

## Анализ сходимости временных серий спутниковых съёмок различного пространственного разрешения для региона Большеземельской тундры

В. В. Елсаков

*Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, 167982, Россия  
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru*

Для участка территории Большеземельской тундры (порядка 102 тыс. км<sup>2</sup>) выполнен анализ сходимости усреднённых максимальных величин и краткосрочных трендов межгодовых изменений индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) по временным спутниковым съёмкам серий GIMMS (3G) (*англ.* Global Inventory Modeling and Mapping Studies), SPOT-VGT (S10) и MODIS (MOD13Q1 коллекция 6.1) (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) по перекрывающемуся временному периоду 2000–2003 гг. Сравнимые спутниковые изображения имели различия в пространственном и спектральном разрешении, временном шаге композитов. Сопоставление проводили путём генерализации изображений большей детальности до снимка с меньшим пространственным разрешением. Для усреднённых межгодовых максимальных значений NDVI рассмотренные съёмки демонстрируют низкий уровень сходимости. Съёмки серий GIMMS (3G) существенно превышали индекс (в среднем на 10–15 % по отношению к MODIS и на 20–30 % к SPOT-VGT), в парах сравнения наблюдали низкие коэффициенты корреляции ( $r$ ). При увеличении пространственного разрешения и сужении спектральных диапазонов наблюдали рост степени согласованности результатов по распределению средних величин NDVI. Несмотря на завышение показателя по MODIS в сравнении со SPOT-VGT, между съёмками отмечена наиболее высокая корреляция ( $r = 0,76$  при  $p = 0,05$ ). Самые интенсивные изменения за период перекрывающихся лет наблюдений по показателю межгодового линейного тренда изменений ( $\beta$ ), рассчитанному для максимальных годовых значений индекса NDVI, наблюдали на съёмках наибольшей детальности MODIS. Снижение детальности изображений сопряжено с уменьшением показателя  $\beta$ . На всех снимках отмечены изменения, связанные с ростом продуктивности в области южного экотона мелкоерниковых кустарниковых тундр. Сравнимые пары изображений имели низкие коэффициенты корреляции по показателю  $\beta$ . Наиболее высокие показатели наблюдали между MODIS и SPOT-VGT ( $r = 0,40$  при  $p = 0,05$ ). Для временных серий MODIS отмечены наилучшие возможности выявления трендов временных изменений растительного покрова.

**Ключевые слова:** временные композиты спутниковых изображений, NDVI, изменения растительности, Большеземельская тундра

Одобрена к печати: 14.01.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-148-161

### Введение

Наборы временных серий спутниковых изображений широко используются для выделения долгосрочных монотонных трендов изменений растительного покрова на глобальном и региональном уровне. Несмотря на то, что современные возможности обработки больших объёмов данных уже позволяют составлять и анализировать временные серии снимков высокого разрешения (к примеру, композитные изображения Landsat (Berner et al., 2020)), наборы изображений низкого и среднего пространственного разрешения с высокой повторяемостью съёмок: NOAA-AVHRR (*англ.* National Oceanic and Atmospheric Administration — Advanced Very-High-Resolution Radiometer), GIMMS-NDVI (*англ.* Global Inventory Modeling and Mapping Studies — Normalized Difference Vegetation Index) версии G и 3G, SeaWiFS, SPOT-VGT (*фр.* Satellite Pour l'Observation de la Terre — Vegetation) (с последующим замещением Proba-V), MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) коллекций 4–6.1 и др. — остаются важными источниками исторических данных, материалами для глобального биоклиматического моделирования. На основании наборов временных серий построены

карты распределения зональных классов растительного покрова арктических (Walker et al., 2005) и бореальных экосистем (Барталев и др., 2011), выявлены тренды изменений растительного покрова по различным спектральным индексам всей циркумполярной области (Liu et al., 2024; Zeng et al., 2011), отдельных континентов и регионов: Северной Америки с привлечением GIMMS (Forbes et al., 2010; Goetz et al., 2005; White et al., 2009) и Terra-MODIS (Blok et al., 2011), Аляски по NOAA-AVHRR (Frost et al., 2021; Jia et al., 2003), Севера Евразии (Белоновская и др., 2016; Елсаков, 2017; Hutich et al., 2007), Центральной Сибири (Picard et al., 2005), бассейна р. Лена (Sakai et al., 2008). Для Восточной Сибири привлекались съёмки SPOT-VGT и AVHRR (Анисимов и др., 2015), Terra-MODIS (Beurs, Henebry, 2008, 2010). На основании анализа долговременных съёмок проведён ретрогнозный анализ изменений характеристик экосистем, установлены связи с фиксированными величинами инструментальных измерений — запасом фитомассы, продуктивностью, приземной температурой воздуха ((Raynolds et al., 2006, 2012; Walker et al., 2003) и др.). Для расширения временного охвата GIMMS 3G (с 1982 по 2022 г.) делаются попытки совмещения AVHRR-съёмок с генерализованными данными MODIS NDVI (MOD13C1) с получением композита PKU (*англ.* Peking University) GIMMS NDVI (Li et al., 2023).

Комбинирование съёмок, различающихся пространственным разрешением и временным охватом, расширяет понимание истории формирования трендов долгосрочных изменений растительного покрова за охваченные наблюдениями периоды (в случае GIMMS до 1982 г. включительно), позволяет осуществить верификацию выявленных трансформаций. Однако различия временного шага сравниваемых композитов, пространственного и спектрального разрешения каналов (*табл. 1*) часто вносят существенную погрешность и исключают возможность статистически корректного сопоставления результатов. Наличие пространственно-временной декорреляции итоговых результатов обработки временных серий отмечено многими исследователями (Guay et al., 2014; Liu et al., 2024; Robin et al., 2007; Zeng et al., 2011).

Таблица 1. Характеристика основных временных серий спутниковых изображений

	NOAA-AVHRR	SPOT-VGT	Terra-MODIS
Использованный продукт	GIMMS 3G	S10	MOD13Q1 коллекция б.1
Пространственное разрешение	8 км, 0,072°	1,15 км	0,25 км
Период охвата	1982–2006 гг.	1998–2004 гг.	2000–2016 гг.
Источник данных	glcf.umiacs.umd.edu/data/gimms	spot-vegetation.com	modis.gsfc.nasa.gov
Временное разрешение	15 дней	10 дней	16 дней
Диапазоны каналов, мкм (RED и NIR)	0,580–0,680 0,725–1,000	0,610–0,680 0,780–0,890	0,620–0,670 0,841–0,876

Примечание: RED — красный; NIR (*англ.* near infrared) — ближний инфракрасный.

В настоящей работе на примере региона Большеземельской тундры выполнен анализ сходимости временных серий снимков среднего (MODIS) и низкого (SPOT-VGT, GIMMS 3G) пространственного разрешения по показателям усреднённых годовых максимумов и трендов изменений индекса NDVI для перекрывающегося временного периода 2000–2003 гг.

## Материалы и методы

Анализ сходимости различных временных композитов выполнен для территории Большеземельской тундры (охвачено 102 тыс. км<sup>2</sup>). Район включает равнинные тундры, расположенные в зональном градиенте от северных типичных тундр на севере до крупноерниковых тундр

на юге (рис. 1). Зона горных тундр Урала ограничивает территорию на востоке, р. Печора — на западе. Ранее проведённый анализ индекса NDVI по временным сериям MODIS (Елсаков, 2017) показал, что для восточной части территории — участка Югорского п-ова — отмечены интенсивные положительные изменения в период 2000–2009 гг., связанные с продвижением на север кустарников, ростом участия кустарничков (Елсаков и др., 2013), что характерно и для других регионов Арктики (Fraser et al., 2014).

