Исследование возможностей картографирования болотных экосистем с древесной растительностью на основе спутниковых данных

Стыценко Ф. В., Барталев С. А., Сайгин И.А.

Институт космических исследований РАН

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

Цель работы

Актуальность работы: На данный момент большинство подходов к спутниковому картографированию наземных экосистем не учитывают леса, произрастающие на болотах, такие лесные массивы часто картографируются как обычные леса. Лес на болотах и автоморфный лес различаются по механизму накопления углерода: обычный лес депонирует в основном в биомассе деревьев, а лес на болотах в торфяной почве. В водно-болотных угодиях из-за высокой влажности разложения органики замедлено, что приводит к более высокому накоплению углерода, чем древесина. Все это делает актуальной задачу учета лесов, произрастающих на болотных экосистемах.

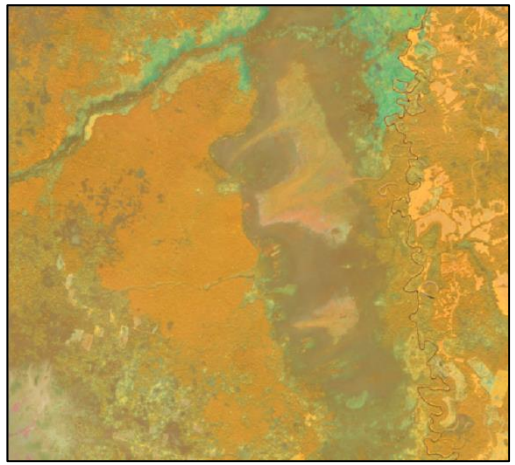




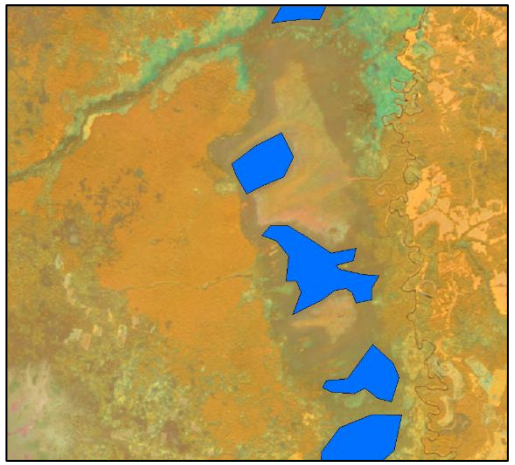
Цель работы: Разработка подходов к картографированию болотных экосистем с древесной растительностью на основе использования спутниковых данных.

В работе предложен подход, основанный анализе фенологических особенностей сезонного развития лесных массивов, произрастающих на болотах с использованием временных серий спутниковых изображений. Основная гипотеза, принятая в исследовании, подразумевает, что из-за избыточного увлажнения вегетация в болотных лесах начинается с характерным временным сдвигом по сравнению с автоморфными лесами.

Опорные наземные данные



а)

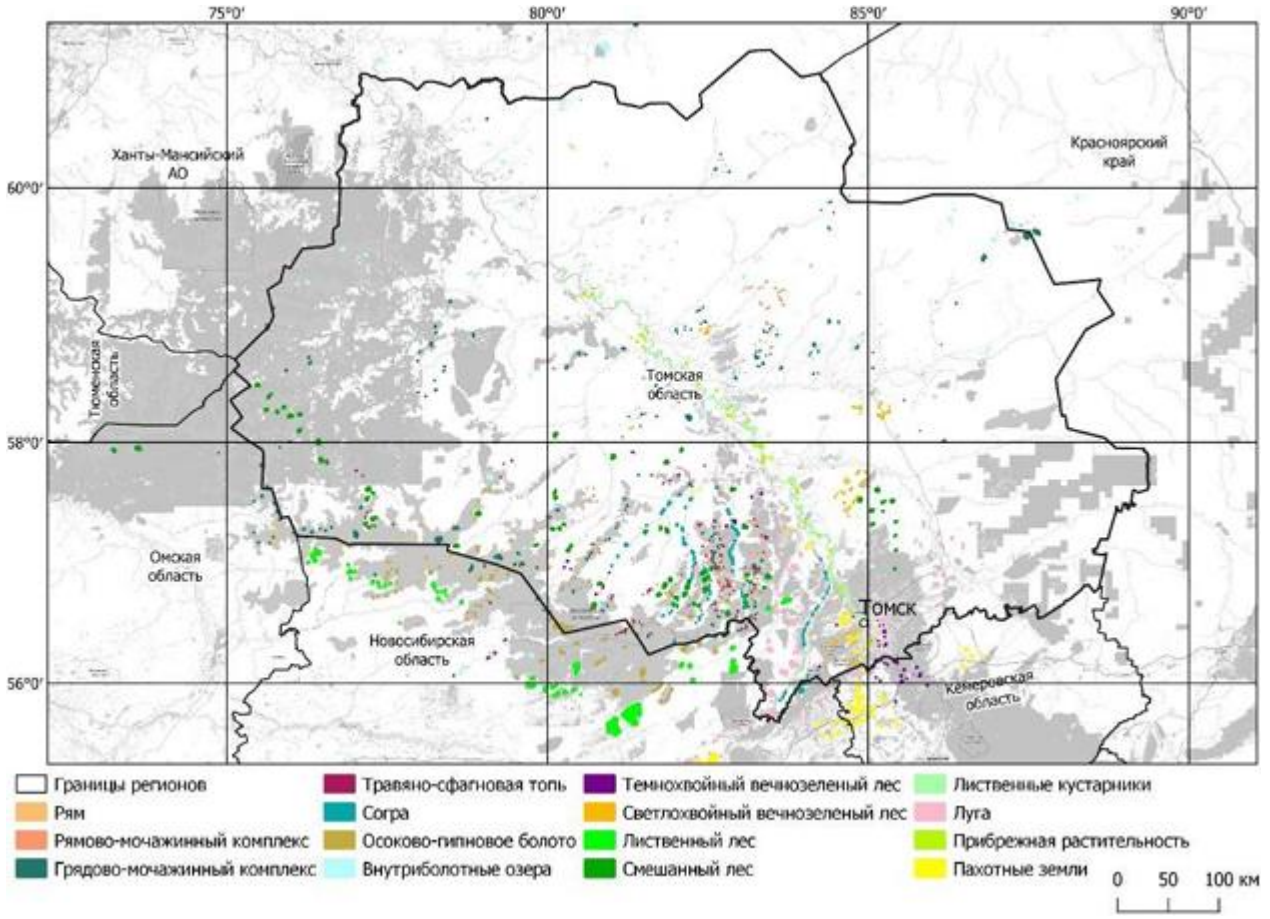


б)

№	Тип	Количество пикселей
1	Сосново-кустарничково-сфагновое болото (рям)	977
2	Рямово-мочажинный комплекс	807
3	Грядово-мочажинный комплекс	5790
4	Травяно-сфагновая топь	542
5	Древесное кустарничково-мохово-разнотравное болото (согра)	3534
6	Осоково-гипновое болото	5473
7	Внутриболотные озера	6029

в)

