

СРАВНЕНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ СПЕКТРАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КОРЕННЫХ СООБЩЕСТВ СРЕДНЕЙ ТАЙГИ ДЛЯ ОЦЕНКИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ТРАНСФОРМАЦИЙ

Т. А. Мыльникова, А. Ю. Боровлёв, В. В. Елсаков, В. М. Щанов
Институт биологии Коми НЦ УрО РАН

В статье представлены результаты анализа межгодовых изменений спектральных индексов NDVI и EVI, показателей сомкнутости крон участка старовозрастных заболоченных лесов средней тайги временного интервала 1985-2022 гг. Для анализа использовали временные ряды спутниковых изображений Landsat (сенсоры TM, ETM+ и OLI) и Terra-MODIS. Участки лесных массивов характеризовались стабильными величинами показателей сомкнутости (порядка 80-90 %). Для смежных территорий наибольший рост (2-3 % в год) наблюдали для участка восстанавливающейся гари (18.07.1973). Отмечен слабый тренд роста индекса NDVI. Формирование слабого положительного тренда изменений спектральных индексов связано с наличием ряда погрешностей. Среди возможных погрешностей определения трендов отмечены сезонные различия показателей NDVI и EVI на изображениях разных лет и различия сопоставляемых сенсоров. Наиболее высокие отклонения индексов на съемках Landsat, превышающие средние июльские значения от 9,0 до 15 %, наблюдали для сцен, полученных в период максимального развития фитомассы – середины вегетационного периода 18-21 июля (сцены сенсоров Landsat 8 OLI 2016-2021 гг., 199-202 дни). Сравнение сопоставимости съемок, выполненных на одну дату методом расчета критерия относительной процентной разницы (relative percentage difference, RPD), показало, что сенсоры OLI превышали показатель EVI на 2- 3% относительно ETM+ и 1-2 % по NDVI. Отмечено завышение величин NDVI и EVI по ETM+ над TM на 3-4% соответственно. Суммарные различия сенсоров TM5 и OLI можно ожидать в 5- 7% по EVI и 4- 5% – по NDVI.

Ключевые слова: старовозрастные еловые насаждения, спутниковые методы исследований, глобальные трансформации бореальных экосистем

THE COMPARISON OF SPECTRAL INDICATORS OF INDIGENOUS COMMUNITIES OF THE MIDDLE TAIGA FOR ASSESSMENT OF CLIMATIC TRANSFORMATIONS

T. A. Mylnikova, A. Y. Borovlev, V. V. Elsakov, V. M. Shchanov
Institute of Biology of Komi Science Centre (IB FRC Komi SC UB RAS)

The research findings show interannual variations in the spectral indices NDVI and EVI, the indicators of crown closure of the old wetland forests in the middle taiga over the period 1985 - 2022. Terra-MODIS and time series of Landsat satellite images (TM, ETM+, and OLI sensors) were used in the analysis. The forested areas were characterized by stable values of crown density indicators (about 80-90%). In the neighbouring areas, the highest increment (2-3% per year) was observed on the area being regenerated after forest fires (07.18.1973). The NDVI index showed a feeble increasing trend. The spectral index changes that show a slight positive trend occur as a result of certain errors. The potential sources of error in these trends are a result of the seasonal variations in NDVI and EVI indicators across images from several years, as well as variations between the compared sensors. The images made between July 18 and 21, in the middle of the vegetation

period, during the period of maximal phytomass growth, showed the highest index deviations in Landsat images, surpassing the typical values for July by 9.0 - 15% (based on Landsat 8 OLI images from 2016-2021, 199-202 days). The images from the same date were compared by calculating the relative percentage difference criterion (RPD) that showed that OLI sensors overestimated the EVI index by 2-3% relative to ETM+ and 1-2% according to NDVI. There was an overestimation of NDVI and EVI values for ETM+ over TM by 3-4%, respectively. The total differences between TM5 and OLI sensors are estimated at 5-7% for EVI and 4-5% for NDVI.

Key words: *old-age spruce plantations, satellite research methods, global transformations of boreal ecosystems*

Введение

Оценка скорости трансформации и устойчивости ненарушенных (коренных) лесных экосистем является одной из наиболее важных для выявления глобальных и региональных трендов изменений. В.В. Пахучий (1999) определяет ненарушенные леса, как «насаждения, развивавшиеся без влияния человека и включающие в структуре древостоя не менее одного поколения породы-эдификатора, формировавшегося без воздействия катастрофических природных явлений в течение периода, близкого к возрасту естественной спелости данной породы в конкретных почвенных и климатических условиях». Отсутствие длительных непрерывных рядов наблюдений малонарушенных территорий (исключение составляют ООПТ Федерального уровня – заповедники, национальные парки, проводящие ежегодный мониторинг в рамках постоянной программы «Летопись природы») или редкая сеть научных лесных стационаров существенно ограничивают подобный анализ. В этом случае материалы спутниковых наблюдений все чаще выступают в качестве важных информационных источников при характеристике долговременных и часто слабых по амплитуде изменений ненарушенных сообществ.

Среди индикаторных показателей изменений коренных сообществ по материалам временных серий спутниковых съемок чаще всего используют показатели, связанные с анализом изменений зеленой фитомассы (спектральные индексы NDVI, EVI и др.), сомкнутость крон по ранневесенним изображениям (Елсаков, Марущак, 2011), результаты количественных оценок на субпиксельном уровне (Михеева и др., 2017), текстурные показатели (Князева и др., 2021).