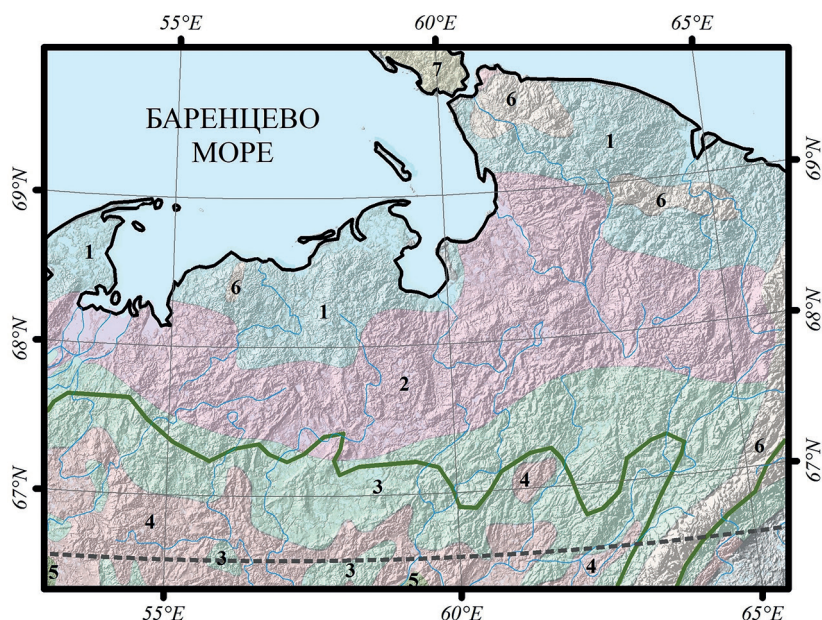


Рис. 1. Локализация участка исследований. Цветом обозначены геоботанические зоны (Зональные..., 1979): 1 — северные типичные тундры; 2 — мелкоерниковые южные кустарниковые тундры; 3 — крупноерниковые южные (кустарниковые) тундры; 4 — предтундровые редколесья в сочетании с южными тундрами; 5 — зона крайне-северной тайги; 6 — горные тундры и редколесья. Зелёной линией отмечена граница лесной растительности (по Terra Norte RLC (Барталев и др., 2011)). Пунктиром отмечена линия северного полярного круга

Особенности межгодовых изменений показателей анализировали на основании сравнения результатов обработки нескольких наборов данных, перекрывающихся территориально:

- GIMMS 3G (программа GIMMS), данные получены с использованием прибора NOAA-AVHRR (1982–2006) (<ftp:glcf.umd.edu/glcf/GIMMS/Geographic>);
- SPOT-VGT (S10) (1988–2003) (<https://spot-vegetation.com>);
- Terra-MODIS (MOD13Q1 коллекция 6.1) (2000–2024) (<https://earthexplorer.usgs.gov>).

Эволюция коллекции 6.1 связана преимущественно с коррекцией алгоритмов использования синего канала для снижения атмосферного влияния и расчёта индекса EVI (англ. Enhanced Vegetation Index). Сравнение версий коллекций 5 и 6.1 MOD13Q1 по участку работ показывает отсутствие значимых отличий по индексу NDVI между ними. Сходные отношения между коллекциями 6.1 и 5 наблюдали и для территории Килиманджаро (Танзания) (Detsch et al., 2016). Значения «сезонного сигнала» остались практически незатронутыми при переходе к 6-й коллекции.

Общий временной охват всех временных серий составил четыре года (2000–2003). Исследуемый период можно рассматривать как период, предшествующий значимому росту приземной температуры воздуха, в последующие годы ведущему к интенсивному увеличению показателей NDVI (Елсаков, 2017). Среди предпосылок для формирования отличий у показателей разных временных серий есть спектральные различия каналов, используемых для расчётов индекса NDVI (RED и NIR). Диапазоны каналов временных серий перекрываются, однако ширина каналов сужается при росте детализации изображений (рис. 2, см. с. 151).

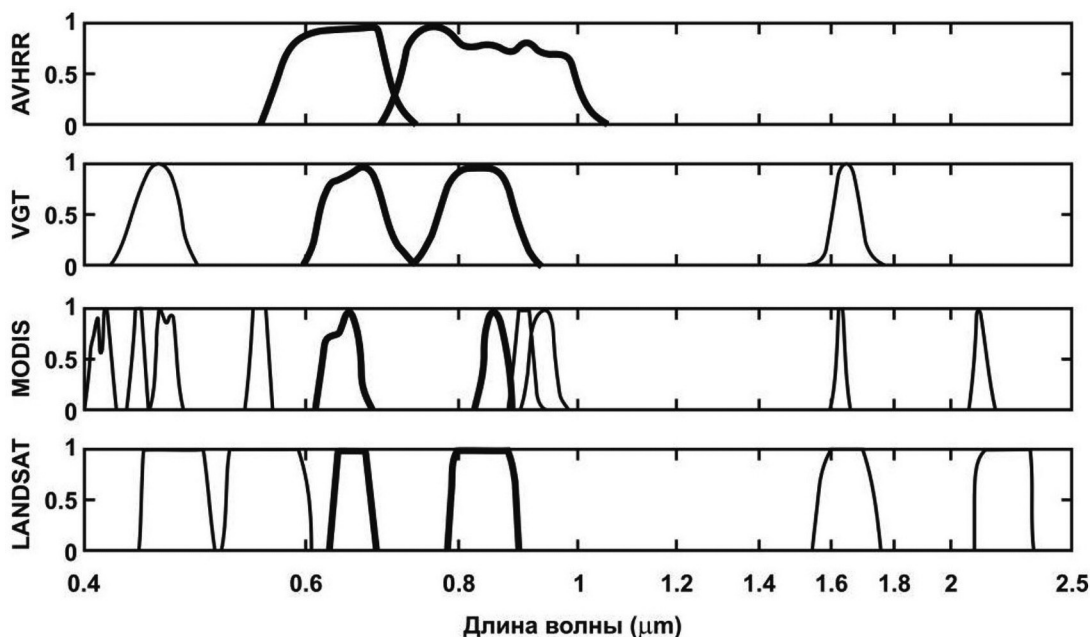


Рис. 2. Спектральные диапазоны основных инструментов съёмок временных серий в сравнении с Landsat. Выделены диапазоны красного и ближнего инфракрасного каналов (по (Tucker et al., 2005))

Из набора составленных изображений для каждого пикселя фиксировали максимальные значения индекса ( $NDVI_{\text{макс}}$ ) по каждому году наблюдений ( $n = 4$ ). В связи с аномальными температурными показателями вегетационного сезона и наличием обильной облачности в 2002 г. в отдельных случаях для сравнения получаемых закономерностей 2002 г. исключали из анализа ( $n = 3$ ). Для найденных величин  $NDVI$  выполняли расчёт средних значений и линейных трендов межгодовых изменений ( $\beta$ ). Расчёт сходимости показателей изображений проводили пространственной генерализацией снимков до размеров пикселей менее детальной сцены. При анализе метеорологических показателей сравниваемых лет привлекали данные архивов ГУ «ВНИИГМИ-МЦД» (meteo.ru) для метеорологической станции Воркуты. Основными показателями выступали суммы положительной (англ. Thaw Degree Days — TDD) и отрицательной (англ. Freezing Degree Days — FDD) среднесуточной приземной температуры воздуха.

## Результаты и обсуждение

### Анализ сроков достижения максимумов и облачных масок по временным рядам MODIS

Для выявления дат максимумов  $NDVI$  готовили изображения с отсутствующими в период с 13-й по 15-ю декаду\* облаками (рис. 3, см. с. 152). Площади суммарной маски облаков на изображениях разных лет варьировали от 7,3 % в 2003 г. до 74,2 % в 2002 г. (табл. 2). Взаимное перекрытие масок облаков на декадных снимках исключало возможность получения данных по  $NDVI$  на 1,3 % территории в 2002 г. и на 0,2 % для всех остальных лет. Наибольший вклад в формирование суммарной маски облаков вносила 15-я декада (от 6,5 % до 69,3 % территории), за исключением 2002 г., где на 14-ю декаду пришлось 65,6 % покрытия облачностью. Покрытие облачностью наиболее информативных для выявления величин максимума  $NDVI$  периодов (13-я и 14-я декады) варьировало от 0,02 до 6,7 % территории.

