактор – грунтовые воды

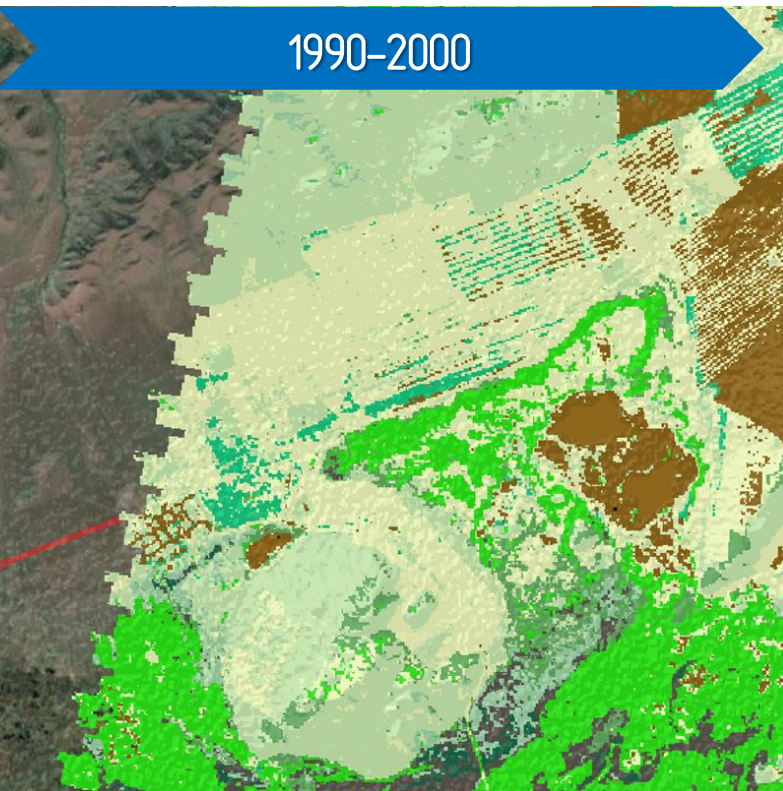


– лощины и ложбины. Борозды и промоины. временные водотоки и эрозионные формы рельефа на степных равнинных территориях,

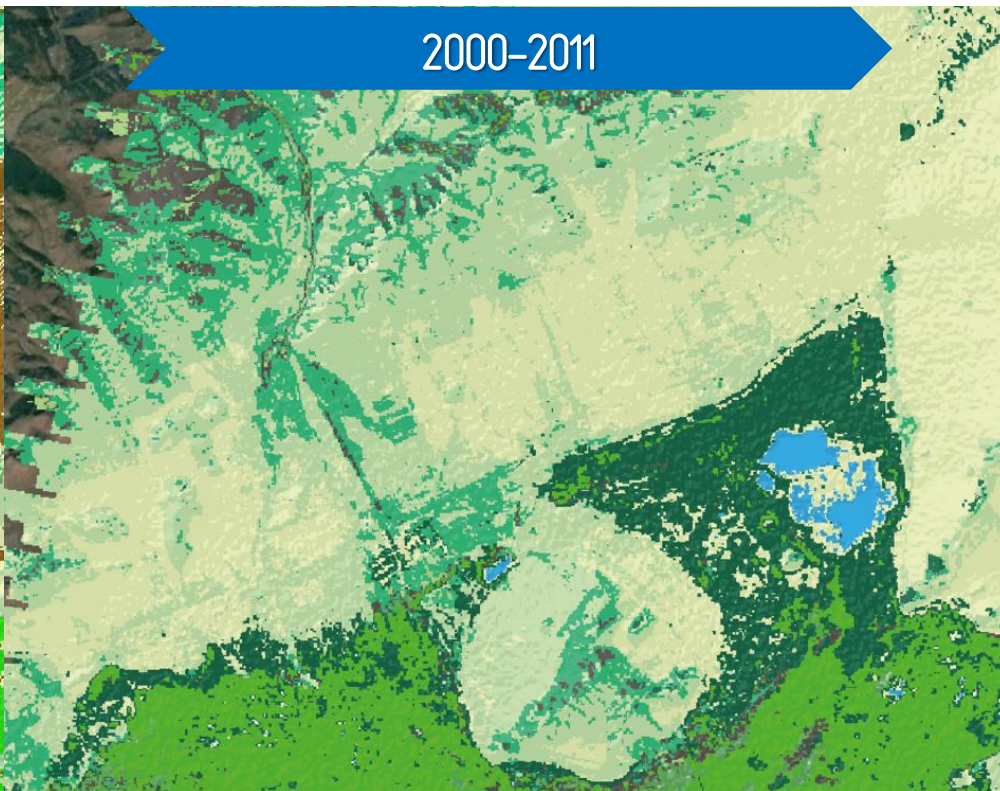
– слабо выраженные понижения в рельефе, слегка повышенной увлажненности