Анализ трендов изменения индекса NDVI по съемке Terra-MODIS (MOD13Q1.005) равнинных лесов Печоро-Илычского заповедника (ход максимальных величин индекса за вегетационные периоды 2000-2010 гг.) показал, что для значительной части лесной территории отмечено снижение индекса с интенсивностью до 0,02 – 0,03 за 10 лет (Елсаков, Марущак, 2011), что характерно для старовозрастных лесов, для которых по мере увеличения возраста степень просматриваемости «в глубину» на аэро-фотоизображениях возрастает (Аковецкий, 1983). Анализ последующих лет наблюдений с расширением диапазона до 2023 г. показывает постепенное смещение показателя в область стабильных значений для большей части лесов или преобладания слабых положительных изменений в лесах на дренированных участках.

Для продвигающихся границ лесной растительности горных склонов экотонных зон Приполярного и Полярного Урала показан рост сомкнутости крон естественных территорий

по материалам спутниковых съемок (Shiryaev et.al., 2019). Лесные сообщества долинных участков по материалам съемки разных лет проявляли стабильность.

Основные проблемы сопоставления временных серий спутниковых съемок различных лет часто связаны с сезонными различиями состояния растительного покрова сравниваемых лет, различиями в спектральных диапазонах используемых сенсоров программы Landsat, формирующей наиболее длительный период для мониторинга. Для тундровой зоны сенсоры ETM+ в сравнении с TM системно завышали показатели по NIR (1,9 %) и NDVI (7,4 %) и занижали по RED (2,6 %) (Елсаков, 2021). Для радиометра OLI в сравнении с ETM+ отмечено слабое превышение величин для NIR-канала (1,7 %) и NDVI (4,5 %) и занижение по RED (2,3 %). Максимальные различия по индексу NDVI (в среднем по паре снимков до 11,9 %) отмечены для наиболее разнесённых во времени съёмков сенсоров OLI и TM. Коррекция и приведение сенсоров разных лет друг к другу часто нивелировали небольшие по силе, но достоверные изменения. Отдельные авторы (Терехин, 2021) для устранения погрешностей рекомендуют раздельное использование и сравнение сенсоров Landsat TM/ETM+ и Landsat OLI.

Цель работы состояла в анализе межгодовых изменений индикаторных спектральных показателей (спектральные индексы NDVI и EVI, сомкнутость крон) участков коренных сообществ средней тайги за временной период последних десятилетий (1985-2023 гг.). Сравнение выполнено методом определения трендов для сопоставления спутниковой съемки сенсоров программы Landsat с привлечением временных серий изображений Terra-MODIS (MOD13Q1.005).

Район исследования

В качестве модельной территории рассматривали участки коренных еловых лесов подзоны средней тайги в районе ж/д станции «Шиес» (граница Архангельской области и Республики Коми) (рис.1). Рельеф территории равнинный с абсолютными высотами 120–135 м над уровнем моря. Участок расположен на плоском заболоченном водоразделе рек Шиес и Камашор – притоков первого порядка р. Вычегда, характеризуется избыточным переувлажнением. Доля гидроморфных растительных сообществ составляет почти 55 %, среди них преобладают заболоченные старовозрастные еловые леса (37,8 %) и болота. Во время выполнения полевых исследований (июнь 2019 г.) отмечено присутствие видов-индикаторов малонарушенных лесов: на участке выявлено присутствие четырёх видов лишайников, включенных в Красную книгу Российской Федерации (2008), отмечены представители 15 видов редких и охраняемых животных (Елсаков и др., 2020; 2022).

Материалы и методика исследований

Определение хода индекса NDVI и EVI проводили на основании анализа съемки Terra-MODIS (MOD13Q1.005) по максимальным величинам каждого вегетационного периода 2000-2023 гг. (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Для анализа изменений индексов по снимкам программы Landsat использовали 13 июльских сцен 1985-2021 гг. (источник данных: <https://earthexplorer.usgs.gov/>, уровень обработки 2.0). Изменение показателя сомкнутости крон древостоев проводили по 15 сценам серии спутника Landsat (TM5, ETM+ и OLI) 1986-2023 гг., полученных для ранневесеннего интервала 11.03 – 11.04. Определение и верификацию показателя проводили по ранее представленному алгоритму (Мыльников, Елсаков, 2022).

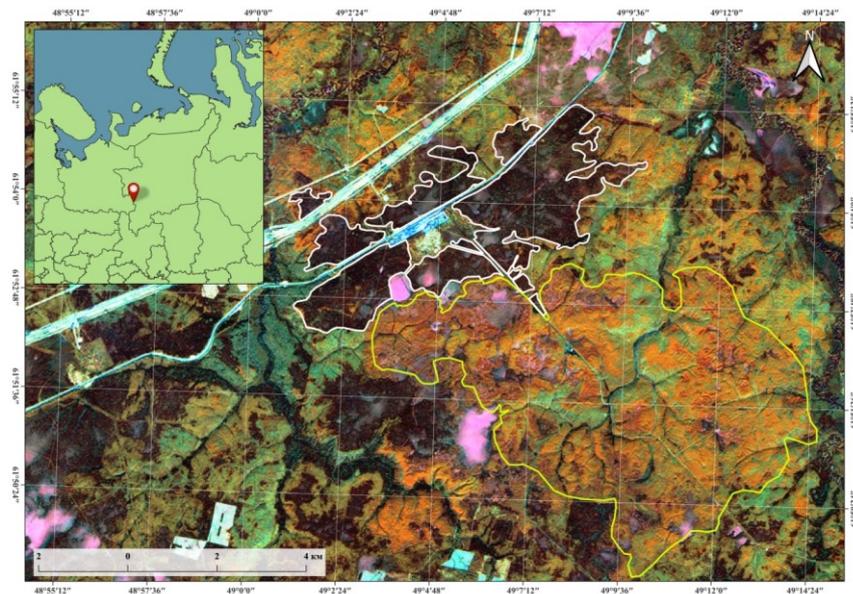


Рис. 1. Локализация участка выполнения работ. Спутниковый снимок Sentinel 21.05.2019 с контуром участка обследованных малонарушенных лесных сообществ (белый) и наиболее ранней гари 18.07.1973 (желтый)