\* Несмотря на то, что временной шаг серий для MOD13Q1 составляет 16 дней, при характеристике разнесённых во времени съёмок одного года использовали понятие декада съёмки.



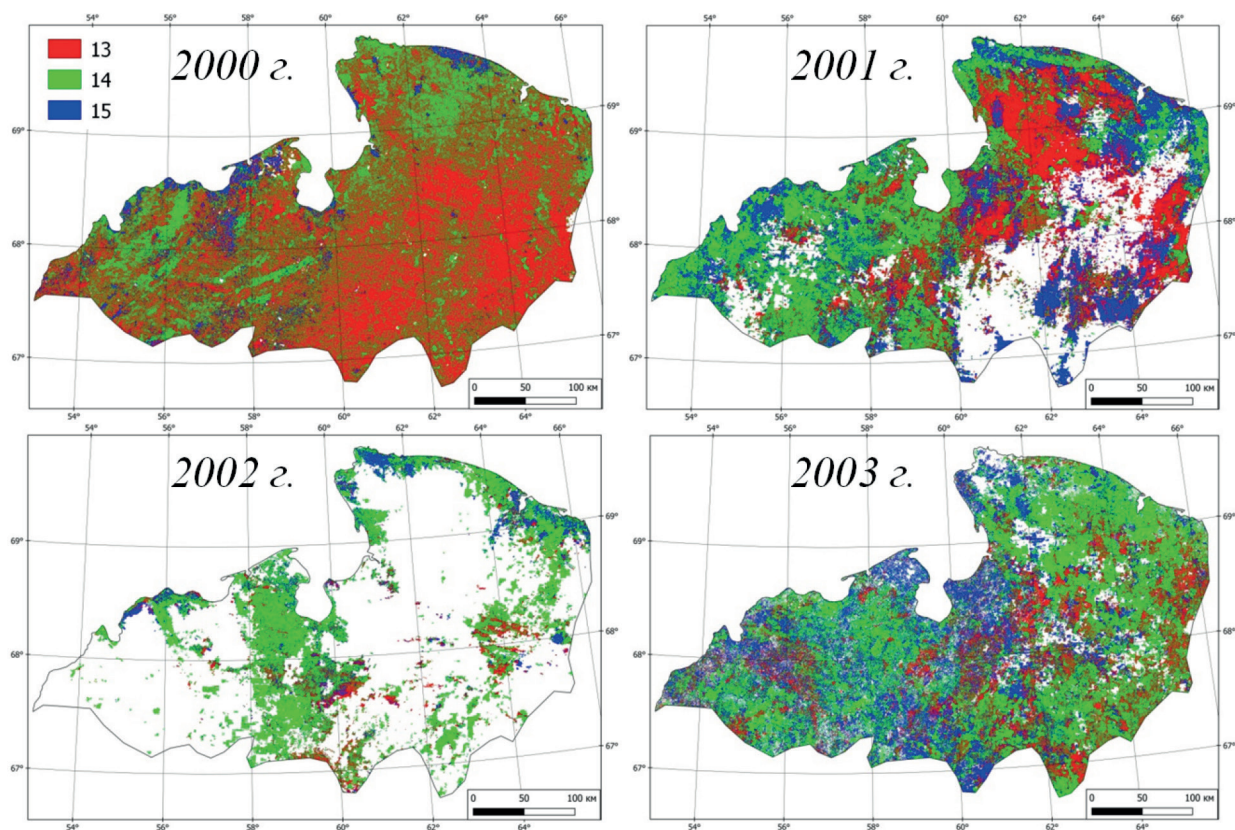


Рис. 3. Распределение декад достижения максимальных величин NDVI (13–15-я декады) по MODIS с учётом масок облачности. Белым цветом отмечены построенные маски облаков по трём декадам

Таблица 2. Покрытая облаками площадь (по маскам облачности) (в %)

Показатели	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.
Суммарная площадь проекции маски по всем декадам	69,50	23,10	74,2	7,30
Перекрытие всех масок облачности разных декад	0,20	0,20	1,3	0,20
Участки с суммарной облачностью в 13-ю и 14-ю декаду	0,02	0,04	6,7	0,04
По маске 13-й декады	0,30	4,80	14,1	1,00
По маске 14-й декады	0,80	0,40	65,6	0,40
По маске 15-й декады	69,30	18,60	11,0	6,50

Максимальное развитие фитомассы большинства сосудистых растений востока Большеземельской тундры (собственные данные инструментальных наблюдений для окрестностей Воркуты) приходится на конец июля – начало августа. Этот период расположен в пределах границ 13-й и 14-й декады спутниковых изображений MODIS.

Анализ безоблачных временных композитов (табл. 3) показывает, что основная доля участков (47,6 % территории) с максимальными показателями NDVI была отмечена в 2000 г. в 13-ю декаду, для остальных лет съёмок — в 14-ю декаду. Зональные особенности формирования максимальных величин NDVI связаны с более поздними сроками наступления (в пределах одной декады) максимальных показателей при продвижении к северу и на участки низкогорий Пай-Хоя (что хорошо видно на рис. 3а), погодными особенностями лет наблюдений, в том числе предшествующими годами, и особенностями сроков разрушения и схода снежного покрова. Отмечено (Симонова, 2023), что в годы с поздним снеготаянием для тундровой растительности дельты р. Лена наблюдали смещение в нарастании биомассы примерно на две недели с формированием максимальных значений NDVI в 1–2-й декадах августа.

Таблица 3. Площадные показатели периодов съёмки MODIS. Площади безоблачных участков с разными периодами наступления максимумов NDVI (в %)

№ периода	Период охвата	2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.
13-я декада	12.07–27.07	47,6/14,5	33,4/25,7	18,2/4,7	23,1/21,4
14-я декада	28.07–12.08	35,9/11,0	39,4/30,3	63,8/16,4	49,4/45,7
15-я декада	13.08–28.08	16,5/5,0	27,2/20,9	18,0/4,6	27,5/25,5
Итого:		100,0/30,5	100,0/76,9	100,0/25,8	100,0/92,7

Примечание: В числителе — по отношению к площадям безоблачных данных, в знаменателе — с учётом облачности.

Таблица 4. Климатические показатели сравниваемых лет наблюдений

Годы	Температурные показатели		
	Сумма положительной температуры воздуха, °C-суток, TDD	Сумма отрицательной температуры воздуха, °C-суток, FDD	Среднегодовая температура воздуха, °C
2000	1315,3 (8,6)	–2498,0 (9,8)	–4,0
2001	1229,1 (1,4)	–3254,5 (–5,3)	–5,5
2002	945,5 (–22,0)	–3272,8 (–5,9)	–6,4
2003	1356,7 (12,0)	–3044,1 (1,5)	–4,6
Среднее	1211,6	–3089,7	–5,1

Примечание: В скобках указано отклонение от средних многолетних показателей (в %).

Для участка Большеземельской тундры особенностью 2000 г. был более тёплый вегетационный период с TDD выше средних (за 2000–2023 гг.) на 8,6 % (табл. 4) в сочетании с относительно «тёплой» зимой (FDD выше на 9,8 %). Максимумы NDVI для 13-й декады года отмечены на 14,5 % территории (среди всех сравниваемых декад на её долю приходится 47,6 %). Контрастным к этому году был 2002 г. с холодным вегетационным периодом (TDD ниже средних на 22,0 %). Основная доля максимумов NDVI отмечена в 14-ю декаду на 16,4 % территории (63,8 %). Серия холодных вегетационных периодов 2001 и 2002 гг. (для 2001 г. TDD выше средних показателей лишь на 1,4 %) в сочетании с холодной зимой (FDD ниже средних величин на 5,3 % в 2001 г. и 5,9 % в 2002 г.) не смогли сдвинуть сроки достижения максимальных показателей на более ранние даты в 2003 г. Несмотря на то, что суммарная положительная температура вегетационного периода (TDD) превышала средние показатели на 12,0 %, порядка 45,7 % территории (49,4 % от значимых показателей) достигали максимумов в 14-ю декаду, а 25,5 % (27,5 %) — в 15-ю.

