Пространственная и межгодовая неоднородность изменений растительного покрова тундровой зоны Евразии по материалам съёмки MODIS 2000–2016 гг.

В. В. Елсаков

Институт биологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, 167610, Россия
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

Выявлены особенности изменений растительного покрова тундровой зоны Севера Евразии (порядка 1750 тыс. км^2) за период 2000–2016 гг. на основании анализа хода ежегодных максимальных значений индекса NDVI по материалам временных серий MODIS (MOD13Q1.005). Статистику по многолетнему ходу годовых максимумов индекса рассчитывали для регулярной сети ячеек, составленной по разграфке сетки листов карты масштаба 1:200 000. Для элементов полученной сетки проводили анализ хода средних значений индекса для каждого года. На территории наблюдали годы с одновременным наличием максимумов и минимумов показателя. Рассчитана корреляция между участками, совпадающая с климатическим районированием. По величинам всего временного интервала и отдельных промежутков (2000–2009 и 2009–2016 гг.) рассчитан тренд линейных изменений (β) ($\Delta NDVI_{MAX}$ год$^{-1}$). Вслед за ростом приземной температуры воздуха 2000 г. начальные этапы модификаций фитоценозов наиболее интенсивно проявились на территории Европейской России (положительные — 44,1 %, из них 32,3 % слабые положительные; отрицательные — 6,1 %). В период 2009–2016 гг. интенсивность положительных изменений снизилась до 30,4 % (однако продолжен рост сильных положительных до 16,5 %). Для территории Зауралья предиктором изменений был температурный режим многолетнемерзлых пород (ММП), задержавший проявление ответной реакции растительных сообществ на потепление. На участках Западной (ЗС) и Северо-Восточной Сибири (С-ВС) межгодовые изменения имели сходный характер: для ЗС рост доли сильных положительных изменений в период 2009–2016 гг. (с 4,8 % для периода 2000–2009 гг. до 35,8 % в последующий период и для сообществ С-ВС с 5,5 до 30,9 %). Наибольшие отличия хода NDVI отмечены для территории Восточной Сибири. В 2000–2009 гг. преобладают отрицательные изменения, связанные с началом деградации ММП в виде роста полигонизации и заболачивания тундр. Для сравниваемых периодов отмечен рост существенных отрицательных (с 15,3 до 21,0 %) и снижение слабых отрицательных (с 25,5 до 15,2 %) трансформаций, а также постепенный рост интенсивности существенных положительных изменений (с 3,5 до 14,7 %). За весь период наблюдений для территории Севера Евразии отмечен рост достоверных значимых ($p = 0,95$) положительных изменений до 6,0 % (для периода 2000–2009 гг., с 2,4 до 3,1 % для 2009–2016 гг.). Изменения многих участков связаны с перестройкой компонентов экосистем, подтверждены корпусом публикаций, материалами собственных полевых наблюдений и могут быть интерпретированы.

Ключевые слова: спутниковые методы исследований, временные серии MODIS, растительный покров Севера Евразии

Одобрена к печати: 22.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72

Введение

Вследствие сезонной эпизодичности и ограничений в информативности из-за погодных условий разносезонных съёмок высокого и сверхвысокого разрешения, выполнение статистически-корректного анализа с их использованием затруднено. Межгодовые и сезонные оценки изменений количественных показателей фитоценозов проводят с привлечением более доступных, но имеющих более низкое пространственное разрешение сенсоров MODIS, приемлемость использования которых показана для разных регионов Арктики (Beurs, Henebry, 2008, 2010; Blok et al., 2011; Robin et al., 2007). Многолетние, расширенные ряды наблюдений для расчёта трендов дают более объективные оценки проходящих процессов. Однако часто анализируются и отдельные пары лет, часто контрастные по погодным условиям (Белоновская и др., 2016). Несмотря на снижение пространственного разрешения, использование материалов среднего разрешения наиболее приемлемо для решения поставленных

задач, поскольку, с одной стороны, устраняет шумы, вызванные влиянием микро- и мезорельефа, а их высокая временная повторность, с другой, позволяет снизить влияние погодных условий. Близость спектральных диапазонов каналов Landsat и MODIS, используемых для расчёта NDVI (0,63–0,69 и 0,76–0,90 мкм против 0,62–0,67 и 0,841–0,876 мкм), даёт возможность визуальной верификации участков изменений по MODIS, что было показано нами на примере анализа временных изменений растительного покрова п-ва Югорский (Елсаков, Кулюгина, 2014). Основные задачи работы состояли в анализе особенностей распределения набора годовых максимальных значений индекса NDVI на территории Севера Евразии для временного периода 2000–2016 гг. по данным съёмки MODIS (1); исследовании трендов (интенсивности и направленности) изменений NDVI для отдельных временных интервалов с использованием статистических критериев (2); сравнении региональных особенностей и связей трендов изменений в пределах территории (3).