При оценке возможных погрешностей, связанных с сезонными различиями, анализировали ход индексов в течение вегетационного сезона без учёта года съёмки. Для оценки погрешностей, вызванных использованием различных сенсоров Landsat, сравнивали значения индексов по съёмкам TM5, ETM+ и OLI. Прямое сравнения снимков TM и OLI, из-за отсутствия перекрытия в сроках получения снимков, выполнить не удастся. Однако сопоставить различия сенсоров возможно через ETM+, полученных на близкую дату съёмки (см. таблицу). Для участка составляли пары значений спектральных индексов по TM5-ETM+ (24.07.2011 и 23.07.2011) и OLI-ETM+ (18.07.2018 и 19.07.2018). Различия распределения спектральных индексов NDVI и EVI на сценах сенсоров Landsat 5TM, 7ETM+ и 8OLI рассчитывали относительно сенсора 7ETM+ с использованием критерия относительной процентной разницы (*relative percentage difference*, RPD) (Huang et al., 2013):

$$RPD = \frac{\rho_i - \rho_{L7ETM+}}{\rho_{L7ETM+}} * 100\%, \tag{1}$$

где ρ_i и ρ_{L7ETM+} соответствующие значения для отдельных каналов сравниваемых спутниковых изображений сенсора i и Landsat 7ETM+.

Материалы сравниваемых съёмок Landsat TM/ETM+/OLI

Спутники	Снимки
Площадь, км ²	327,4
Landsat 5 TM, path/row	24.07.2011, 173/17
Landsat 7 ETM+, path/row	23.07.2011, 174/17 19.07.2018, 173/17
Landsat 8 OLI, path/row	18.07.2018, 174/17

При характеристике климатических трансформаций последних лет использованы данные архива ГУ «ВНИИГМИ-МЦД» по состоянию погоды по наиболее приближенной м/ст «Усть-Вымь» за временной интервал 1965-2023 гг.

Результаты исследования

Анализ изменений приземной температуры воздуха (ПТВ) показывает, что начало периода наблюдений с помощью спутниковых данных Landsat (1985 г.) приходится на формирующуюся фазу положительных смещений температуры (1-2 °С) в поздневесенний и летний вегетационный период (рис. 2).