К сожалению, провести построение и сравнение масок облаков для SPOT-VGT и GIMMS 3G не представлялось возможным. Проведённый анализ показывает, что для выявления максимальных показателей NDVI и сравнения трендов изменений целесообразно использование съёмок временных серий SPOT-VGT (20–23-я декады) и GIMMS (14–16-я декады), что соответствует интервалу 12.07–12.08. По съёмкам MODIS для отмеченного временного интервала характерно отсутствие облачного покрова (исключая аномальный 2002 г.).

### Перекрёстный анализ временных серий

Пространственные особенности распределения средних значений показателя усреднённых межгодовых максимумов NDVI ( $NDVI_{MAX}$ ) для периода наблюдаемых лет представлены на рис. 4а–в (см. с. 154). Исключение из расчёта аномального 2002 г. не вносило существен-

ных изменений. Изображения MODIS и SPOT-VGT более отчётливо демонстрируют зональные особенности распределения и изменения запасов фитомассы. Средние  $NDVI_{MAX}$  тундровых сообществ по GIMMS 3G имели существенные завышения в сравнении с MODIS и SPOT. Аномально высокие значения индекса (0,80–0,85) отмечены на большей части Югорского п-ова, горных тундрах Пай-Хоя. Наиболее низкие показатели NDVI в ряду сравниваемых сенсоров отмечены для SPOT-VGT.

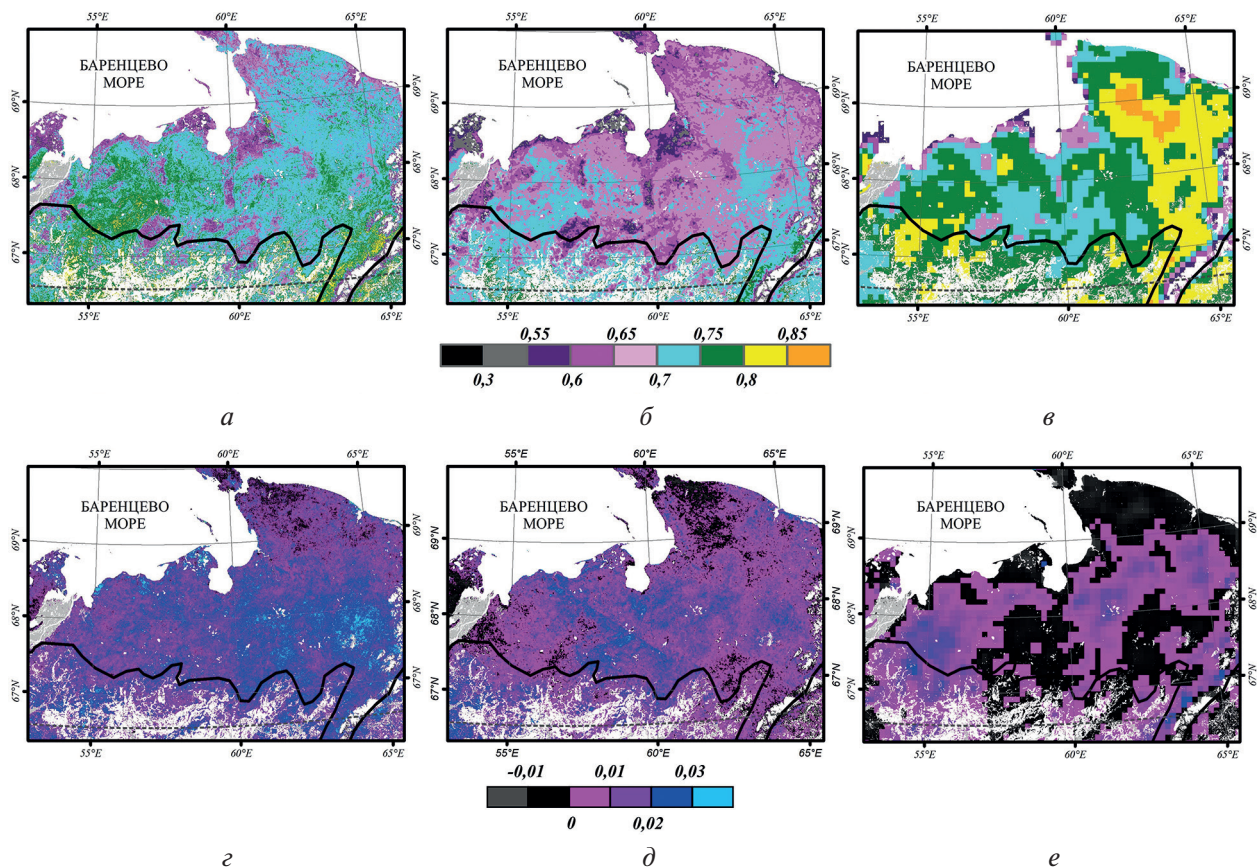


Рис. 4. Распределение средних значений годовых максимумов индекса NDVI ( $NDVI_{MAX}$ ,  $n = 4$ ) для периода 2000–2003 гг. по данным временных серий MOD13Q1 коллекции 6.1 (а), SPOT-VGT (б), GIMMS (в) на территории Большеземельской тундры. Распределение межгодового тренда индекса NDVI (в) по данным MOD13Q1 коллекции 6.1 (г), SPOT-VGT (д) и GIMMS 3G (е). Чёрной линией отмечена граница леса

Схожие связи наблюдали при сравнении съёмок территории всей циркумполярной области (Guay et al., 2014). Съёмка MODIS NBAR (англ. Nadir BRDF-Adjusted Surface Reflectance) (MCD43A4 V5) по показателям NDVI имела наибольшее сходство с временной серией GIMMS G, но была занижена (порядка на 14 %) в сравнении с GIMMS 3G. Для территории Тибетского нагорья также отмечено схожее распределение индекса NDVI между временными сериями (Zhao et al., 2021): наиболее высокие показатели были отмечены для GIMMS 3G, более низкие наблюдали для съёмок MODIS. Временные композиты NDVI по SPOT-VGT имели наиболее низкие значения.

При количественном анализе временных изменений растительного покрова модельного региона важным является сопоставление амплитуды и направленности трендов, регистрируемых разными приборами. По материалам съёмки MODIS и SPOT-VGT периода 2000–2004 гг. растительный покров Большеземельской тундры характеризуется слабым ростом максимального годового индекса NDVI. На съёмке GIMMS 3G преобладали классы без изменений или слабые локально выраженные тренды роста (см. рис. 4е).



Общим для всех временных серий стало доминирование классов с отсутствующими или слабыми отрицательными изменениями в пределах низкогорных территорий центральной части Пай-Хоя и положительными изменениями, с разными амплитудами, в пределах границ экотона мелкоерниковых южных кустарниковых тундр. Даже на временных сериях GIMMS 3G отчётливо представлена полоса слабых положительных изменений  $\beta$ , имеющая бóльшую амплитуду на более детальных съёмках. Увеличение детальности приводило к росту количества пикселей с высокими положительными значениями показателя  $\beta$ . По данным всех съёмок на территории Большеземельской тундры преимущественно представлены положительные тренды изменений, площадь которых росла с увеличением пространственного разрешения: MODIS — 95,5 %, SPOT-VGT — 91,3 %, GIMMS — 63,4 %. Из них в области статистически значимых ( $p = 0,05$ ) слабых положительных изменений ( $\beta$  выше 0,01) локализовано 70,9, 42,2 и 11,3 % территории соответственно. Максимальный тренд положительных изменений отмечен на участках перехода от зоны крупноерниковых к мелкоерниковым тундрам. К классу с отсутствием выраженных изменений ( $\beta$  от  $-0,01$  до  $0,01$ ) можно отнести 29,9, 58,1 и 89,2 % территории по использованным сериям. Территории с отрицательными изменениями были преимущественно локализованы на северных участках и в районе Югорского п-ова (кряж Пай-Хой) (6,4, 10,5 и 44,9 % соответственно).