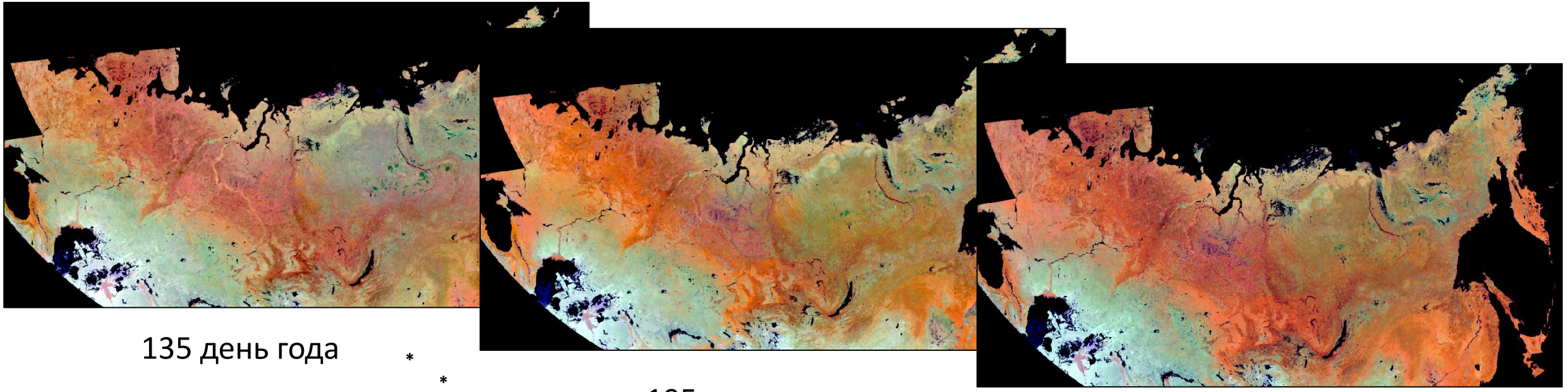
Данные в Томской области для облесенных болот а) Композитное изображение MODIS, б) Векторные данные леса на болотах, в) Таблица данных



Для исследования использовались наземные данные о лесных типах водно-болотных угодий в пределах Томской области (Синюткина, 2017)

Используемые спутниковые данные

Для анализа динамики развития вегетации использовались очищенные от влияния облаков ежедневные спутниковые данные MODIS, покрывающие всю территорию России с 2001 по 2025гг. (Миклашевич и др., 2025).