Методика выполнения работы

Межгодовые и сезонные оценки изменений количественных показателей фитоценозов по индексу NDVI проводили с привлечением сенсора Terra-MODIS (MOD13Q1.005, источник данных: modis.gsfc.nasa.gov). Размер пиксела изображений 0,25×0,25 км, период временного охвата 2000–2016 гг. Рассматривали как целый (2000–2016), так и отдельные временные периоды (2000–2009 гг., 2009–2016 гг.). Алгоритм выполнения работы включал предварительную подготовку временных серий индекса NDVI (16-дневные временные композиты для всех вегетационных периодов), отбор наибольших значений показателя для каждого года наблюдений ($NDVI_{MAX}$). Полностью территория Севера Евразии для среза одного года покрыта 15 гранулами MODIS. Наиболее часто данные величины достигали максимальных значений в июле-августе (12–15 композит). Использование максимальных значений индекса позволило получить параметры, характеризующие наиболее полное развитие надземной фитомассы за летний сезон каждого года, снизить ошибку, связанную со значительной долготной и широтной протяжённостью территории (различия в наступлениях максимумов).

Для анализа хода индекса в пределах отдельных регионов строили маску территории тундровой зоны (предел границы лесной растительности, исключали водные поверхности и лишённые растительности территории), включающую 1750 тыс. км^2. Общая площадь континентальной тундровой территории Северной Евразии (в границах России), по данным анализа тематической карты Terra Norte RLC (Барталев и др., 2011), полученной на основании обработки MODIS, составила 2610 тыс. км^2. Другими авторами (Raynolds et al., 2012) площадь оценена как 1822 тыс. км^2, при этом почти 98,6 % — это территория России. Тундровый биом северной Евразии, по данным работы (Beurs, Henebry, 2010), занимает 3700 тыс. км^2. Расхождения в площадных оценках авторов являются, с одной стороны, следствием использования различных по пространственному разрешению материалов спутниковых съёмок, с другой — различиями в подходах к разделению тундровых и болотных сообществ, исключению из расчётов участков горных тундр.

Для полученных временных серий MODIS для каждого пикселя изображения рассчитывали среднее значение по набору максимальных межгодовых показателей ($NDVI_X$), полученных по всему периоду наблюдений, стандартное отклонение (SD) и коэффициент вариации (C_V, %). Усреднённые для всего периода наблюдений величины стали основой для анализа особенностей широтно-долготного распределения индекса в тундровом регионе, что может быть использовано для современного зонирования растительного покрова. Особенности многолетнего хода значений индекса вычисляли для отдельных модельных участков, локализованных на всём протяжении территории. Размеры участков (379 шт.) соответствовали разграфке и площади листов карты М 1:200 000. Ряды хода $NDVI_{MAX}$ для построенных полигонов использовали для выявления близости изменений по значениям межгодовых флуктуаций индекса (анализ коэффициента корреляции) и последующего выполнения сегментации территории на однородные по ходу области.

В качестве меры *интенсивности и направленности изменений* показателя индекса $NDVI_{MAX}$ за указанные интервалы времени рассчитывали коэффициент линейного тренда, определённый

по методу наименьших квадратов и характеризующий среднюю скорость изменений переменной за рассматриваемые периоды наблюдений (β) (средняя интенсивность изменения NDVI год$^{-1}$). Показатель β был дифференцирован в соответствии с работой (Goetz et al., 2005) в градациях значений: высокие отрицательные изменения ($\beta \leqslant -0{,}006$), низкие отрицательные изменения ($-0{,}006 < \beta \leqslant -0{,}003$), несущественные изменения ($-0{,}003 < \beta \leqslant 0{,}003$), слабые положительные ($0{,}003 < \beta \leqslant 0{,}006$) и высокие положительные ($0{,}006 < \beta$) изменения, отмеченные за год. Для оценки статистической значимости полученного тренда использовали 5%-й уровень значимости с привлечением критерия Фишера.

Изменения на региональном уровне анализировали для выделенных групп регионов с учётом принятых схем физико-географического районирования ранга «физико-географических стран» (Физико-географическое..., 1968) и широко используемых в научной практике (Анисимов и др., 2015; Olson et al., 2001). Наибольшая территория тундровой зоны (37,9 %) включает Восточную Сибирь (ВС) и Северо-Восток Сибири (С-ВС) (29,7 %). На тундры европейского севера (ЕТР) приходится меньшая площадь (11,8 %), чем на Западную Сибирь (ЗС) (19,7 %).

Результаты и обсуждение

Основным лимитирующим фактором, регулирующим развитие растений в Субарктических и Арктических широтах, является тепловой режим. Анализ значений температуры воздуха у земной поверхности, выполненный по результатам наблюдений метеостанций Севера Евразии (источник данных: meteo.ru) показывает, что для всего периода работы сенсора MODIS преобладают тренды роста подекадно усреднённых показателей приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) (*рис. 1*).