Наибольшие величины индекса NDVI отмечены на изображениях GIMMS 3G и MODIS в зоне крупноерниковых южных кустарниковых тундр, низкие — на участках северных типичных тундр (рис. 5а, в, см. с. 156). Индекс NDVI имел наименьшие значения у SPOT-VGT в ряду сравниваемых сенсоров (рис. 5б). На временных сериях спутниковых изображений территории Большеземельской тундры периода 2000–2003 гг. отмечен рост вегетационного индекса на южной границе распространения мелкоерниковых тундр (рис. 5з–е), часто совпадающей с южной границей распространения сплошных многолетнемёрзлых пород. Участки, локализованные к северу и югу от данной зоны, характеризовались меньшей амплитудой изменений (см. рис. 4з–е). Многолетнемёрзлые породы в данный временной период ограничивали отклик растительного покрова на рост приземной температуры воздуха и верхних горизонтов почвы. Как было показано А. Б. Шерстюковым (2009), многолетний рост температуры воздуха у земной поверхности (за период 1965–2006 гг.) определял изменения среднегодовой температуры почвогрунтов на европейской территории России на 20–50 % и только на 5 % в Сибири.

При анализе трендов изменений наиболее высокие показатели, связанные с ростом индекса NDVI, отмечены для зон крупноерниковых и мелкоерниковых южных кустарниковых тундр на снимках MODIS (см. рис. 5з), в меньшей степени на SPOT-VGT (см. рис. 5д). Существенные положительные изменения по съёмке MODIS установлены для участков мелкоерниковых тундр. На изображениях GIMMS 3G доминировали участки незначительных ( $\beta$  от  $-0,01$  до  $0,01$ ) положительных и отрицательных изменений (см. рис. 5е) в пределах всех выделенных зон.

Сопоставление полученных величин позволило выявить значимые ( $r = 0,76$ ,  $p = 0,05$ ) коррелятивные связи между средними межгодовыми величинами индекса NDVI по изображениям MODIS и SPOT-VGT за рассматриваемый период (рис. 6, см. с. 156). Ранее выполненный для территории Северной Америки анализ (Gallo et al., 2005) показал, что средние значения индексов NDVI, рассчитанные на основе данных радиометров AVHRR и MODIS для совпадающих площадей, также хорошо коррелировали между собой.

Для съёмки GIMMS 3G коррелятивные связи по изображениям распределения индекса NDVI существенно ослабевали: с MODIS ( $r = 0,32$ ,  $p = 0,05$ ) и SPOT-VGT ( $r = 0,47$ ,  $p = 0,05$ ). Однако для территорий с лесным покровом северного Китая отмечена (Lin et al., 2020) высокая сходимость MODIS и GIMMS ( $y = 0,9943x + 0,0024$ ,  $r^2 = 0,88$ ). К сожалению, авторы не отметили тип использованных данных, возможно съёмки были представлены временными композитами GIMMS G. Анализ сходимости трендов межгодовых изменений ( $\beta$ ), рассчитанных в сравниваемых парах изображений, показал существенные пространственно-временные декорреляции ( $r = 0,40$  между MODIS и SPOT-VGT,  $r = 0,18$  между MODIS и GIMMS 3G и  $r = 0,07$  для пары SPOT-VGT и GIMMS 3G). Сходная зависимость была отмечена для анализа как 4-летнего, так и 3-летнего периода наблюдений.



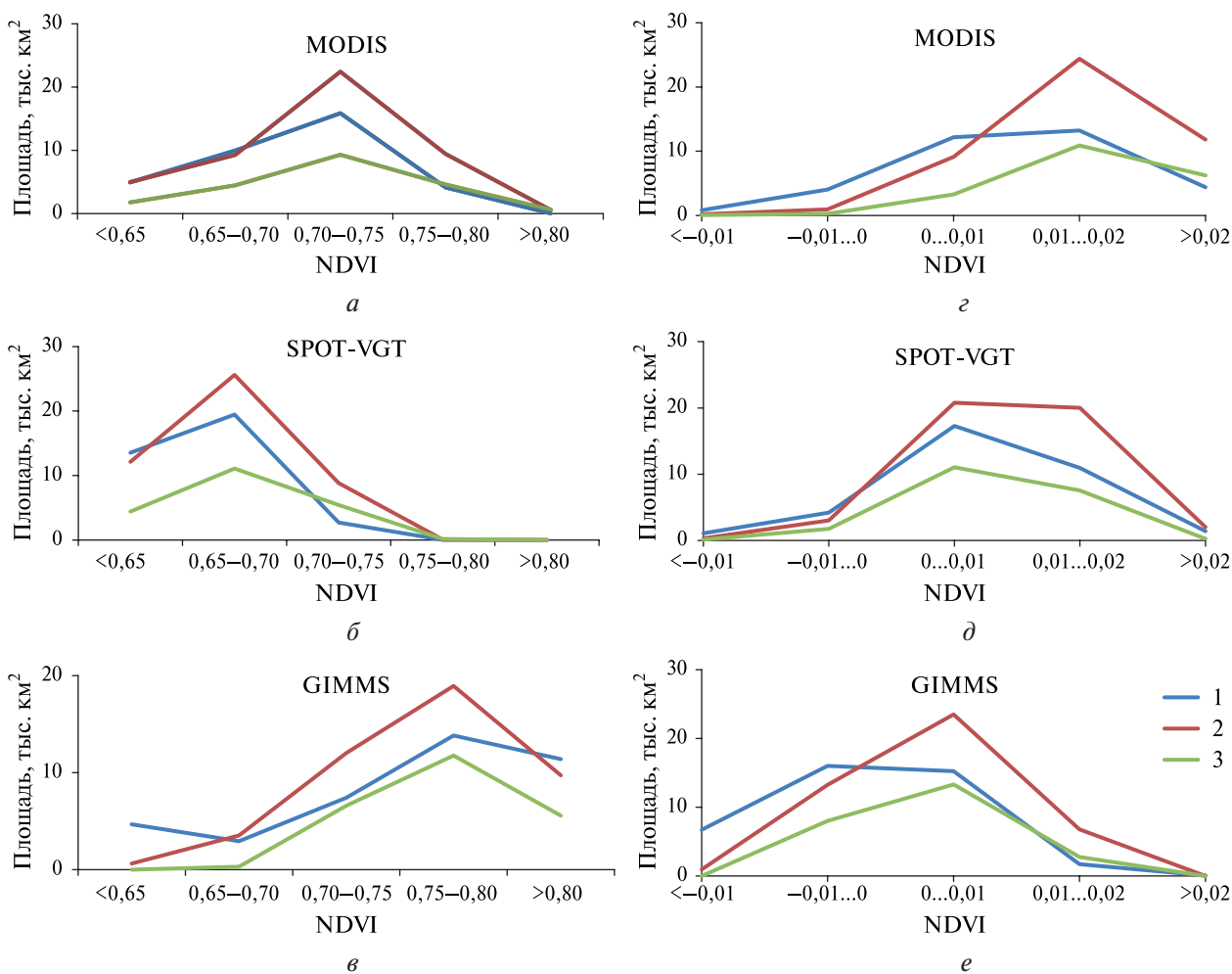
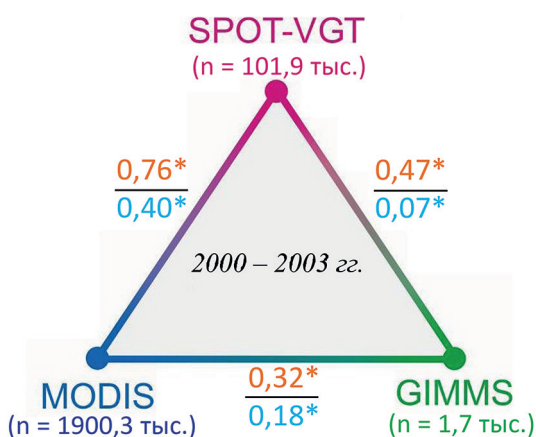