– класс степных равнин, в т.ч. сухих степей.

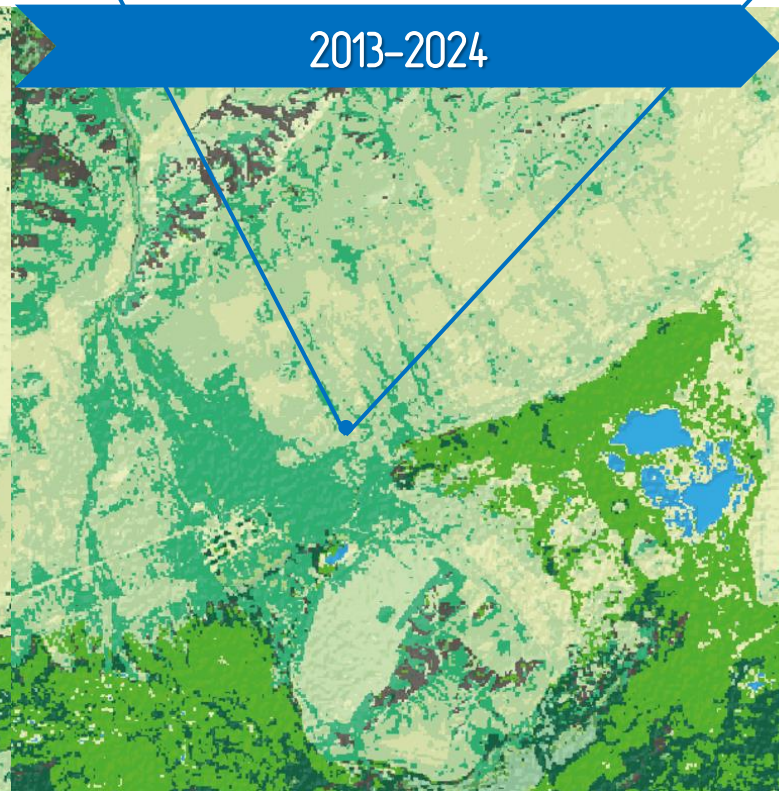
1990–2000



2000–2011

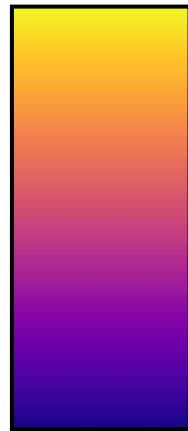