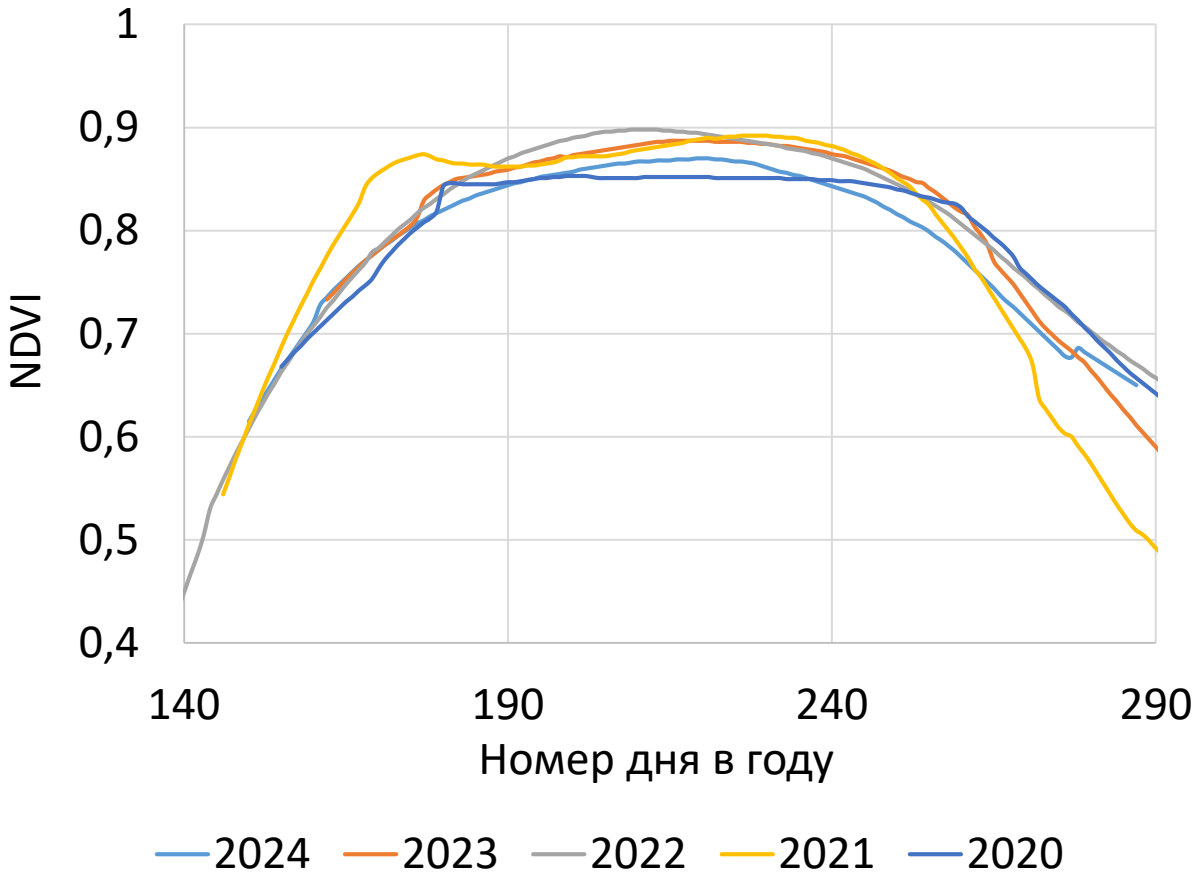
135 день года

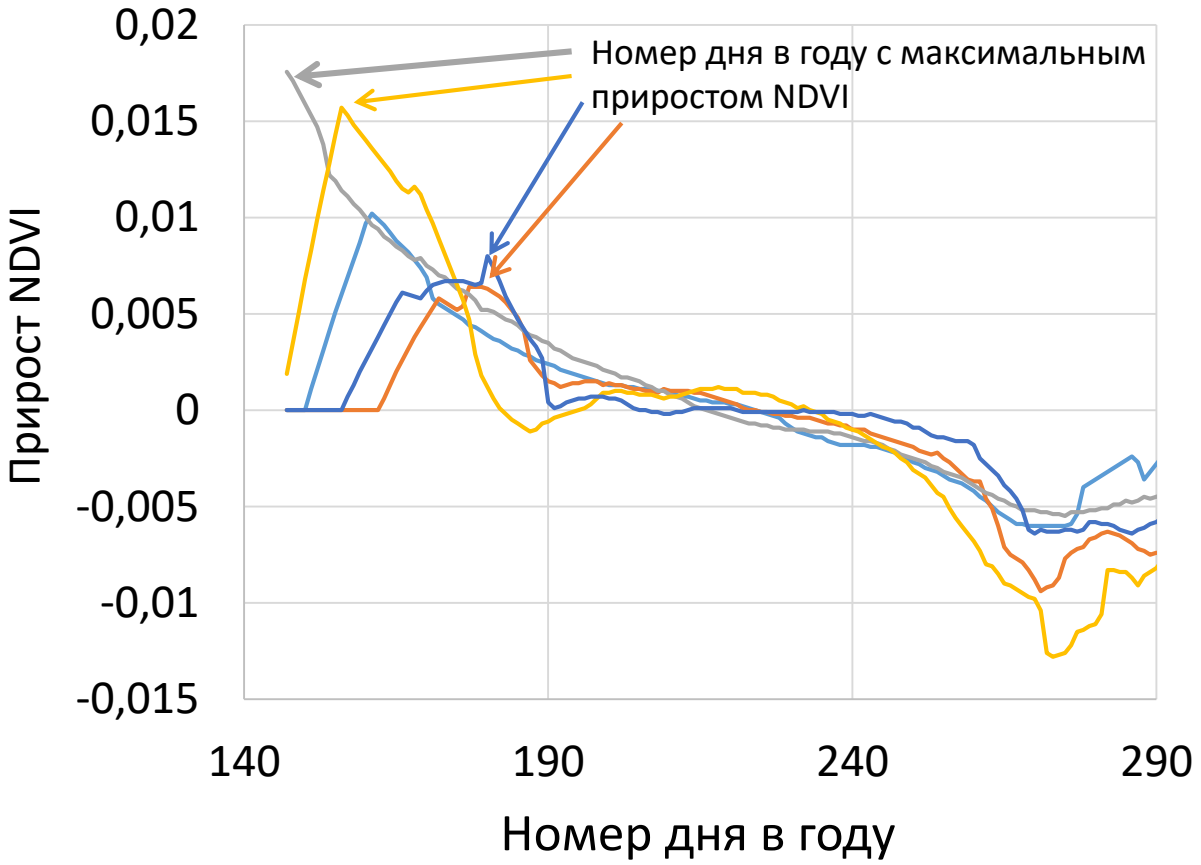
195 день года

255 день года

Данные включали отражательную способность в красном, ближней и средней ИК (0.84 мкм, 1.61мкм) областях спектра. Данные каналы демонстрируют высокую информативность при дистанционной оценке вегетационного состояния лесных экосистем, включая лесные массивы на болотных территориях, что обусловлено особенностями отражательной способности растительного покрова в указанных диапазонах

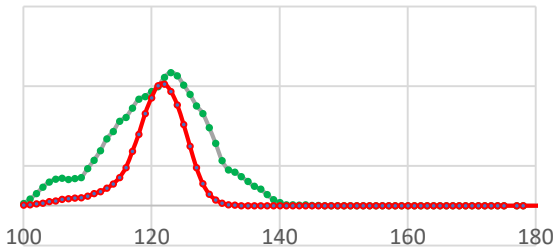
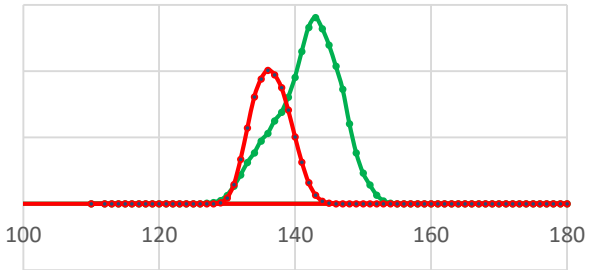
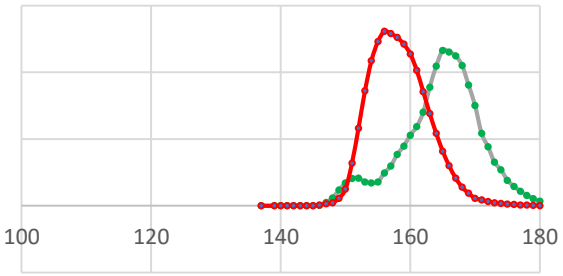
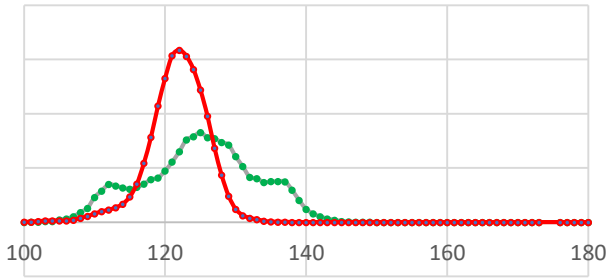
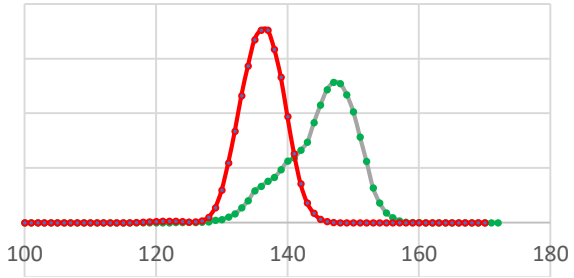
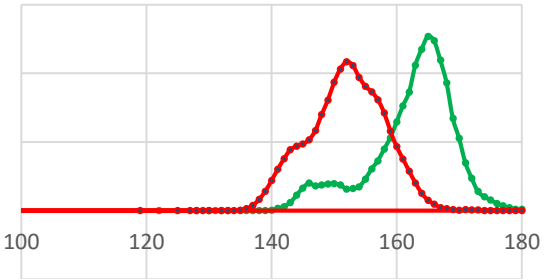
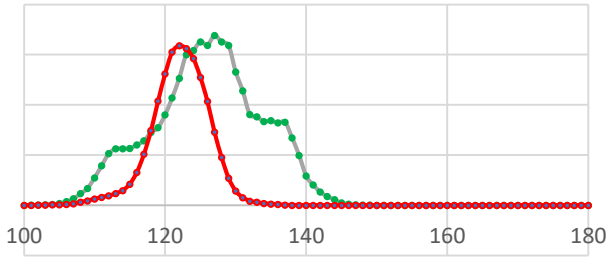
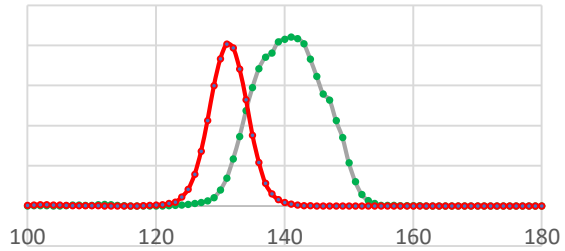
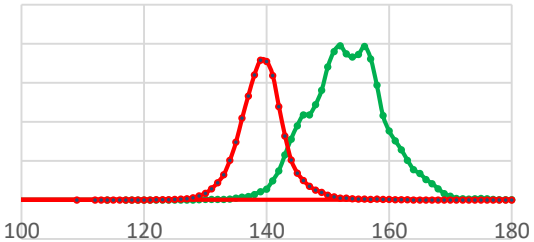
Нахождение даты максимального прироста NDVI





Для каждого пиксела находится день максимального прироста NDVI с 2001 по 2023. Рассматривались максимальные, минимальные и средние значения, полученные за последние 5, 10 и 20 лет.