Рис. 5. Распределение площадей выделенных классов в пределах региона Большеземельской тундры для средних величин NDVI (а–в) и трендов линейных изменений вегетационного индекса (з–е). Цифрами отмечены участки северных типичных тундр (1), мелкоерниковых южных кустарниковых тундр (2), крупноерниковых южных кустарниковых тундр (3)

Рис. 6. Сопоставление средних значений и трендов изменений по общему периоду съёмки. Приведены коэффициенты корреляции для средних значений максимумов NDVI (2000–2003) (числитель) и линейные тренды межгодовых изменений (β) (знаменатель). Указаны объёмы выборки для рассмотренных участков при разном пространственном разрешении. Звёздочкой отмечены значимые коррелятивные связи ( $p = 0,05$ )



Дальнейший рост детальности изображений (сравнение с одновременными композитами съёмки Landsat) показывает, что снимки MODIS разных лет достаточно корректно отражали контуры участков и амплитуду межгодовых климатогенных изменений ( $r = 0,72$ ,  $p \leq 0,05$ ) растительного покрова тундр Северного Тимана (Елсаков, Щанов, 2019) и Югорского п-ова (Елсаков и др., 2013) в Ненецком автономном округе.

## Заключение

В ряду рассмотренных временных серий снижение пространственного разрешения изображений уменьшало показатели фиксируемых изменений. Временные композиты GIMMS 3G не отражали мелкомасштабные сезонные и трендовые закономерности, характерные для сильно фрагментированного ландшафта тундры, что, вероятно, объясняется грубым пространственным разрешением. Рост детальности изображений приводил к увеличению как амплитуды тренда изменений, так и площади трансформированных участков. Между рассмотренными временными сериями наблюдали слабые коррелятивные связи как по величинам  $NDVI_{MAX}$ , так и по трендам их межгодовых изменений. Наиболее высокое сходство отмечено между MODIS и SPOT-VGT, что, вероятно, является следствием большего сходства спектральных диапазонов NIR- и RED-каналов и большей близостью пространственного разрешения. Причины формирования декорреляции при сопоставлении съёмок MODIS, SPOT-VGT и GIMMS 3G обусловлены:

- различиями спектральных диапазонов каналов рассмотренных временных серий;
- элиминацией крайних значений показателей при генерализации и снижением диапазонов варибельности в пределах мозаичных по составу участков с разным пространственным разрешением;
- смещением сезонов съёмки и фенологическими несовпадениями состояния растительного покрова;
- различиями алгоритмов подавления шумов и фильтрации облачности для построения временных композитов.

Использование временных рядов спутниковой съёмки программы Landsat существенно расширили возможности оценки изменений, однако и усилили погрешности, связанные с необходимостью подбора тождественных по фенологическому развитию растительного покрова изображений (отбор изображений с максимальными показателями для каждого вегетационного периода), маскированием растительного покрова атмосферными влияниями. Поэтому временные серии съёмки MODIS можно рассматривать как наиболее подходящие для анализа межгодовых трендов растительного покрова.

Работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 24-16-20017 и Санкт-Петербургского научного фонда.

## Литература

1. Анисимов О. А., Жильцова Е. Л., Разживин В. Ю. Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исслед. Земли из космоса. 2015. № 3. С. 60–70. DOI: 10.7868/S0205961415030021.
2. Барталев С. А., Егоров В. А., Ершов Д. В., Исаев А. С., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Спутниковое картографирование растительного покрова России по данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 4. С. 285–302.
3. Белоновская Е. А., Тишков А. А., Вайсфельд М. А. и др. «Позеленение» Российской Арктики и современные тренды изменения ее биоты // Изв. Российской акад. наук. Сер. геогр. 2016. № 3. С. 28–39. DOI: 10.15356/0373-2444-2016-3-28-39.
4. Елсаков В. В. Пространственная и межгодовая неоднородность изменений растительного покрова тундровой зоны Евразии по материалам съёмки MODIS 2000–2016 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 56–72. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72.
5. Елсаков В. В., Щанов В. М. Современные изменения растительного покрова пастбищ северного оленя Тиманской тундры по результатам анализа данных спутниковой съёмки // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 128–142. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-128-142.

6. Елсаков В. В., Кулюгина Е. Е., Щанов В. М. Тренды изменений растительного покрова Югорского полуострова последнего десятилетия: сопоставление результатов дистанционных и полевых исследований // Геоботаническое картографирование. 2013. С. 93–111. DOI: 10.31111/geobotmap/2013.93.
7. Зональные (на равнинах) и поясные (в горах) типы растительности. М 1:12 000 000 // Карта растительности европейской части СССР. М 1:2 500 000 / под ред. Т. И. Исаченко, Е. М. Лавренко. ГУГК при СМ СССР. М., 1979.
8. Симонова К. И. Анализ влияния снеготаяния на межгодовую и сезонную динамику растительности в дельте реки Лены // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 205–216. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-205-216.
9. Шерстюков А. Б. Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. 127 с.
10. Berner L. T., Massey R., Jantz P. et al. Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome // Nature Communications. 2020. No. 11. Article 4621. 12 p. DOI: 10.1038/s41467-020-18479-5.
11. Beurs K. M., Henebry G. M. Northern annular mode effects on the land surface phenologies of Northern Eurasia // J. Climate. 2008. V. 21. P. 4257–4279. DOI: 10.1175/2008JCLI2074.1.
12. Beurs K. M., Henebry G. M. A land surface phenology assessment of the northern polar regions using MODIS reflectance time series // Canadian J. Remote Sensing. 2010. V. 36. P. 87–110. DOI: 10.5589/m10-021.
13. Blok D., Schaepman-Strub G., Bartholomeus H. et al. The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature // Environmental Research Letters. 2011. V. 6. No. 3. Article 035502. 9 p. DOI: 10.1088/1748-9326/6/3/035502.
14. Detsch F., Otte I., Appelhans T., Nauss T. A comparative study of cross-product NDVI dynamics in the Kilimanjaro region — a matter of sensor, degradation calibration, and significance // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 2. Article 159. 18 p. DOI: 10.3390/rs8020159.
15. Forbes B. C., Macias-Fauria M., Zetterberg P. I. Russian Arctic warming and ‘greening’ are closely tracked by tundra shrub willows // Global Change Biology. 2010. V. 16. No. 5. P. 1542–1554. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02047.
16. Fraser R. H., Lantz T. C., Olthof I. et al. Warming-induced shrub expansion and lichen decline in the western Canadian Arctic // Ecosystems. 2014. V. 17. No. 7. P. 1151–1168. DOI: 10.1007/s10021-014-9783-3.
17. Frost G. V., Bhatt U. B., Macander M. J. et al. Is Alaska’s Yukon–Kuskokwim Delta greening or browning? Resolving mixed signals of tundra vegetation dynamics and drivers in the maritime Arctic // Earth interactions. 2021. V. 25. P. 76–93. DOI: 10.1175/EI-D-20-0025.1.
18. Gallo K., Ji L., Reed B. et al. Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data // Remote Sensing of Environment. 2005. V. 99. Iss. 3. P. 221–231. DOI: 10.1016/j.rse.2005.08.014.
19. Goetz S. J., Bunn A. G., Fiske G. J., Houghton R. A. Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance // Proc. National Academy of Sciences. 2005. V. 102. No. 38. P. 13521–13525. DOI: 10.1073/pnas.0506179102.
20. Guay K. C., Beck P. S. A., Berner L. T. et al. Vegetation productivity patterns at high northern latitudes: a multi-sensor satellite data assessment // Global Change Biology. 2014. V. 20. No. 10. P. 3147–3158. DOI: 10.1111/gcb.12647.
21. Hutich C., Herold M., Schmullius C. et al. Indicators of Northern Eurasia’s land-cover change trends from SPOT-Vegetation time-series analysis 1998–2005 // Intern. J. Remote Sensing. 2007. V. 28. No. 18. P. 4199–4206. DOI: 10.1080/01431160701442054.
22. Jia G. J., Epstein H. E., Walker D. A. Greening of Arctic Alaska, 1981–2001 // Geophysical Research Letters. 2003. V. 30. No. 20. Article 2067. 4 p. DOI: 10.1029/2003GL018268.
23. Li M., Cao S., Zhu Z. et al. Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS Normalized Difference Vegetation Index (PKU GIMMS NDVI) from 1982 to 2022 // Earth System Science Data. 2023. V. 15. P. 4181–4203. DOI: 10.5194/essd-15-4181-2023.
24. Lin X., Niu J., Berndtsson R. et al. NDVI dynamics and its response to climate change and reforestation in northern China // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 24. Article 4138. 16 p. DOI: 10.3390/rs12244138.
25. Liu C., Huang H., Liu C. et al. Comparative evaluation of vegetation greenness trends over circumpolar Arctic tundra using multi-sensors satellite datasets // Intern. J. Digital Earth. 2024. V. 17. No. 1. Article 2328823. 20 p. DOI: 10.1080/17538947.2024.2328823.
26. Picard G., Quegan S., Delbart N. et al. Bud-burst modelling in Siberia and its impact on quantifying the carbon budget // Global Change Biology. 2005. V. 11. No. 12. P. 2164–2176. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.01055.x.
27. Reynolds M. K., Walker D. A., Maier H. A. NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 102. Iss. 3–4. P. 271–281. DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.016.