2013–2024

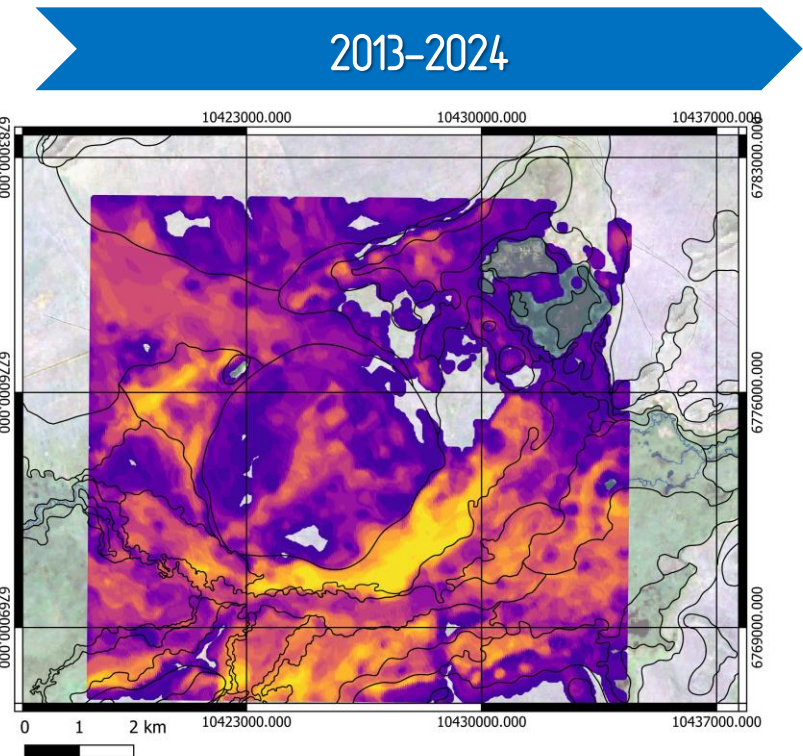
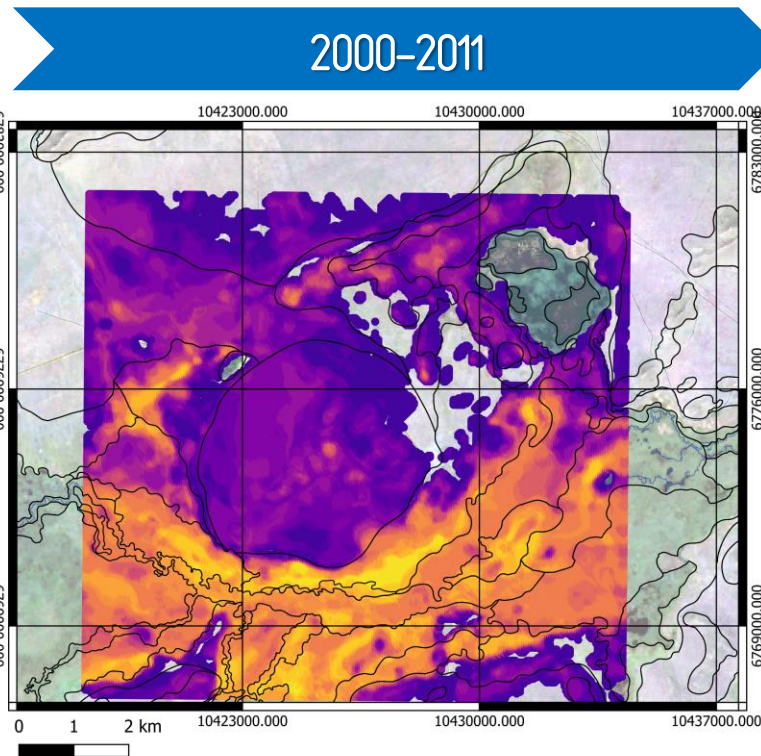
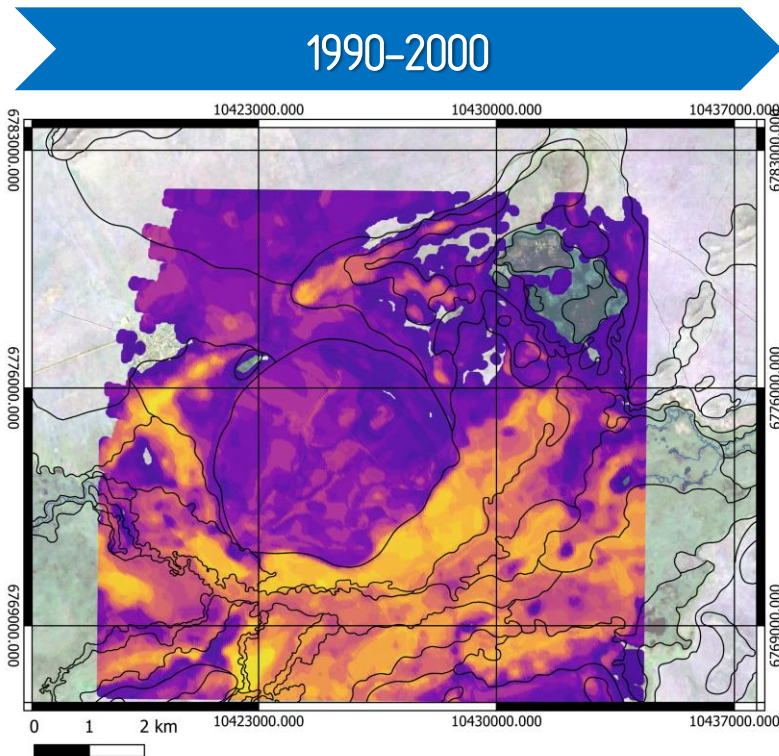