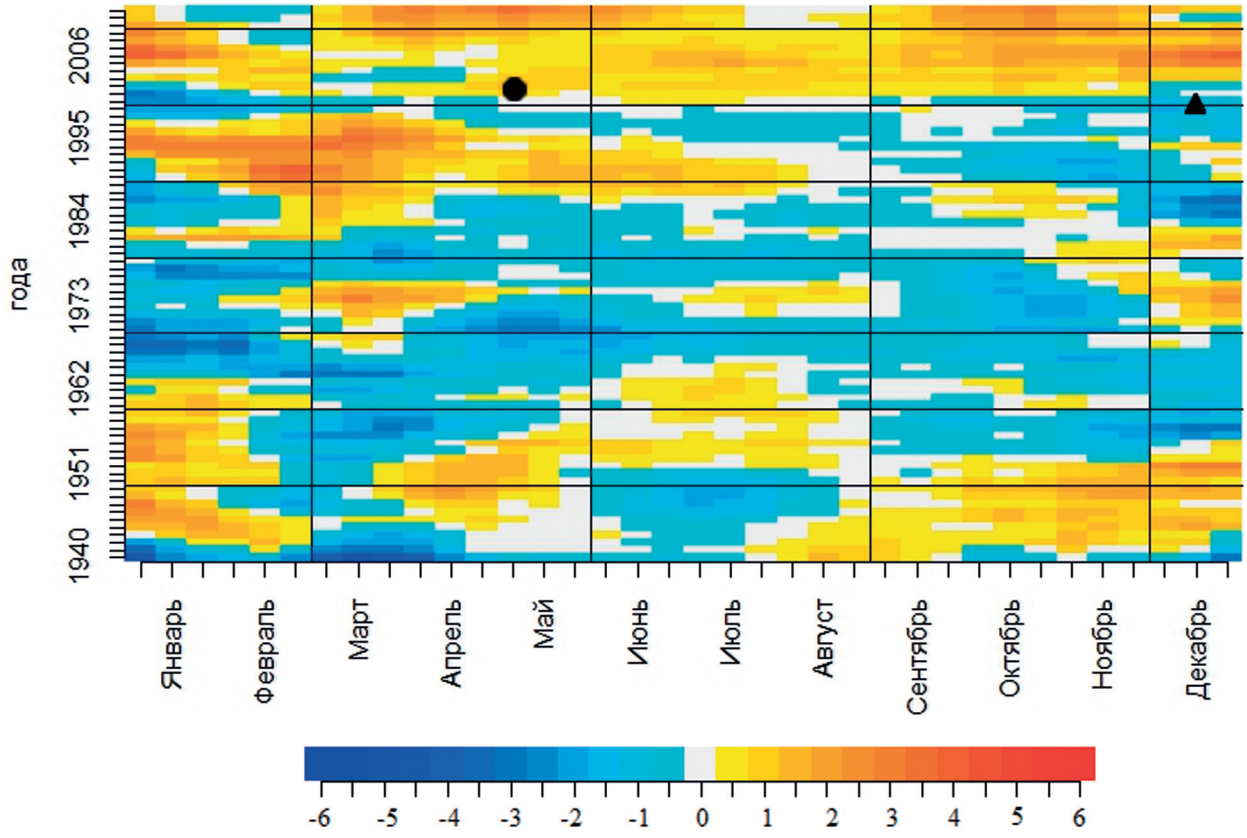


Рис. 1. Диаграмма аномалий декадного хода величин ПТВ, усреднённых для набора м/ст. Атлантической климатической области (Елсаков, 2014). В качестве среднего использовали период 1940–2016 гг. Отмечены даты запуска спутника Terra — 18.12.1999 (чёрный треугольник) и Aqua — 04.05.2002 (чёрный кружок)

В начале работы прибора сохранялась фаза более низких, чем многолетние средние, показателей ПТВ зимних периодов. Максимальные значения индекса NDVI характеризовались как наиболее низкие для всего периода наблюдений. В последующие годы для всех сезонов доминировали превышающие средние значения величины. Схожие температурные особенности отмечены для всех участков континентальной части Севера Евразии: Атлантической, Сибирской и Тихоокеанской климатических областей (Атлас..., 1985). Оценку интенсивности и направленности наблюдаемых изменений индекса NDVI по съёмкам MODIS выполняли для нескольких временных рядов. Выделение отдельных временных интервалов связано с различиями в формировании ответных реакций компонентов криолитозоны на периоды роста температурных показателей. Рассматривали весь период наблюдений (2000–2016), этап формирования и развития начальной реакции компонентов криолитозоны на рост температуры (2000–2009) и этап сформированной реакции, связанный с ежегодными превышениями температуры над средними показателями (2009–2016).

Можно предполагать, что столь масштабные изменения метеорологических показателей приведут и к равномерным, зонально-обусловленным изменениям характеристик растительного покрова. Однако реакция различных компонентов природной среды на меняющиеся метеорологические параметры в пределах отдельных территории Арктического региона неоднозначна. Наиболее важными климатическими факторами, вносящими «интразональные» различия в формирование термических условий территорий, являются макрометеорологические процессы, характеризующиеся не только динамичностью, охватом больших или меньших пространств, но и множеством форм своего проявления (циклоны, антициклоны, атмосферные фронты и т. д.) (Борисов, 1970). Различия определены и близостью территории к океану: 80 % территории равнинных тундр (3,2 млн км^2) удалены от океана менее чем на 100 км (Bhatt et al., 2010); присутствием и особенностями состава и температуры многолетнемерзлых пород (ММП) и высотной поясностью.