Выбор признаков

	Минимум	Среднее	Максимум
За 20 лет			
За 10 лет			
За 5 лет			

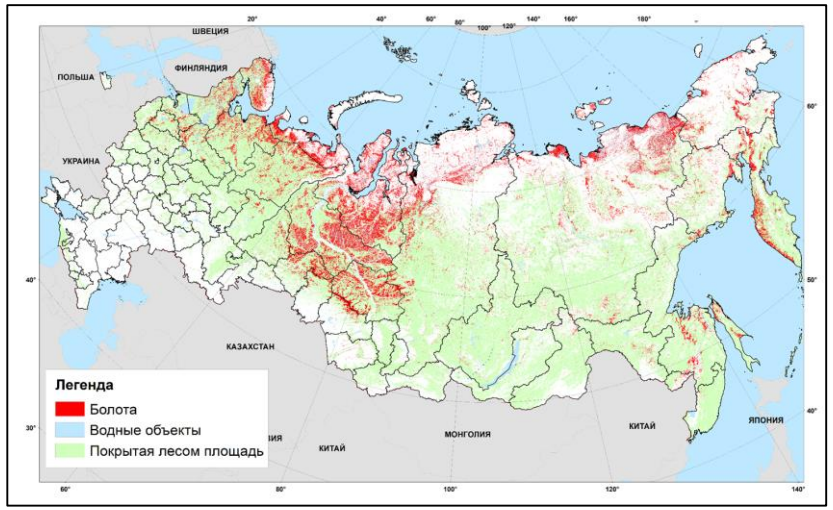
Гистограммы разделимости леса на болоте и автоморфного леса по дням начала вегетации (красным цветом показана гистограмма для леса, зеленым - для болота с древесным насаждением)

Установлено, что наилучшая разделимость может быть достигнута при расчете многолетнего максимального значения даты наибольшего прироста NDVI.

Дополнительные картографические материалы

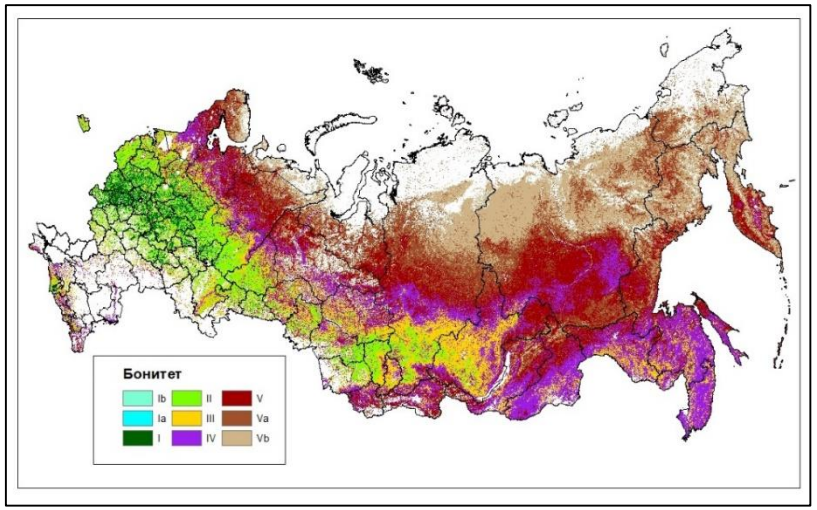
Использовались карты наземных экосистем (Барталев и др., 2016) для нахождения расстояния от водных объектов и открытых болот, и карта бонитетов (Хвостиков, Барталев, 2023). Для фильтрации лесных насаждений на горных склонах, которые имеют выраженный сдвиг начала вегетации использовались цифровые модели рельефа местности FABDEM (Hawker L. et al., 2022).