28. *Raynolds M. K., Walker D. A., Epstein H. E. et al.* A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDVI // *Remote Sensing Letters*. 2012. V. 3. No. 5. P. 403–411. DOI: 10.1080/01431161.2011.609188.
29. *Robin J., Dubayah R., Sparrow E., Levine E.* Monitoring start of season in Alaska with GLOBE, AVHRR, and MODIS data // *J. Geophysical Research. Biogeosciences*. 2007. V. 113. Article G01017. 10 p. DOI: 10.1029/2007JG000407.
30. *Sakai H., Suzuki R., Kondoh A.* Recent signal of vegetation change in Siberia using satellite data // *J. Japan Soc. Hydrology and Water Resources*. 2008. V. 21. P. 50–56. DOI: 10.3178/jjshwr.21.50.
31. *Tucker C. J., Pinzon J. E., Brown M. E. et al.* An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data // *Intern. J. Remote Sensing*. 2005. V. 26. No. 20. P. 4485–4498. DOI: 10.1080/01431160500168686.
32. *Walker D. A., Epstein H. E., Jia J. G. et al.* Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic // *J. Geophysical Research. Atmospheres*. 2003. V. 108. Iss. D2. Article 8169. DOI: 10.1029/2001JD000986.
33. *Walker D. A., Raynolds M. K., Fred J. A.* The Circumpolar Arctic vegetation map // *J. Vegetation Science*. 2005. V. 16. P. 267–282. DOI: 10.1111/j.1654-1103.2005.tb02365.x.
34. *White M. A., Beurs K. M., Didan K.* Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006 // *Global Change Biology*. 2009. V. 15. No. 10. P. 2335–2359. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x.
35. *Zeng H., Jia G., Epstein H.* Recent changes in phenology over the northern high latitudes detected from multi-satellite data // *Environmental Research Letters*. 2011. V. 6. No. 4. Article 045508. 11 p. DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045508.
36. *Zhao J., Ding Y., Yang J.* Suitability analysis and evaluation of GIMMS NDVI<sub>3g</sub> product in plateau region // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 3<sup>rd</sup> Intern. Forum on Geoscience and Oceanography. 2021. V. 734. Article 012007. 7 p. DOI: 10.1088/1755-1315/734/1/012007.

## Analysis of convergence of different spatial resolution time series of satellite imagery of Bolshezemelskaya tundra

V. V. Elsakov

*Institute of Biology, Komi Science Centre UrB RAS, Syktyvkar 167982, Russia  
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru*

The convergence of averaged maximum values and trends of interannual changes in the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from satellite imagery of GIMMS (3G) (Global Inventory Modeling and Mapping Studies), SPOT-VGT (S10) and MODIS (MOD13Q collection 6.1) series for the time period of 2000–2003 has been analyzed for the territory of Bolshezemelskaya tundra (about 102 thousand km<sup>2</sup>). The compared satellite images had differences in spatial and spectral resolution, intervals of time composite generation. Comparisons were made by generalizing an image of greater spatial resolution to a less detailed image. The considered imagery demonstrated low level of convergence for averaged interannual maximum NDVI values. The GIMMS (3G) images significantly overestimated the index values (on average by 10–15 % compared to MODIS and by 20–30 % to SPOT-VGT), and low correlation coefficients ( $r$ ) were demonstrated in the pairs of comparison. The degree of agreement between mean NDVI distributions increased with image resolution and narrowing of the spectral ranges. The highest correlation was observed between MODIS and SPOT-VGT NDVI data ( $r = 0.76$ ,  $p = 0.05$ ). The most detailed MODIS images demonstrated the greatest changes in the interannual linear trend of changes ( $\beta$ ) calculated for maximum annual NDVI values. A decrease in image spatial resolution was associated with a decrease in  $\beta$  quantity and variability. All images showed changes related to higher productivity in the area of the southern ecotone of low shrub tundra. The compared pairs of images had low correlation coefficients for  $\beta$  indicator. The highest correlation was observed for MODIS and SPOT-VGT ( $r = 0.40$  at  $p = 0.05$ ). The best ability to detect trends in vegetation was noted in MODIS time series.