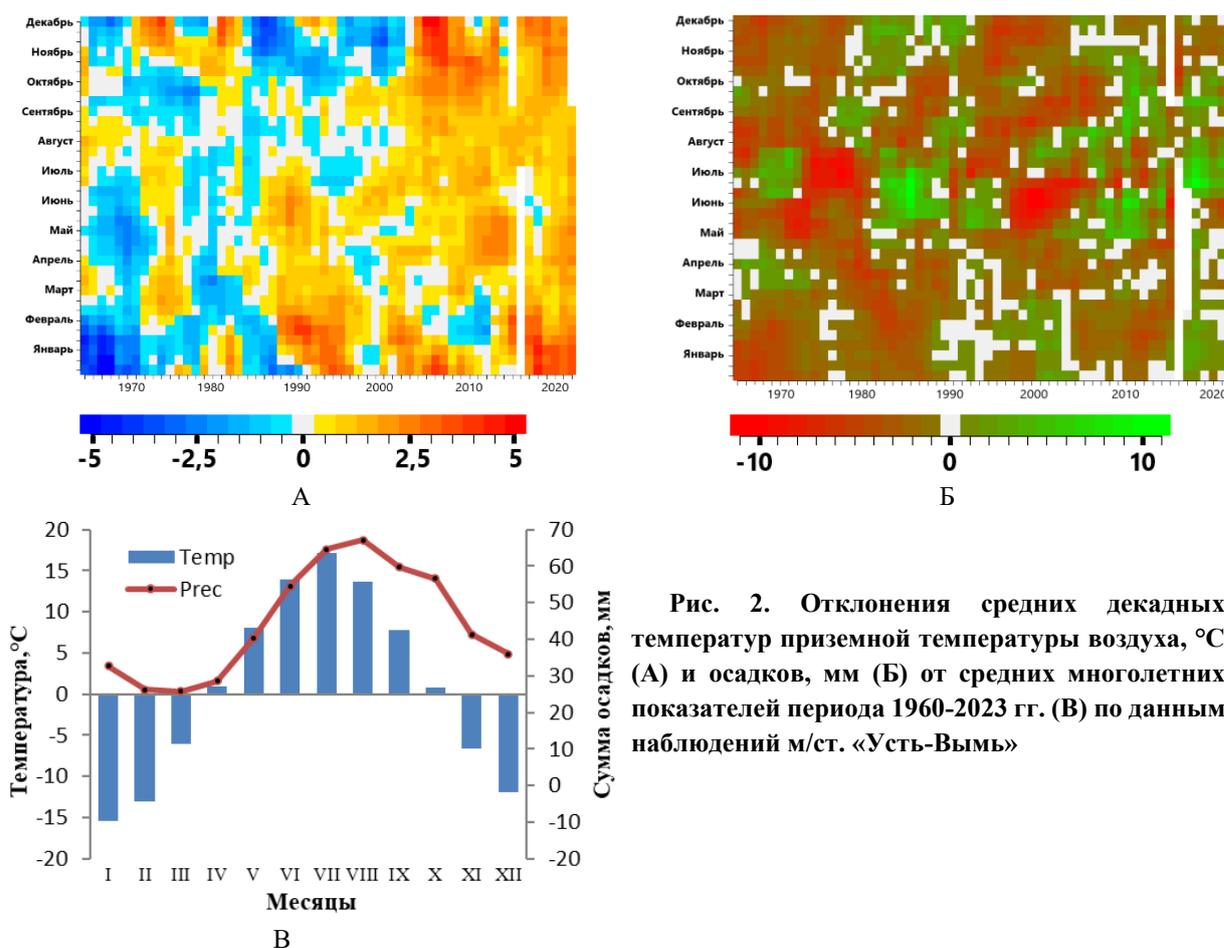


Рис. 2. Отклонения средних декадных температур приземной температуры воздуха, °С (А) и осадков, мм (Б) от средних многолетних показателей периода 1960-2023 гг. (В) по данным наблюдений м/ст. «Усть-Вымь»

Для 1990-1991 гг. отмечены величины отклонений в 2 °С. Небольшие интервалы снижения температуры отмечены для 1996-1999 гг. Устойчивый рост средних величин ПТВ для большинства месяцев года (максимальный рост на 2-3 °С) наблюдали с 2005 г. Фаза роста ПТВ продолжается по настоящее время. Сходные интервалы изменения фаз отмечены и для количества выпавших осадков (КВО). В летние периоды 1983-1996 гг. наблюдали общий рост КВО и последующее снижение в 1997-2006 гг. Для зимних месяцев суммарный тренд изменений связан с ростом показателя.

На спутниковых изображениях Landsat и MODIS значения индекса NDVI превышали показатели EVI. Для интервалов 1985-1997 гг. и 2001-2011 гг. показатели EVI характеризовались более стабильными значениями, чем NDVI: $0,26 \pm 0,02 \div 0,30 \pm 0,02$ по EVI ($X \pm SD$). Значения NDVI существенно варьировали в течение периода $0,65 \pm 0,02 \div 0,80 \pm 0,01$ (рис. 2). Для периода 2013-2021 гг. отмечен слабый рост величин индексов (менее 0,01 в год).

В отличие от съемок Landsat, несмотря на амплитуду варьирования показателей максимального развития зелёной фитомассы, формируемую в отдельные годы, общий тренд изменений значений индекса NDVI по съемкам Terra-MODIS (MOD13Q1.005) периода 2000-2022 гг. характеризовался стабильными величинами (до 1% в год). Годы с минимальными и максимальными усредненными значениями индексов по разным индексам не совпадали: минимальные – по EVI наблюдались в вегетационный период 2001 г., по NDVI – в 2002 г., максимальные – в 2020 г. и 2018 г. соответственно.

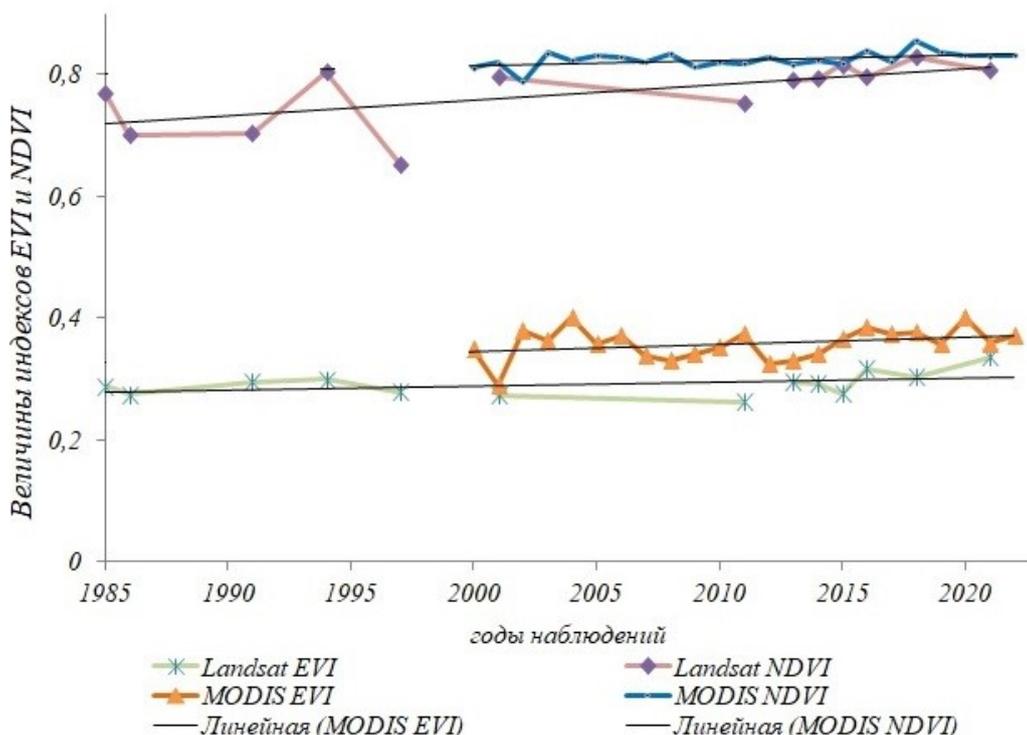


Рис. 3. Ход средних показателей NDVI и EVI по материалам съемки MODIS (2000-2022 гг.) и сенсоров программы Landsat (TM5, ETM+, OLI) для участка заболоченных старовозрастных еловых лесов

Анализ изменений показателя сомкнутости (%) участков ненарушенных лесов для 1986-2023 гг. выявил стабильность его значений (рис. 4). Тренд изменений показателя по съемке Landsat варьировал вокруг стабильного (без изменений) от небольших вкраплений слабых отрицательных изменений (слабее -0,5 % в год) для заболоченных ельников до слабых положительных (слабее 0,5 % в год) на небольших более дренированных участках. Участки ненарушенных заболоченных еловых лесов имели сходные величины изменения сомкнутости с рядом локализованными сосняками лишайниковыми. Наиболее высокие значения роста показателя сомкнутости (на 2,5-3,0 % в год) демонстрируют восстанавливающиеся лесные сообщества смежного участка на месте ранней гари (1973 г.). На участке преобладали лиственные насаждения с сохранившимися одиночными деревьями и подростом ели. Для слабонарушенных сообществ средний рост сомкнутости составил от 0,5 до 1,5 % в год.