Карта наземных экосистем



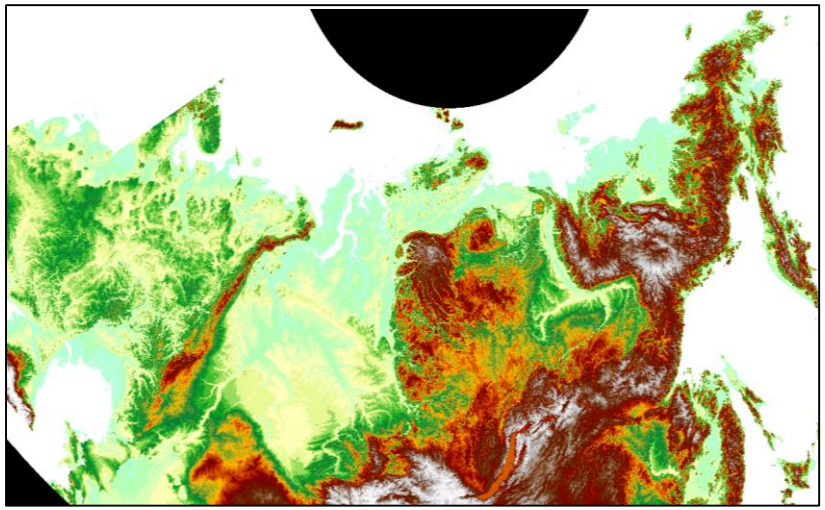
Карты болот, леса и водных объектов

Карта бонитетов



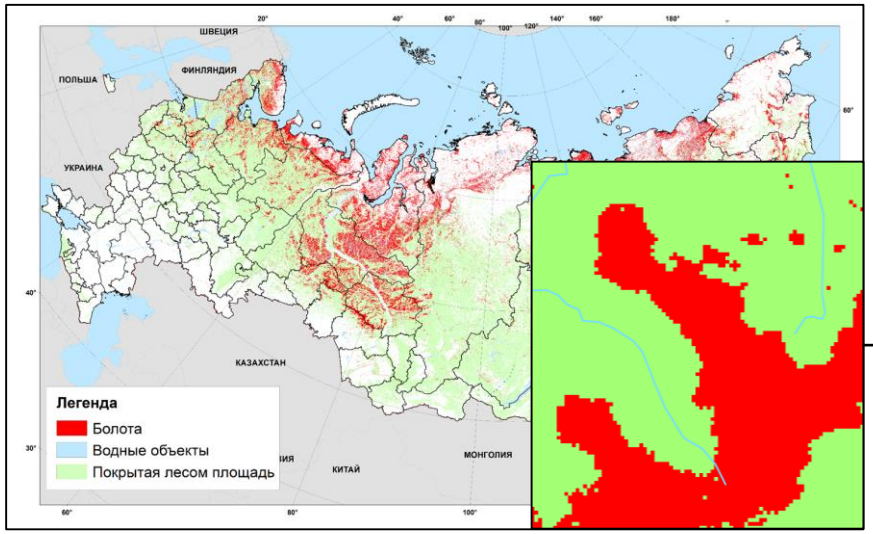
Карта классов бонитета

FABDEM

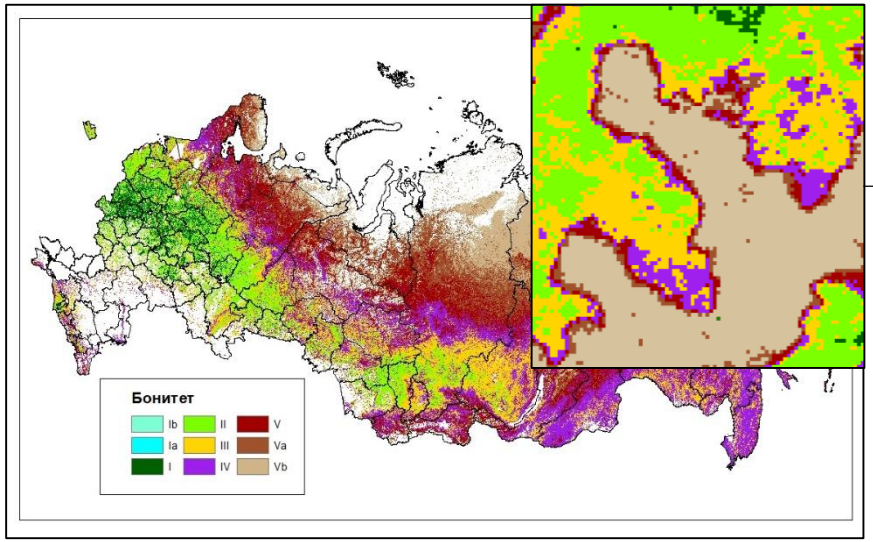


Fabdem (угол наклона 5^0)

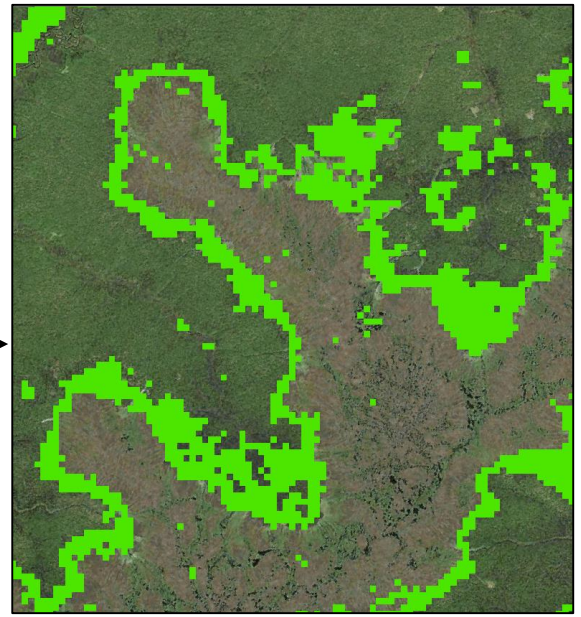
Выделение леса на болотах пороговым методом



Карты болот, леса и водных объектов



Карта классов бонитета



Результат выделения



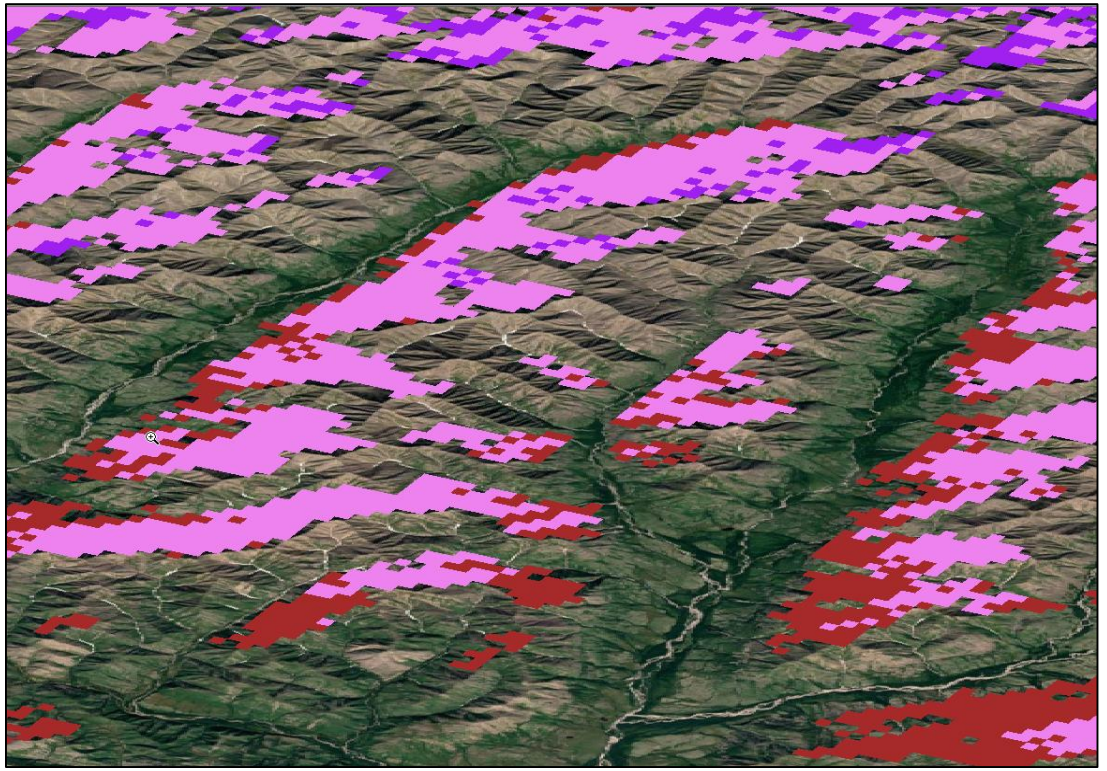
Подложка (изображение sentinel-2A)

Выделение леса на болотах:

1. **Рямово-мочажинный комплекс и сфагновые болота могут быть выделены в окрестностях открытых болот (4 км) с низким бонитетом (IV-V)**
2. **Древесно кустарничково-мохово-разнотравные болота могут быть выделены в поймах рек и с низким бонитетом (IV-V) и при отклонении даты максимума начала вегетации от её среднего значения в окрестности 20 км на 5 и более дней.**

Фильтрация результатов на основе данных о рельефе





Для исключения из результатов лесов, произрастающих на северных склонах, имеющих задержку в вегетации выполнялась фильтрация угов наклона 8^0 и более градусов.