Согласно резервуарно-потоковой модели продукционного процесса (Воронин, 2006) растения разделены на «донорную» (фототрофную) и «акцепторную» (гетеротрофную) части, объединённые проводящей системой. Надземная фитомасса сообществ рассматривается как сочетание автотрофных/гетеротрофных частей. Данные спектрозональной съёмки характеризуют параметры, сформированные преимущественно «донорными» частями растений. Для тундровых сообществ с абсолютным доминированием однолетних травянистых растений (лайды Белого моря) зависимость между надземной фитомассой (г/м^2) и NDVI представлена в виде линейной функции (Елсаков, Щанов, 2005). Рост участия многолетних и одревесневающих частей приводит к усложнению зависимостей. Для многих исследованных территорий с участием кустарников и кустарничков она представлена в виде территориально адаптированных экспоненциальных функций.

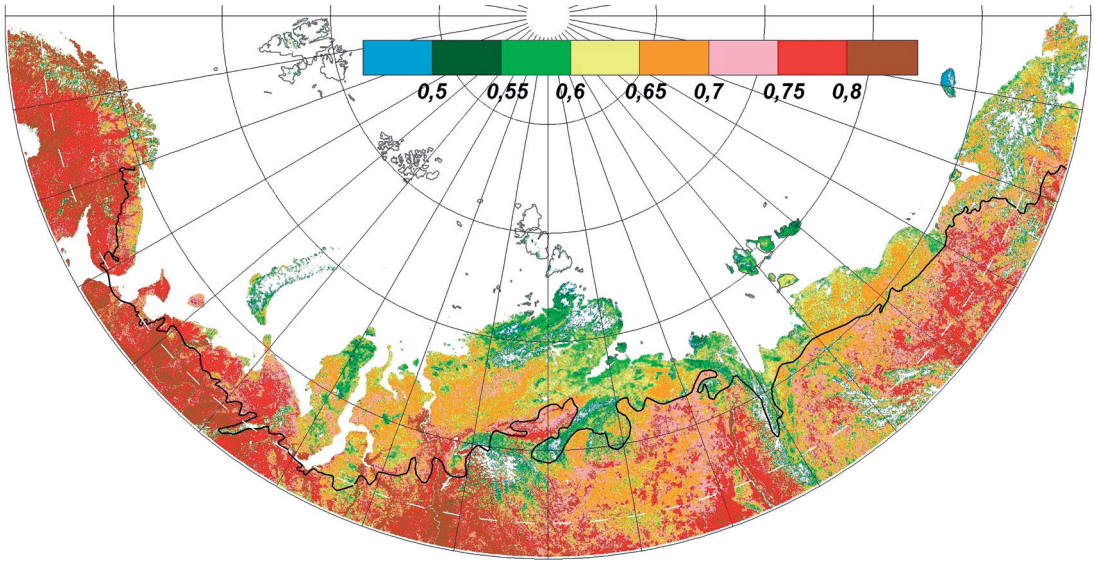
Распределение усреднённых показателей NDVI. Анализ усреднённых максимальных значений (NDVI) по съёмкам MODIS 2000–2016 гг. отражает современные зональные и долготные особенности распределения зелёной фитомассы (*рис. 2а*). Зависимости, определяемые континентальной зональностью, климатическими и мерзлотными условиями отдельных регионов, их орографическими особенностями, в меньшей степени отражены на ранее полученных съёмках менее детального разрешения AVHRR (Raynolds et al., 2006). Вычисление средних величин показателя устранило влияние погодных условий отдельных лет наблюдений.

С другой стороны, полученное изображение демонстрирует исторические особенности расположения и деградации ММП и возможные изменения южных границ криолитозоны в современных климатических условиях. Современные климатические условия северо-востока Русской равнины отличает бóльшая океаничность, что сказывается на меньшей протяжённости геокриологических зон, здесь представлены преимущественно южные субарктические тундры. Снижение значений индекса на смежных по широте участках с продвижением на восток связано с влиянием более морозного и континентального климата, способствующего сохранению в восточных регионах реликтовых ММП, в то время как в регионах ЕТР широко отмечаются признаки её деградации (Баулин и др., 1981; Оберман, 2007).