**Keywords:** composites of satellite images, NDVI, vegetation changes, Bolshezemelskaya tundra

Accepted: 14.01.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-148-161

## References

1. Anisimov O. A., Zhiltcova Ye. L., Razzhivin V. Yu., Predictive modeling of plant productivity in the Russian Arctic using satellite data, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2015, V. 51, pp. 1051–1059, DOI: 10.1134/S0001433815090042.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Mapping of Russia's vegetation cover using MODIS satellite spectroradiometer data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, V. 8, No. 4, pp. 285–302 (in Russian).
3. Belonovskaya E. A., Tishkov A. A., Vaisfel'd M. A. et al., "Greening" of the Russian Arctic and the modern trends of transformation of its biota, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. Geograficheskaya*, 2016, No. 3, pp. 28–39 (in Russian), DOI: 10.15356/0373-2444-2016-3-28-39.
4. Elsakov V. V., Spatial and interannual heterogeneity of changes in the vegetation of Eurasian tundra: Analysis of 2000–2016 MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, V. 14, No. 6, pp. 56–72 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72.
5. Elsakov V. V., Shchanov V. M., Current changes in vegetation cover of Timan tundra reindeer pastures from analysis of satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 2, pp. 128–142 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-2-128-142.
6. Elsakov V. V., Kuliugina E. E., Tshanov V. M., Trends of vegetation cover changes of the Yugorsky peninsula in the last decades: Comparison of remote and field studies, *Geobotanical mapping*, 2013, pp. 93–111 (in Russian), DOI: 10.31111/geobotmap/2013.93.
7. *Zonal'nye (na ravninakh) i poyasnye (v gorakh) tipy rastitel'nosti. M 1:12 000 000* (Zonal (on the plains) and belt (in the mountains) vegetation types. M 1:12 000 000), Map of vegetation of the European part of the USSR. Scale 1:2 500 000, T. I. Isachenko, E. M. Lavrenko (eds.), GUGK under the USSR Council of Ministers, Moscow, 1979.
8. Simonova K. I., Effects of snowmelt on seasonal and interannual vegetation dynamics in the Lena Delta, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 205–216 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-205-216.
9. Sherstyukov A. B., *Izmeneniya klimata i ikh posledstviya v zone mnogoletnei merzloty Rossii* (Climate change and its consequences in the permafrost zone of Russia), Obninsk: GU "VNIIGMI-MTsD", 2009, 127 p. (in Russian).
10. Berner L. T., Massey R., Jantz P. et al., Summer warming explains widespread but not uniform greening in the Arctic tundra biome, *Nature Communications*, 2020, No. 11, Article 4621, 12 p., DOI: 10.1038/s41467-020-18479-5.
11. Beurs K. M., Henebry G. M., Northern annular mode effects on the land surface phenologies of Northern Eurasia, *J. Climate*, 2008, V. 21, pp. 4257–4279, DOI: 10.1175/2008JCLI2074.1.
12. Beurs K. M., Henebry G. M., A land surface phenology assessment of the northern polar regions using MODIS reflectance time series, *Canadian J. Remote Sensing*, 2010, V. 36, pp. 87–110, DOI: 10.5589/m10-021.
13. Blok D., Schaepman-Strub G., Bartholomeus H. et al., The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature, *Environmental Research Letters*, 2011, V. 6, No. 3, Article 035502, 9 p., DOI: 10.1088/1748-9326/6/3/035502.
14. Detsch F., Otte I., Appelhans T., Nauss T., A comparative study of cross-product NDVI dynamics in the Kilimanjaro region — a matter of sensor, degradation calibration, and significance, *Remote Sensing*, 2016, V. 8, No. 2, Article 159, 18 p., DOI: 10.3390/rs8020159.
15. Forbes B. C., Macias-Fauria M., Zetterberg P. I., Russian Arctic warming and 'greening' are closely tracked by tundra shrub willows, *Global Change Biology*, 2010, V. 16, No. 5, pp. 1542–1554, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.02047.
16. Fraser R. H., Lantz T. C., Olthof I. et al., Warming-induced shrub expansion and lichen decline in the western Canadian Arctic, *Ecosystems*, 2014, V. 17, No. 7, pp. 1151–1168, DOI: 10.1007/s10021-014-9783-3.
17. Frost G. V., Bhatt U. B., Macander M. J. et al., Is Alaska's Yukon–Kuskokwim Delta greening or browning? Resolving mixed signals of tundra vegetation dynamics and drivers in the maritime Arctic, *Earth Interactions*, 2021, V. 25, pp. 76–93, DOI: 10.1175/EI-D-20-0025.1.

18. Gallo K., Ji L., Reed B. et al., Multi-platform comparisons of MODIS and AVHRR normalized difference vegetation index data, *Remote Sensing of Environment*, 2005, V. 99, Iss. 3, pp. 221–231, DOI: 10.1016/j.rse.2005.08.014.
19. Goetz S.J., Bunn A.G., Fiske G.J., Houghton R.A., Satellite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance, *Proc. National Academy of Sciences*, 2005, V. 102, No. 38, pp. 13521–13525, DOI: 10.1073/pnas.0506179102.
20. Guay K.C., Beck P.S.A., Berner L.T. et al., Vegetation productivity patterns at high northern latitudes: a multi-sensor satellite data assessment, *Global Change Biology*, 2014, V. 20, No. 10, pp. 3147–3158, DOI: 10.1111/gcb.12647.
21. Hutich C., Herold M., Schmullius C. et al., Indicators of Northern Eurasia's land-cover change trends from SPOT-Vegetation time-series analysis 1998–2005, *Intern. J. Remote Sensing*, 2007, V. 28, pp. 4199–4206, DOI: 10.1080/01431160701442054.
22. Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A., Greening of Arctic Alaska, 1981–2001, *Geophysical Research Letters*, 2003, V. 30, No. 20, Article 2067, 4 p., DOI: 10.1029/2003GL018268.
23. Li M., Cao S., Zhu Z. et al., Spatiotemporally consistent global dataset of the GIMMS Normalized Difference Vegetation Index (PKU GIMMS NDVI) from 1982 to 2022, *Earth System Science Data*, 2023, V. 15, pp. 4181–4203, DOI: 10.5194/essd-15-4181-2023.
24. Lin X., Niu J., Berndtsson R. et al., NDVI dynamics and its response to climate change and reforestation in northern China, *Remote Sensing*, 2020, V. 12, No. 24, Article 4138, 16 p., DOI: 10.3390/rs12244138.
25. Liu C., Huang H., Liu C. et al., Comparative evaluation of vegetation greenness trends over circumpolar Arctic tundra using multi-sensors satellite datasets, *Intern. J. Digital Earth*, 2024, V. 17, No. 1, Article 2328823, 20 p., DOI: 10.1080/17538947.2024.2328823.
26. Picard G., Quegan S., Delbart N. et al., Bud-burst modelling in Siberia and its impact on quantifying the carbon budget, *Global Change Biology*, 2005, V. 11, No. 12, pp. 2164–2176, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2005.01055.x.
27. Reynolds M.K., Walker D.A., Maier H.A., NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic, *Remote Sensing of Environment*, 2006, V. 102, Iss. 3–4, pp. 271–281, DOI: 10.1016/j.rse.2006.02.016.
28. Reynolds M.K., Walker D.A., Epstein H.E. et al., A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDVI, *Remote Sensing Letters*, 2012, V. 3, No. 5, pp. 403–411, DOI: 10.1080/01431161.2011.609188.
29. Robin J., Dubayah R., Sparrow E. et al., Monitoring start of season in Alaska with GLOBE, AVHRR, and MODIS data, *J. Geophysical Research. Biogeosciences*, 2007, V. 113, Article G01017, 10 p., DOI: 10.1029/2007JG000407.
30. Sakai H., Suzuki R., Kondoh A., Recent signal of vegetation change in Siberia using satellite data, *J. Japan Soc. Hydrology and Water Resources*, 2008, V. 21, pp. 50–56, DOI: 10.3178/jjshwr.21.50.
31. Tucker C.J., Pinzon J.E., Brown M.E. et al., An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data, *Intern. J. Remote Sensing*, 2005, V. 26, No. 20, pp. 4485–4498, DOI: 10.1080/01431160500168686.
32. Walker D.A., Epstein H.E., Jia J.G. et al., Phytomass, LAI, and NDVI in northern Alaska: Relationships to summer warmth, soil pH, plant functional types, and extrapolation to the circumpolar Arctic, *J. Geophysical Research. Atmospheres*, 2003, V. 108, Iss. D2, Article 8169, DOI: 10.1029/2001JD000986.
33. Walker D.A., Reynolds M.K., Fred J.A., The Circumpolar Arctic vegetation map, *J. Vegetation Science*, 2005, V. 16, pp. 267–282, DOI: 10.1111/j.1654-1103.2005.tb02365.x.
34. White M.A., Beurs K.M., Didan K., Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006, *Global Change Biology*, 2009, V. 15, No. 10, pp. 2335–2359, DOI: 10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x.
35. Zeng H., Jia G., Epstein H., Recent changes in phenology over the northern high latitudes detected from multi-satellite data, *Environmental Research Letters*, 2011, V. 6, No. 4, Article 045508, 11 p., DOI: 10.1088/1748-9326/6/4/045508.
36. Zhao J., Ding Y., Yang J., Suitability analysis and evaluation of GIMMS NDVI<sub>3g</sub> product in plateau region, *IOP Conf. Ser. Earth and Environmental Science. 3<sup>rd</sup> Intern. Forum on Geoscience and Oceanography*, 2021, V. 734, Article 012007, 7 p., DOI: 10.1088/1755-1315/734/1/012007.