Выделение леса на болотах на основе классификации

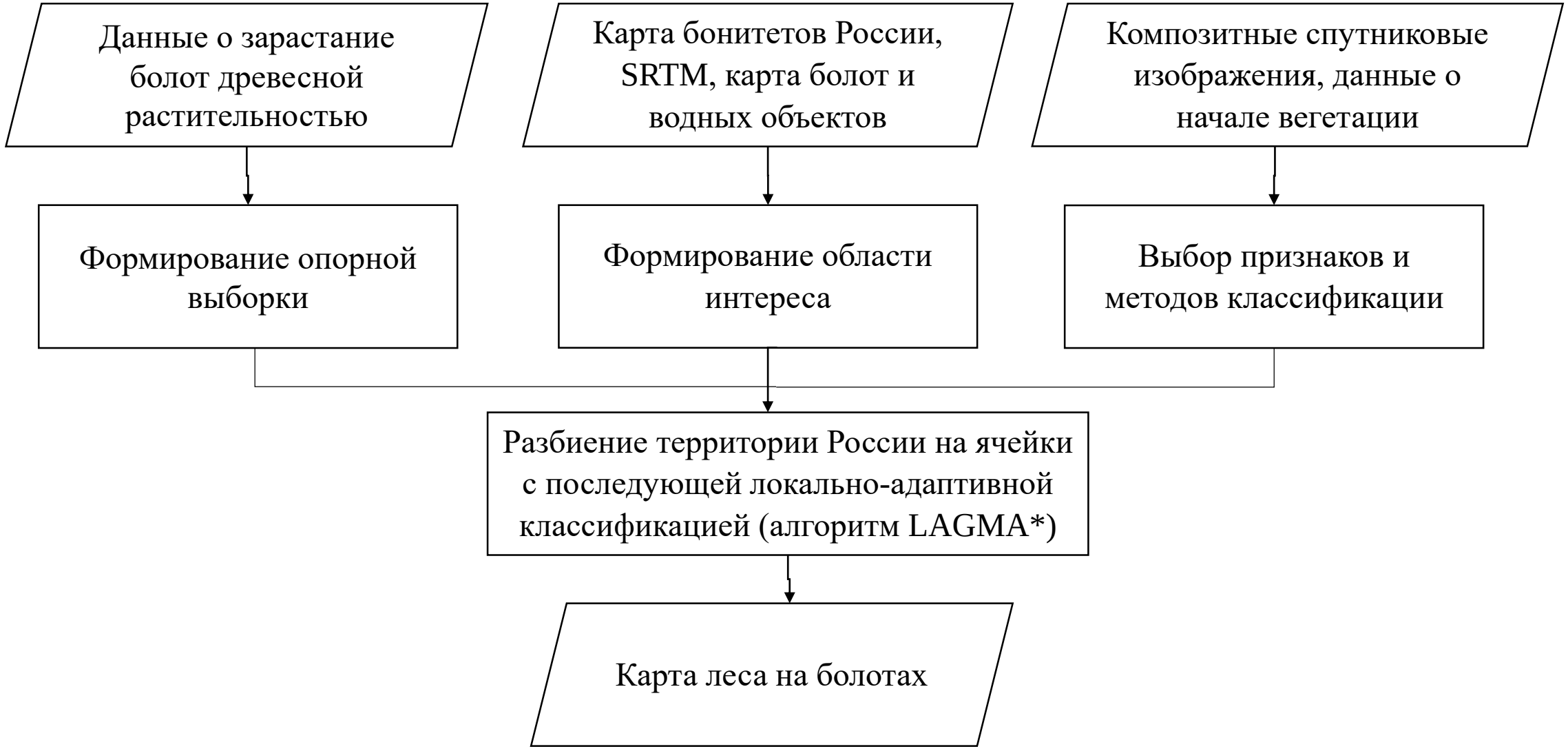


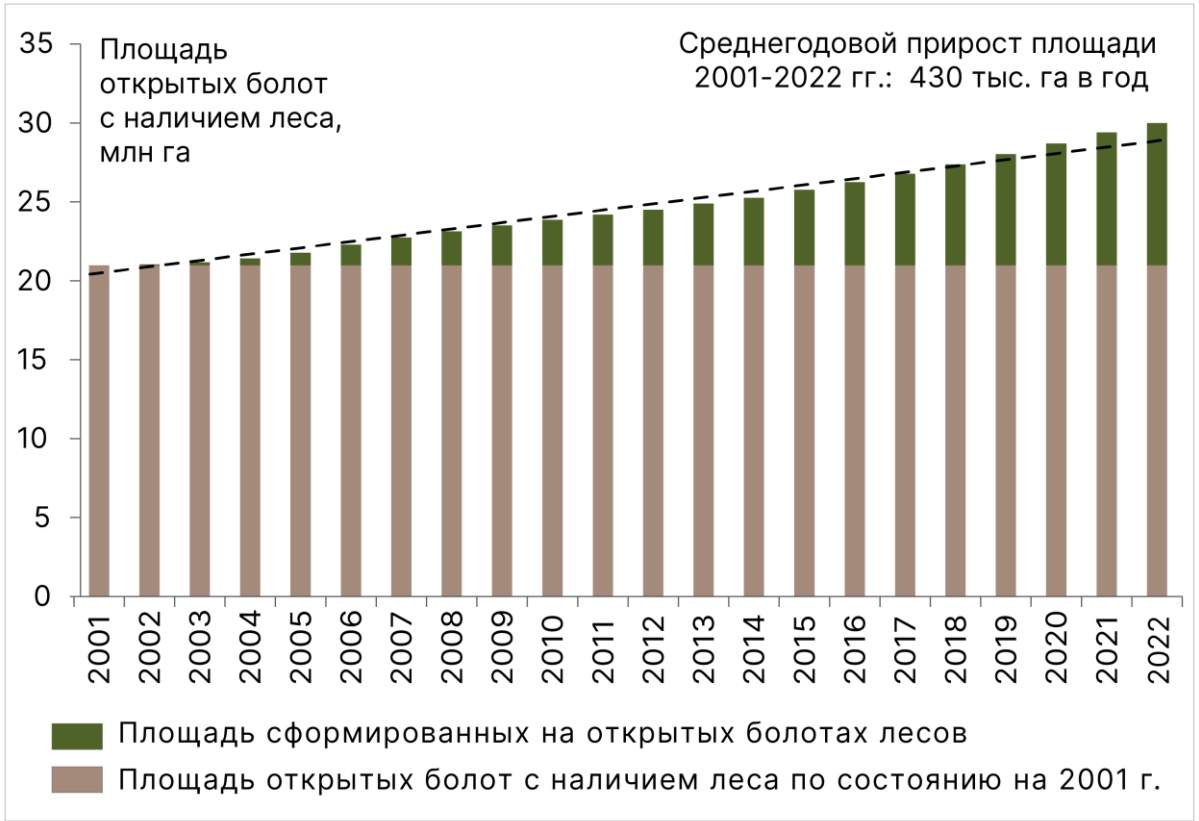
Схема метода автоматизированного картографирования лесов на болоте

*Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A. *A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data* // Remote Sensing Letters, 2014, Vol. 5, Issue 1, P. 55–64