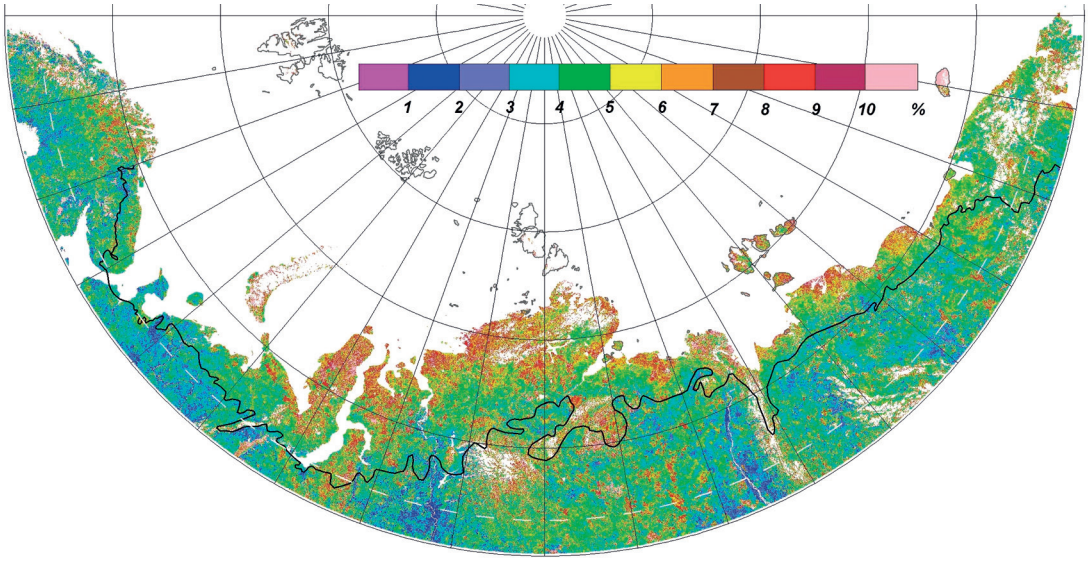
Для тундр ЕТР с «вялой, тёплой» мерзлотой (Астахов, Свенсен, 2011) средние значения показателя NDVI варьируют в пределах 0,75–0,8, отмечено снижение показателя к северным

тундрам до 0,7. Для тундр ЗС той же географической зоны значения индекса значимо ниже и составляют 0,65–0,7, снижаясь к северу п-ва Ямал (вдоль восточной части) до 0,50–0,55. По менее детальным данным съёмки AVHRR регионы демонстрировали схожие различия: для Канинско-Печорской флористической провинции показатель оценён как 0,57±0,04 (X±SD), Ямало-Гыданской — 0,47±0,03 (Raynolds et al., 2006). Тундры ВС обладали наименьшими значениями показателя для континентальных участков (0,5 и ниже). Основная территория С-ВС имела участки со значениями индекса 0,65–0,7.

Южные тундры характеризуются значительным участием в сложении надземной фитомассы как зелёных частей — преимущественно травянистых, мхов и лишайников (до 40 %), так и одревесневающих надземных частей кустарников и кустарничков (35–40 %) (Базилевич, 1993), которые слабо выделяются на съёмках оптических сенсоров. В суммарной фитомассе сообществ с участием одревесневающих частей кустарников и кустарничков зелёные органы растений составляют незначительную долю: для модельного участка багульниково-мохового и ивнякового сообществ участка «Сейда» (восток Большеземельской тундры) она составила 35,3–45,3 и 21,0 % соответственно. С продвижением на север роль мхов и лишайников в формировании запасов фитомассы увеличивается, сосудистых растений ослабевает.