Повторяемость локальных аномалий в функционировании экосистем

Устойчивые
положительные
аномалии NDVI
("Горячие точки")



Частота аномалий	Экосистема (Ландшафт)
0.7 - 1.0	Пойменные леса и луга, лиственные леса, бугры пучения (туфуры)
0.5 - 0.6	Экотонные (переходные) зоны между степью и поймой
0.4 - 0.5	Нераспаханные степные участки, граничащие с антропогенно-преобразованными степями
0.3 - 0.4	Степные сообщества с повышенным увлажнением
0.2 - 0.3	Сухие степные сообщества



Обсуждение

1. Вероятно, причиной более медленного восстановления динамики функционирования фитомассы служат различия в экологических группах растительности. Более влажный климат не дает формироваться чистым ксерофитным степным сообществам (у которых меньше инвазивных конкурентов), характерным для Центрально-Тувинской котловины.

Выводы:

Основными драйверами флуктуаций фитомассы в процессе восстановления постаграрных степных экосистем являются положение в системе катены (глубина залегания грунтовых вод, соседство с эрозионными формами). Данная закономерность проявляется на склонах как северной, так и южной экспозиции, что свидетельствует о преобладании влияния грунтового увлажнения над инсоляционным эффектом.



1. Для степей характерно раннее начало вегетации, но высокая вариабельность индекса засухи (VCI) в августе ➡️ сильная зависимость от климатических условий к концу вегетации.
2. Экспозиционный градиент: Склоны южной экспозиции демонстрируют более высокую климатическую чувствительность (⬆️ дисперсии индекса VCI).
3. Динамика галофитных сообществ (*Salicornia*, *Suaeda*) критически зависит от количества осадков в июле, что определяется режимом увлажнения почвы.



Выводы:

1. Разница в сроках наступления максимума фитомассы между автономными степями и участками с грунтовым увлажнением составляет около 15 суток. Различия в фенологии сходных ландшафтов свидетельствуют о незавершенности восстановления годового хода фитомассы на залежных землях.
2. За последние десятилетия отмечено увеличение внутренней мозаичности кластерной структуры, что отражает рост пространственной гетерогенности, обусловленной влиянием микрорельефа и внутрипочвенного стока в течение 35-летнего периода.

Наблюдается снижение контраста пространственной автокорреляции при одновременном росте внутренней неоднородности (1993–2023 гг.), что указывает на постепенное восстановление в сторону естественного функционирования фитомассы.





10-14 ноября 2025 г

Спасибо за внимание!

Ильинова Наталья Владимировна

ilinova_nv@mail.ru

ilinova.natvlad@gmail.com

Работы выполнены при
поддержке Российского
Научного Фонда: 24-17-00045