Данные о зарастании болот древесной растительностью

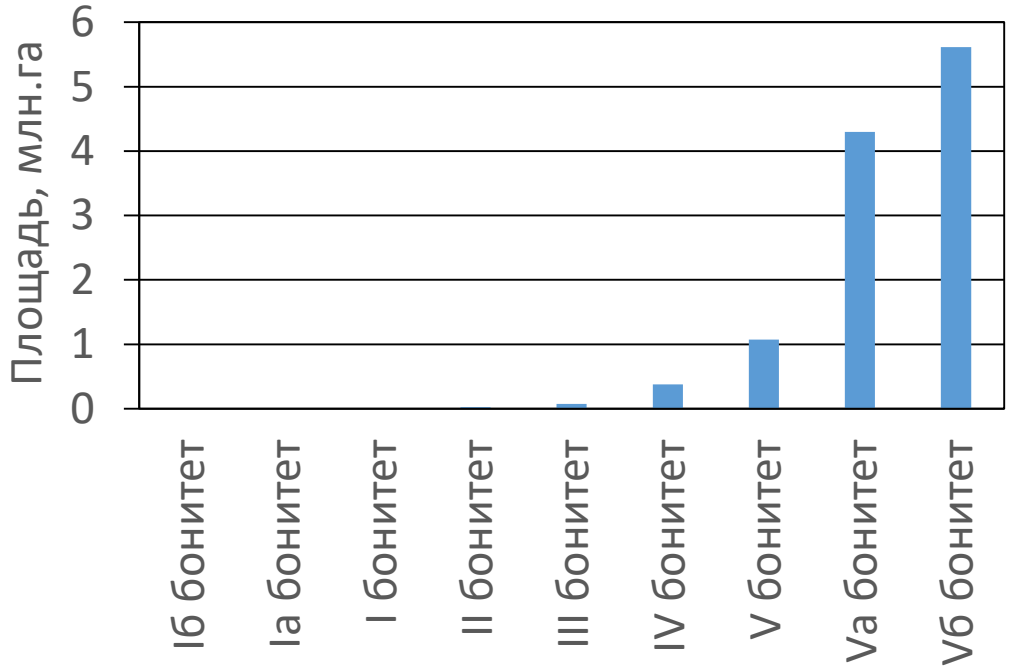
Для построения карт на основе классификации необходимо задействовать независимые данные, охватывающие всю территорию России. Для построения выборки для класса леса на болотах использовались полученные ранее данные о зарастании открытых болот древесной растительностью (Барталев и др., 2025). Для создания выборки автоморфных лесов использовались карты наземных экосистем с выделением различных типов леса.



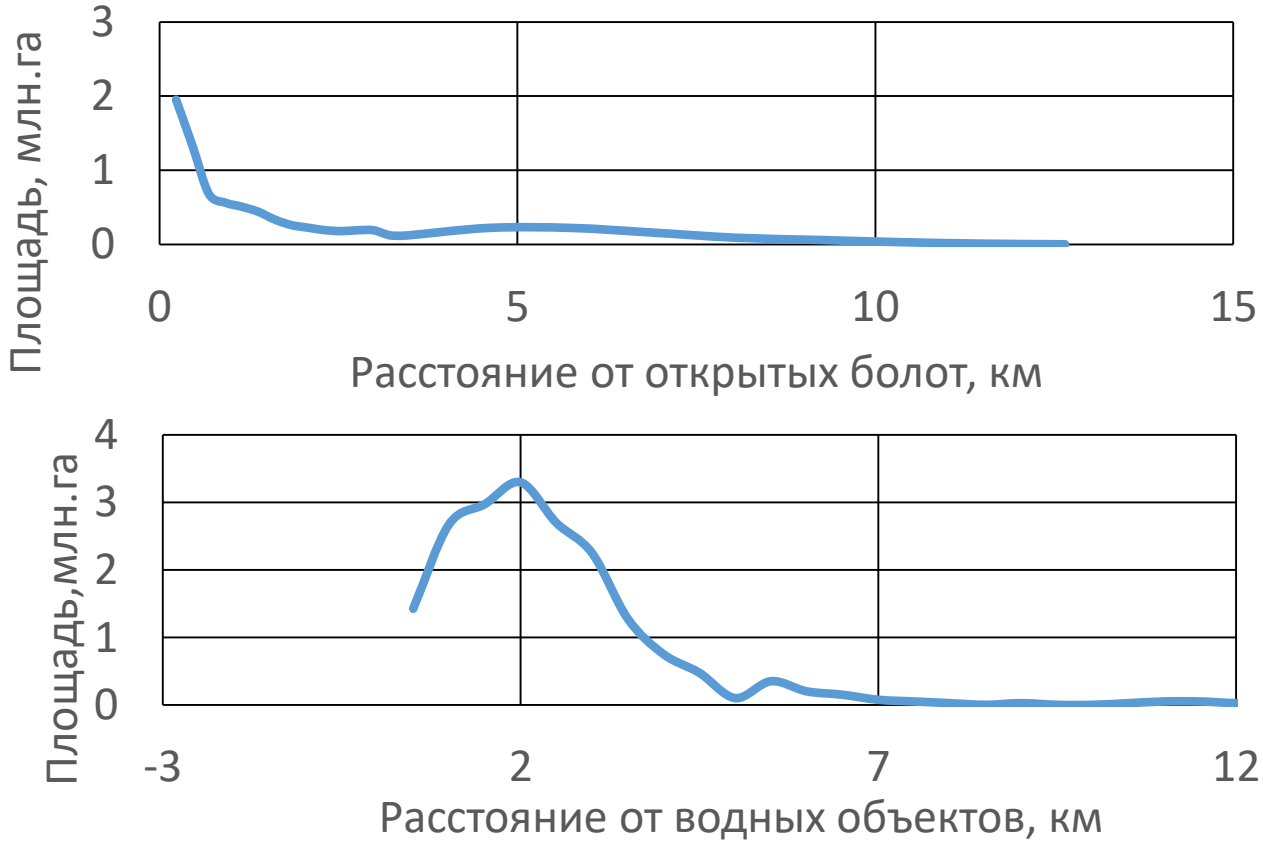


Заросшие в период 2001–2022 годов лесной древесной растительностью территории открытых болот России (слева) и ежегодная динамика их покрытой лесом площади (справа)