а

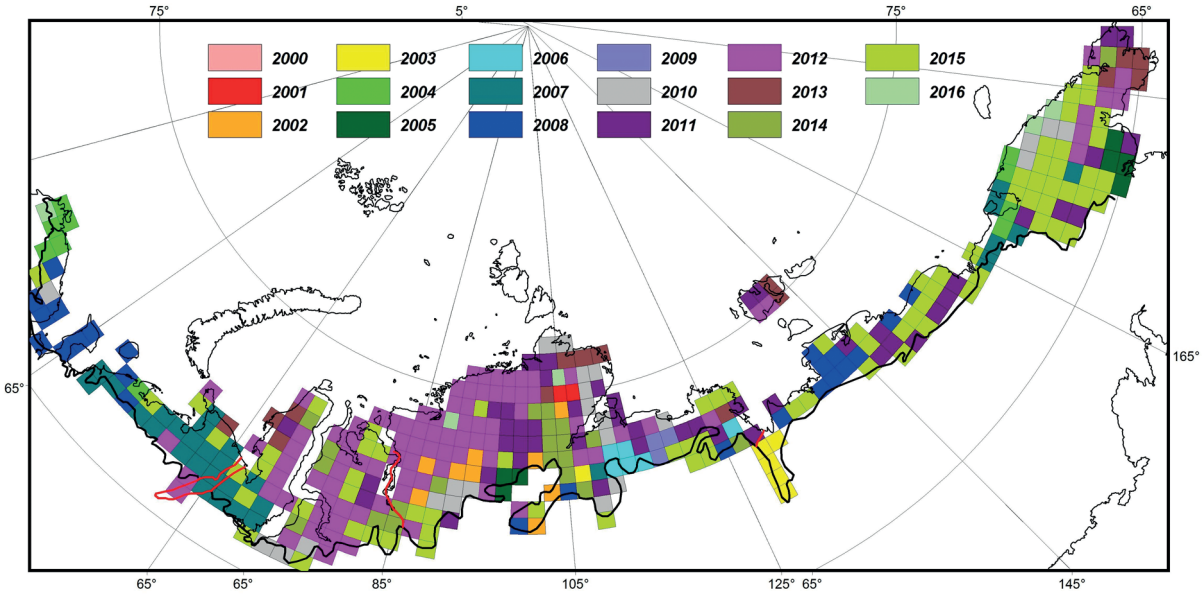


б

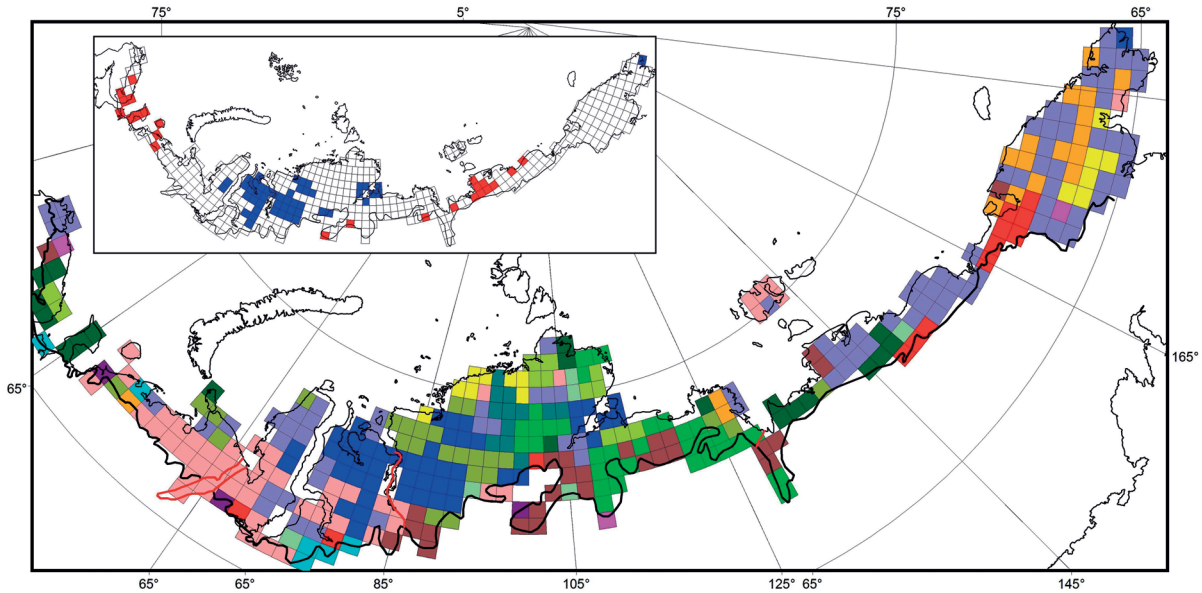
Рис. 2. Средние значения максимумов NDVI ($NDVI_{MAX}$) для вегетационных периодов 2000–2016 гг. (*а*), коэффициент вариации показателя (C_V, %) (*б*). Материалы съёмки MODIS (MOD13Q1.005). Отмечена граница леса

Общий уровень изменчивости показателя увеличивается от участков зоны крайнесеверной тайги к южным гипоарктическим тундрам и достигает максимальных значений для арктических тундр и пустынь и горных тундр, что связано с большей межгодовой вариабельностью погодных условий, снижением запаса зелёной фитомассы. Участки южных тундр характеризуются меньшей межгодовой вариабельностью показателя C_V (на уровне 4–5 %) (*рис. 2б*). С продвижением к северу коэффициент вариации возрастает до 8–9 % и более. Межгодовая изменчивость годовых максимумов значений $NDVI_{MAX}$ для 84 % территории не выше 6 %.

Межгодовой ход индекса NDVI. Сравнительный анализ межгодовых изменений показателей $NDVI_{MAX}$, выполненный для усреднённых модельных участков (*рис. 3*), показал, что на территории тундровой зоны Севера Евразии для тех же лет наблюдений фиксируется десинхронизация амплитуды развития запасов зелёной фитомассы.



а



б

Рис. 3. Периоды достижения максимальных (*а*) и минимальных (*б*) значений NDVI для интервала 2000–2016 гг. Цветом отмечены отдельные года наблюдений. Разграфка участков соответствует листам 1:200 000. Врезка на рис. 3*б* демонстрирует наличие максимумов и минимумов значений индекса на примере 2008 г.