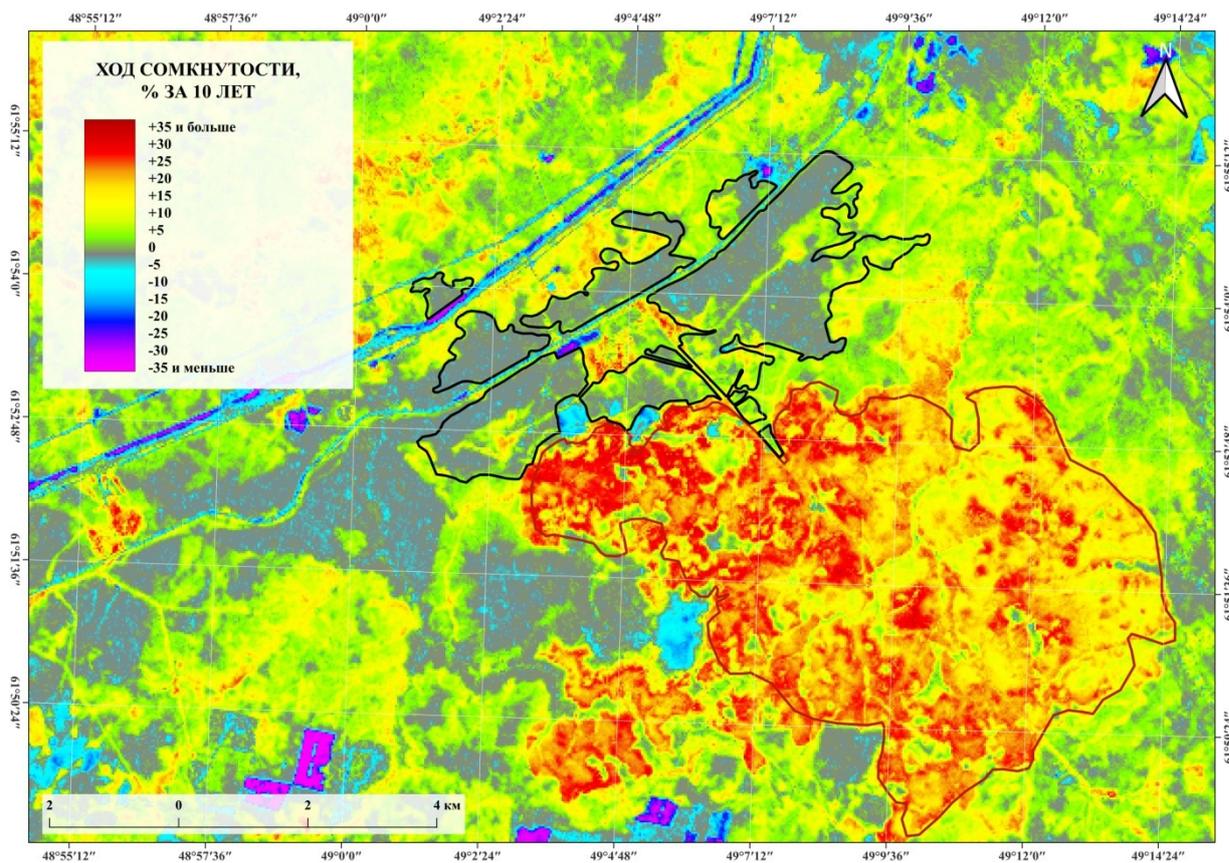


Рис. 4. Рассчитанный тренд хода сомкнутости крон (% за 10 лет) за период 1986-2023 гг. для модельного участка и прилегающих территорий

Результаты

Отсутствие выраженных трендов изменений спектральных индексов по MODIS (2000-2021 гг.) и Landsat (1985-2011 гг.) и выявленные тренды роста в период 2013-2021 гг. могут быть обусловлены как погрешностями, связанными с сезонными различиями сравниваемых сцен, так и различиями сенсоров. Алгоритм анализа съемок MODIS (отбор максимальных за вегетационный период значений) полностью нивелировал данные погрешности. Наиболее высокие значения индексов EVI и NDVI на съемках Landsat наблюдали в период максимального развития фитомассы – середины вегетационного периода 18-21 июля (сцены сенсоров Landsat 8 OLI 2016-2021 гг., 199-202 дни), они превышали средние значения на 9-15 % по EVI и 4-7% по NDVI (рис. 5). Именно присутствие этих изображений в конце построенного временного ряда наблюдений обусловили формирование суммарного положительного тренда изменений. Нивелирование изображений демонстрирует отсутствие значимых изменений обоих индексов и стабильность показателя. Для всех сцен съемки сенсоров Landsat 8 OLI характерны более высокие значения индексов NDVI.