Формирование области интересов



Распределение леса на болотах по бонитету



Распределение леса на болотах по расстоянию от открытых болот

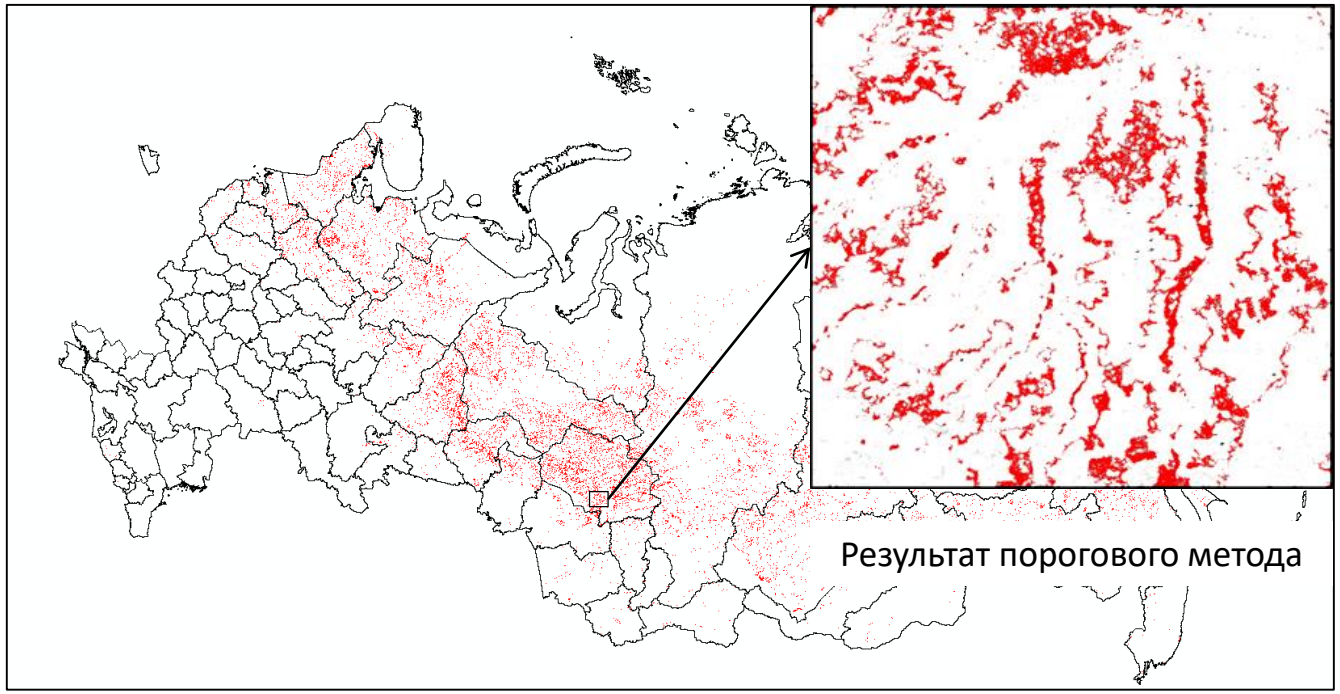
Анализ опорных данных показал, что основная площадь леса на болотах приходится на территории с 4 и 5 классом бонитета и на расстояние до 4 км от болот и водных объектов. Результат классификации маскировался с применением данных критериев.

Выбор признаков и методов классификации

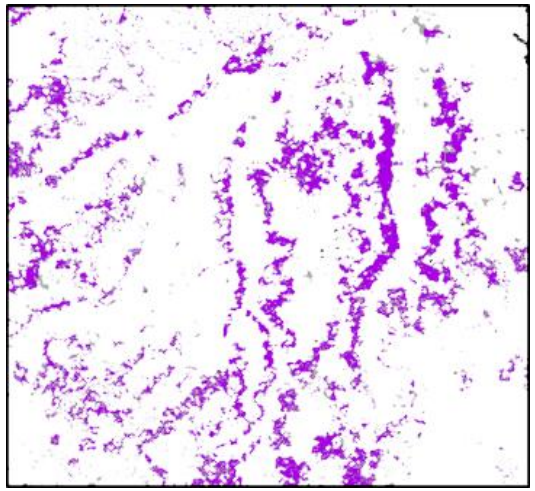
Были исследованы разные признаки с последующим сравнением с результатом локальной классификации в Томской области (Шинкаренко и др., 2024), использованным в качестве эталонных данных . Получена матрица ошибок и вычислены параметры, отражающие степень достоверности вычислений алгоритма и использованных признаков. В нашем случае были использованы параметры Полнота (Recall), Точность (Precision), Общая точность (Accuracy) и F1 мера. Наилучшую разделимость показывает признак максимума начала вегетации, полученный за период в 20 лет.

	Ошибка 1 рода, %	**Ошибка 2 рода, %**	**Полнота (Recall) , %**	**Точность для леса на болоте (Precision), %**	**F1 мера, %**	**Общая точность (Accuracy), %**
Пороговый метод	5,81	51,13	48,87	79,41	60,47	79,89
Данные КСЯ по MODIS каждые 5 дней (60 признаков)	15,89	67,45	32,55	41,83	36,58	71,31
Данные начала вегетации за 20 лет	19,96	59,68	40,32	49,32	44,38	67,12
Данные начала вегетации за 10 лет	19,63	55,30	44,70	52,85	48,42	68,57
Данные начала вегетации за 5 лет	19,31	50,92	49,07	56,38	52,47	70,02
Данные начала вегетации за 1 год	18,98	46,55	53,45	59,92	56,51	71,47
Данные максимума начала вегетации за 20 лет	17,89	36,39	63,61	68,39	65,91	71,11
Данные максимума начала вегетации за 10 лет	18,10	37,12	62,88	67,75	65,28	72,77
Данные максимума начала вегетации за 5 лет	18,33	37,79	62,21	66,99	64,61	74,38
Данные максимума начала вегетации за 20 лет + исключение из выборки автоморфного леса пород, произрастающих на болотах	**17,40**	**24,35**	**75,65**	**70,12**	**72,76**	**74,08**

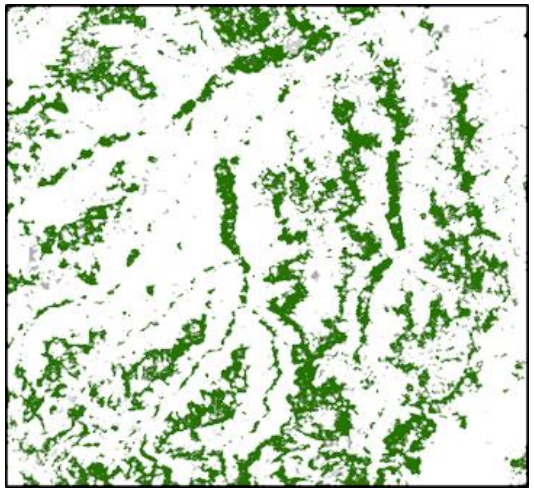
Предварительные результаты



Результат порогового метода



Результат классификации



Полученный ранее с помощь локальной классификации результат (Шинкаренко и др. 2024)

Получены предварительные карты древесных, расположенных на болотах, площадь которых на территории России составила 41,57 млн.га по пороговому методу и 47,38 млн.га по результатам классификации

Благодарим за внимание

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (тема «Мониторинг», госрегистрация № 126031818938-6) с использованием сервиса «Вега-Science» и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2019, http://ckp.geosmis.ru).

Список литературы

1. Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. – М.: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
2. Барталев С.А., Шинкаренко С.С., Егоров В.А., Лупян Е.А., Сайгин И.А., Стыценко Е.А., Стыценко Ф.В., Ховратович Т.С. Оценка динамики зарастания лесной древесной растительностью болот России по данным спутникового мониторинга // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2025. № 6. — С. 681–689.
3.Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
4.Миклашевич Т.С., Барталев С.А., Плотников Д.Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 143–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
5.Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Дюкарев Е.А., Головацкая Е.А., Сайгин И.А. Развитие методов картографирования болотных комплексов Западной Сибири на основе временных рядов данных дистанционного зондирования и машинного обучения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21, № 6. С. 200–212. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-200-212.
6.Хвостиков С.А., Барталев С.А. Оценка бонитета и возраста лесных насаждений с помощью данных ДЗЗ и методов машинного обучения // Материалы 21-й Международной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». — Москва: ИКИ РАН, 2023. — С. 411. — DOI: 10.21046/21DZZconf-2023a.
7.Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A. *A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data* // Remote Sensing Letters, 2014, Vol. 5, Issue 1, P. 55–64
8.Hawker L., Uhe P., Paulo L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. Vol. 17, № 2. Article 024016.