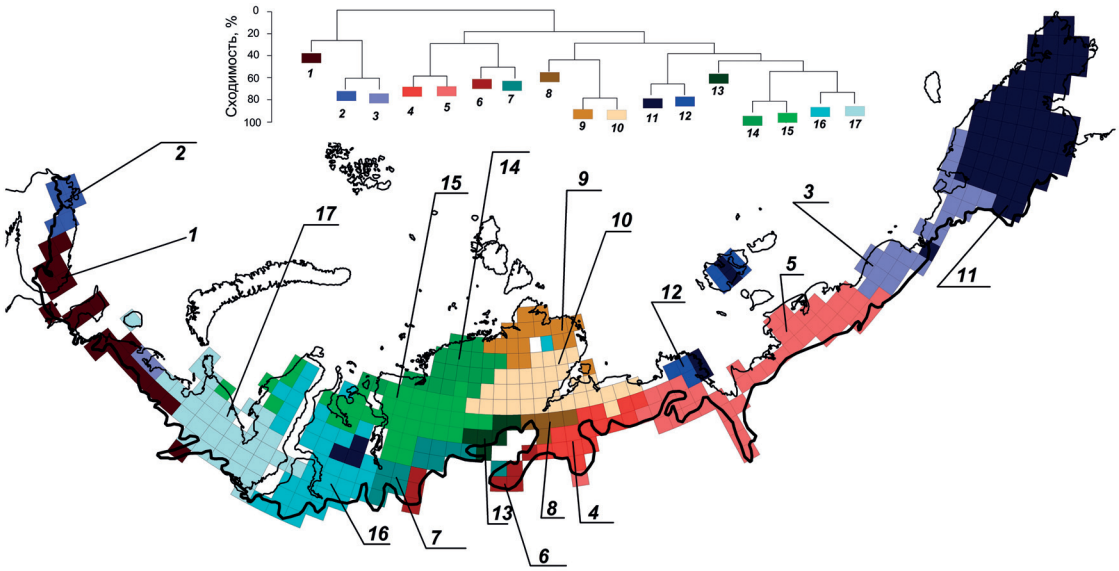
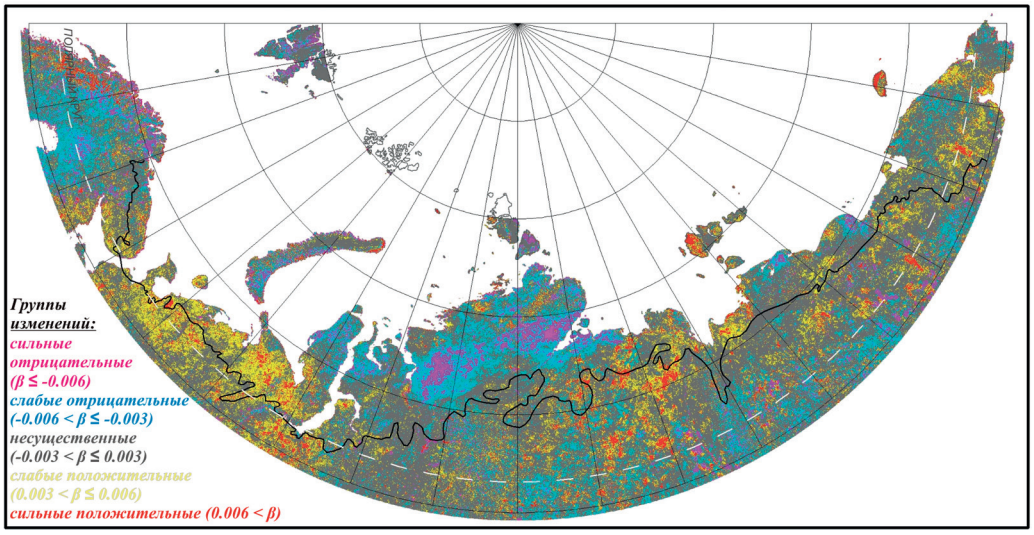


Рис. 4. Кластеры участков с однородным ходом показателей хода NDVI периода 2000–2016 гг. по значениям коэффициента корреляции между выделенными районами. Цветом представлены однородные по ходу NDVI участки

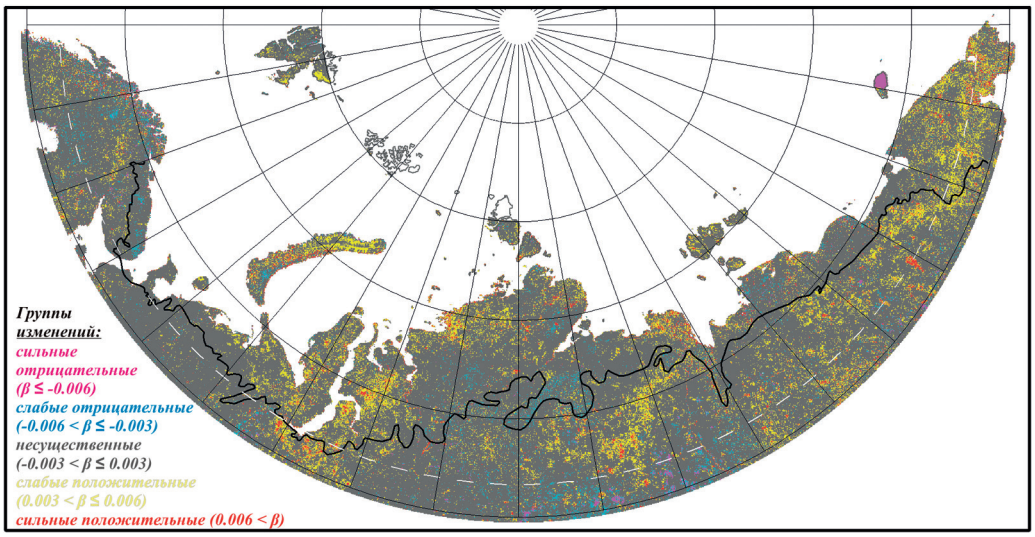
Для многих лет рассмотренного временного интервала не совпадают годы наступления максимумов и минимумов NDVI. Исключение составили 2000 и 2009 гг. (не отмечены значения NDVI с максимальными величинами) и 2010–2012 гг. (не отмечены минимальные значения). В остальные года максимумы и минимумы присутствуют совместно. Наличие разнонаправленных по амплитуде процессов развития надземной фитомассы может оказывать влияние и на различия пиков численности отдельных популяций растений и животных для одного временного периода разных регионов.