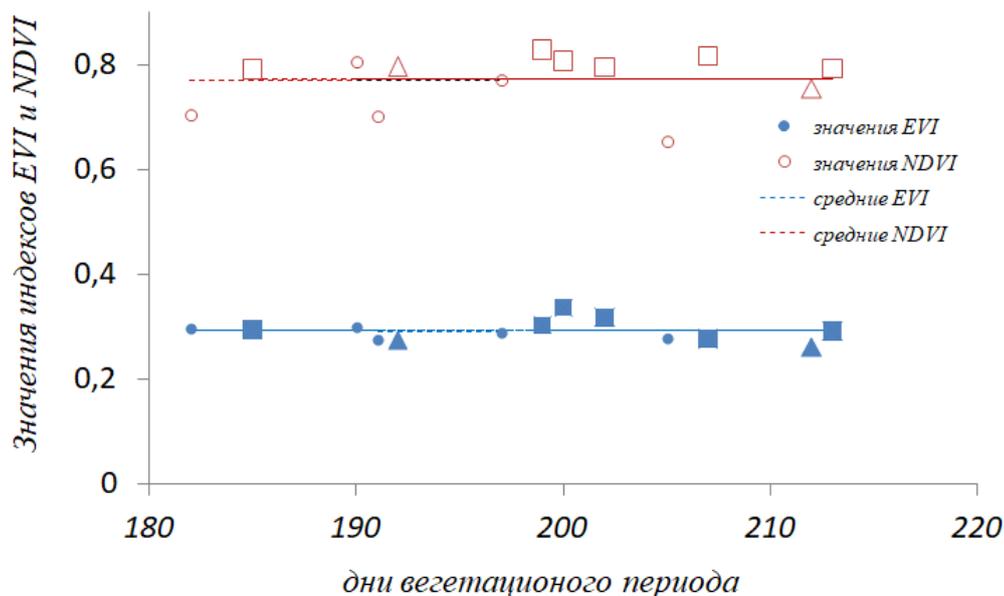


Рис. 5. Сезонные особенности формирования хода NDVI (красные маркеры) и EVI (синие маркеры) сенсоров Landsat (TM5, ETM+, OLI) для участка заболоченных старовозрастных еловых лесов

Важным источником погрешностей при расчёте трендов изменений являются различия сравниваемых сенсоров Landsat. Сравнение съёмок с разных сенсоров, полученных на близкую с сенсором ETM+ дату, путём сопоставления с сенсорами ETM+ и расчётом величин относительной процентной разницы (RPD, %), показывает наличие таких расхождений (рис. 6). В целом сенсоры OLI завышали показатель EVI на 2-3 % относительно ETM+ и 1-2 % по NDVI. Отмечено завышение величин NDVI и EVI по ETM+ над TM на 3-4 % соответственно. Суммарные различия сенсоров TM5 и OLI можно ожидать в 5-7 % по EVI и 4-5 % по NDVI.

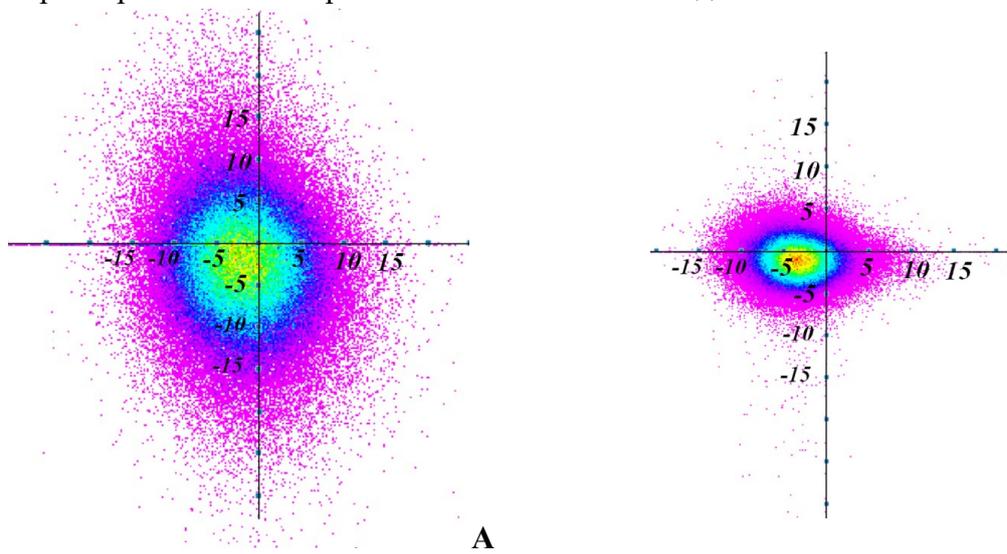


Рис. 6. Сравнение величин относительной процентной разницы (RPD, %) для индексов EVI (А) и NDVI (Б) по парам сравнения TM5-ETM+ (оси абсцисс) и OLI- ETM+ (оси ординат)

Выводы

Таким образом, на примере анализа участка изменений старовозрастных заболоченных лесов средней тайги показана стабильность спектральных показателей и индексов EVI и NDVI по сенсорам MODIS и Landsat. Для общей оценки трендов изменений растительного покрова

по спектральным индексам можно рекомендовать временные композиты индекса EVI, которые в большей степени свободны от влияния атмосферных условий, не имеют насыщения при высоких значениях и отличаются более сглаженным ходом. Выявленные изменения являлись следствием сезонных различий периодов съемки, в меньшей степени обусловлены различиями сенсоров программы Landsat (уровень обработки 2.0).

Работа выполнена в рамках реализации инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учета данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

Библиографический список

1. Аковецкий В.И. Дешифрирование снимков. М.: Недра, 1983. 374 с.
2. Елсаков В.В., Василевич М.И., Габова Е.В., Гончарова Н.Н., Каверин Д.А., Кочанов С.К., Кузин С.Н., Лаптева Е.М., Митюшева Т.П., Пыстина Т.Н., Семёнова Н.А., Тихонова Т.В. Риски от размещения крупных полигонов твердых коммунальных отходов на слабовосстановливаемых территориях севера России (на примере станции Шиес, Архангельская область). Сыктывкар, 2020. ФИЦ Коми НЦ УрО РАН (Сер. Научные доклады). Вып. 525. 44 с. DOI: 10.19110/89606-007.
3. Елсаков В.В., Лаптева Е.М., Василевич М.И., Габова Е.В., Каверин Д.А., Кочанов С.К., Панюкова Е.В., Митюшева Т.П., Пыстина Т.Н., Семёнова Н.А., Тихонова Т.В. Обоснование потенциальных рисков размещения полигона твёрдых коммунальных отходов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 72-79. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-072-079>.
4. Елсаков В.В., Марущак И.О. Роль спутникового мониторинга в выявлении изменений растительного покрова предгорной и горной части Урала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: сб. научн. статей. М., 2010. Вып. 7. Т.1. С. 310-318.
5. Елсаков В.В., Марущак И.О. Спектрональные спутниковые изображения в выявлении трендов климатических изменений лесных фитоценозов западных склонов Приполярного Урала // Компьютерная оптика. 2011. Т.35. №2. С. 281-286.
6. Елсаков В.В., Марущак И.О. Спутниковые изображения в анализе количественных характеристик лесных фитоценозов Печоро-Ильчского заповедника Республики Коми // Современные проблемы ДДЗ из космоса. 2011. Т.4. С. 303-309.
7. Елсаков В.В., Марущак И.О. Трансформация лесных экосистем Приполярного Урала по материалам спутниковых наблюдений // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность, мониторинг и адаптационные технологии: материалы международной конференции с элементами научной школы для молодёжи. Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2010. 275 с. URL: <http://csfm.marstu.net/publications.html>
8. Елсаков В.В., Марущак И.О. Тренды климатических изменений лесных фитоценозов западных склонов Приполярного Урала // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т.12, №1(3). С. 870-875.
9. Елсаков В.В. Спектральные различия характеристик растительного покрова тундровых сообществ сенсоров LANDSAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18, №4. С. 92–101.
10. Князева С.В., Никитина А.Д., Белова Е.И., Плотникова А.С., Подольская Е.С., Ковганко К.А. Методические подходы к оценке характеристик лесов по данным спутниковой съемки сверхвысокого пространственного разрешения в оптическом диапазоне // Лесоведение. 2021. № 6. С. 645-672. <https://doi.org/10.31857/S0024114821060073>.
11. Михеева А.И., Тутубалина О.В., Зимин М.В., Голубева Е.И. Методика субпиксельной классификации растительности экотона "тундра-тайга" по космическим изображениям (на примере долины р. Тульок, Хибинские горы) // Исследование Земли из космоса. 2017. №1. С. 24-34.

12. Мыльникова Т.А., Елсаков В.В. Прогнозирование верхней границы леса национального парка «Югыд Ва» под влиянием климатических трансформаций // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: материалы международной научной конференции. Йошкар-Ола. 2022. № 8. С. 45-54. <https://doi.org/10.25686/2022.84.60.005>.
13. Пахучий В.В. Девственные леса Северного Приуралья. СПб.: Наука, 1999. 136 с.
14. Терёхин Э.А. Пространственно-временная оценка лесистости овражно-балочных систем среднерусской лесостепи с применением спектрально-отражательных признаков // Исследование Земли из космоса. 2021. № 4. С. 84-96. <https://doi.org/10.31857/S0205961421040060>.
15. Huang W., Huang J., Wang X., Wang F., Shi J., Comparability of Red/Near-Infrared Reflectance and NDVI Based on the Spectral Response Function between MODIS and 30 Other Satellite Sensors Using Rice Canopy Spectra // Sensors (Basel). 2013. Vol. 12. №. 13. P. 16023–16050.
16. Shiryaev A.G., Moiseev P.A., Peintner U., Devi N.M., Kukarskih V.V., Elsakov V.V. Arctic Greening Caused by Warming Contributes to Compositional Changes of Mycobiota at the Polar Urals // Forests. 2019. №10(12). P. 1-24. <https://doi.org/10.3390/f10121112>.

References

1. Akovetskii V.I. Deshifirovanie snimkov (The deciphering of images). M.: Nedra, 1983. 374 p.
2. Elsakov V.V., Vasilevich M.I., Gabova E.V., Goncharova N.N., Kaverin D.A., Kochanov S.K., Kuzin S.N., Lapteva E.M., Mityusheva T.P., Pystina T.N., Semenova N.A., Tikhonova T.V. Riski ot razmeshcheniya krupnykh poligonov tverdykh kommunal'nykh otkhodov na slabovosstanovlivayushchikhsya territoriyakh severa Rossii (na primere stantsii Shies, Arkhangel'skaya oblast') (Risks from solid municipal waste placement on large polygons located on weakly restoring territories of the Russian North (based on the example of railway station Shies, Arkhangelsk region)). Syktyvkar, 2020. FRC Komi SciC UrO RAN (Ser. Scientific reports). Vol. 525. 44 p. DOI: 10.19110/89606-007
3. Elsakov V.V., Lapteva E.M., Vasilevich M.I., Gabova E.V., Kaverin D.A., Kochanov S.K., Panyukova E.V., Mityusheva T.P., Pystina T.N., Semenova N.A., Tikhonova T.V. Obosnovanie potentsial'nykh riskov razmeshcheniya poligona tverdykh kommunal'nykh otkhodov (The assessment of potential risks of solid municipal waste landfill). *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2022. No 4. P. 72-79. <https://doi.org/10.25750/1995-4301-2022-4-072-079>.
4. Elsakov V.V., Marushchak I.O. Rol' sputnikovogo monitoringa v vyyavlenii izmenenii rastitel'nogo pokrova predgornoi i gornoi chasti Urala (The role of satellite monitoring in revealing changes in vegetation cover of the foothill and mountainous part of the Ural Mountains). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. M., 2010. Vol. 7. T.I. P. 310-318.
5. Elsakov V.V., Marushchak I.O. Spektrozonal'nye sputnikovye izobrazheniya v vyyavlenii trendov klimaticheskikh izmenenii lesnykh fitotsenozov zapadnykh sklonov Pripolyarnogo Urala (Spectrazonal satellite images for estimation of climatic trends of forest vegetation on west slopes of Subpolar Ural). *Komp'yuternaya optika*. 2011. T.35, No 2. P. 281-286.
6. Elsakov V.V., Marushchak I.O. Sputnikovye izobrazheniya v analize kolichestvennykh kharakteristik lesnykh fitotsenozov Pechoro-Ilychskogo zapovednika Respubliki Komi (The satellite monitoring of quantitative parameters of forest ecosystems of Pechoro-Ilych Natural Reserve). *Sovremennye problemy DDZ iz kosmosa*. 2011. T.4. P. 303-309.
7. Elsakov V.V., Marushchak I.O. Transformatsiya lesnykh ekosistem Pripolyarnogo Urala po materialam sputnikovyx nablyudenii (The forest ecosystems transformation of Subpolar Ural by the remote sensing). *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost', monitoring i adaptatsionnye tekhnologii*. Ioshkar-Ola: Mariiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2010. P. 275. URL: <http://esfm.marstu.net/publications.html>.
8. Elsakov V.V., Marushchak I.O. Trendy klimaticheskikh izmenenii lesnykh fitotsenozov zapadnykh sklonov Pripolyarnogo Urala (Spectrazonal satellite images for estimation of climatic trends of forest vegetation on west slopes of Subpolar Ural). *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAS*. 2010. T.12. No 1(3). P. 870-875.
9. Elsakov V.V. Spektral'nye razlichiya kharakteristik rastitel'nogo pokrova tundrovnykh soobshchestv sensorov LANDSAT (Spectral differences in vegetation cover characteristics of tundra communities by LANDSAT

- sensors). *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2021. T. 18, No 4. P. 92–101.
10. Knyazeva S.V., Nikitina A.D., Belova E.I., Plotnikova A.S., Podol'skaya E.S., Kovganko K.A. Metodicheskie podkhody k otsenke kharakteristik lesov po dannym sputnikovoi s"emki sverkhvysokogo prostranstvennogo razresheniya v opticheskom diapazone (Methods and approaches to the estimation of forest characteristics using the optical satellite data of very high spatial resolution). *Lesovedenie*. 2021. № 6. P. 645-672. <https://doi.org/10.31857/S0024114821060073>.
 11. Mikheeva A. I., Tutubalina O. V., Zimin M.V., Golubeva E.I. Metodika subpiksel'noi klassifikatsii rastitel'nosti ekotona "tundra-taiga" po kosmicheskim izobrazheniyam (na primere doliny r. Tul'ok, Khibinskie gory) (Subpixel classification of tundra-taiga ecotone using Terra ASTER imagery (case study of Tuliok river Valley, Khibiny Mountains, Russia)). *Issledovanie Zemli iz kosmosa*. 2017. No 1. P. 24-34.
 12. Myl'nikova T.A., Elsakov V.V. Prodvizhenie verkhnei granitsy lesa natsional'nogo parka Yugyd Va pod vliyaniem klimaticheskikh transformatsii (The expansion of upper forest boundary in the national park Yugyd va under climatic impact). *Lesnye ekosistemy v usloviyakh izmeneniya klimata: biologicheskaya produktivnost' i distantsionnyi monitoring*. Ioshkar-Ola, 2022. No 8. P. 45-54. <https://doi.org/10.25686/2022.84.60.005>
 13. Pakhuchii V.V. Devstvennye lesa severnogo Priural'ya (Virgin forests of the Northern Ural Mountains). SPb.: Nauka, 1999. 136 p.
 14. Terekhin E.A. Prostranstvenno-vremennaya otsenka lesistosti ovrazhno-balochnykh sistem srednerusskoi lesostepi s primeneniem spektral'no-otrazhatel'nykh priznakov (Spatio-temporal assessment of forest cover of small-dry-valleys in the central russian forest-steppe using spectral response). *Issledovanie zemli iz kosmosa*. 2021. No. 4. P. 84–96. <https://doi.org/10.31857/S0205961421040060>.
 15. Huang W., Huang J., Wang X., Wang F., Shi J., Comparability of Red/Near-Infrared Reflectance and NDVI Based on the Spectral Response Function between MODIS and 30 Other Satellite Sensors Using Rice Canopy Spectra. *Sensors (Basel)*, 2013. Vol. 12, №.13. P. 16023–16050.
 16. Shiryaev A.G., Moiseev P.A., Peintner U., Devi N.M., Kukarskih V.V., Elsakov V.V. Arctic Greening Caused by Warming Contributes to Compositional Changes of Mycobiota at the Polar Urals. *Forests*, 2019. №10(12). P. 1-24. <https://doi.org/10.3390/f10121112>.