В пределах регионов сформированы однородные специфичные по ходу индекса NDVI территории. Метод кластерного анализа (оценка сходства коэффициентов корреляции между величинами хода NDVI модельных участков) объединил группы в более крупные сопряжённые между собой территории (*рис. 4*). Близость выделенных кластеров отражает относительные показатели варьирования зелёной фитомассы. Группировка большинства сформированных кластеров повторяет схему климатического районирования Арктического сектора Евразии (Атлас..., 1985). Выделенные кластеры сгруппированы в соответствии с расположением основных ядер климатических областей: южной (№ 1 и 2) и восточной (№ 14–17) атлантических; сибирской (№ 4–10 и 12–15). Большая часть территории С-ВС разделена: кластер № 11, соответствующий тихоокеанской климатической области, занял промежуточное местоположение между кластерами сибирской и восточно-атлантической климатических областей; кластер № 3 близок к группе южной атлантической области. Объединённые в кластеры территории находят отражение в сходстве состава локальных флор. Наиболее отчётливо это проявляется на примере Югорско-Ямало-Гыданского сектора (кластеры № 15–17), для которого установлено (Королева и др., 2014), что флоры северной части по большинству таксономических параметров ближе к таймырским, а южной — к европейским.

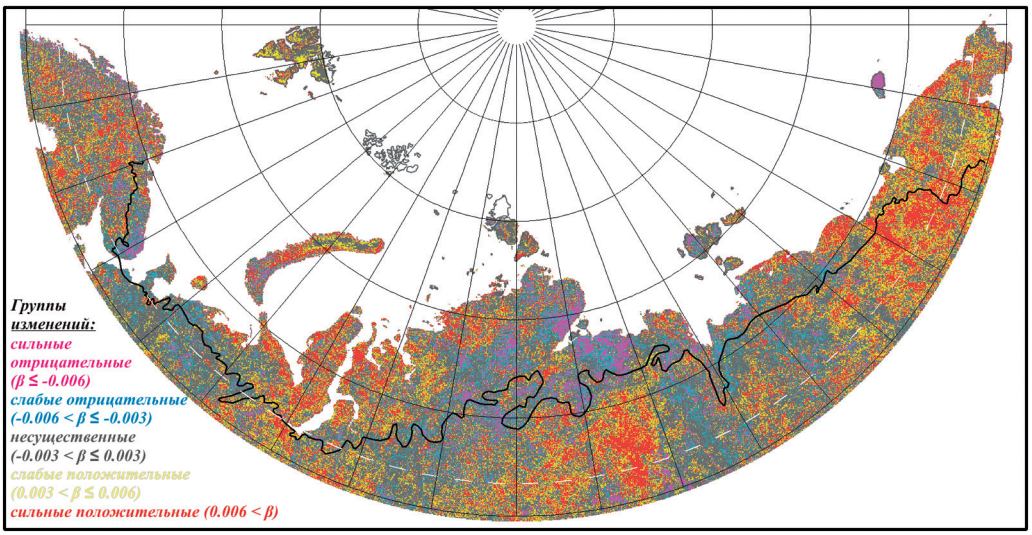
Присутствие в одни года максимумов и минимумов определяется различиями в причинах формирования продуктивности фитоценозов. Предикторами изменений растительных сообществ выступают часто связанные между собой показатели: температура приземного слоя воздуха и рост температуры верхней кровли ММП (Природная..., 2005). Связь между ними меняется в пределах протяжения всей тундровой зоны. Как показано А. Б. Шерстюковым (2009) на примере вариабельности среднегодовой температуры почвогрунтов, многолетние изменения температуры воздуха (за период 1965–2006 гг.) определяют на Европейской территории России 20–50 % вариабельности признака и только на 5 % — в Сибири. В этом отношении основным предиктором развития максимума фитомассы на территории ЕТР, вероятно, является температура приземного слоя воздуха, для Зауралья — температура верхней кровли ММП (глубина сезонно-талого слоя).



а



б



в

Рис. 5. Тренды межгодовых изменений максимальных значений индекса NDVI (зелёной фитомассы) на территории Северной Евразии за временные периоды 2000–2009 гг. (*а*) и 2000–2016 гг. (*б*) и 2009–2016 гг. (*в*). По данным спутниковой съёмки MODIS (MOD13Q1.005). Размерность представлена в виде градации показателя средней интенсивности изменений индекса за год (β). Линией отмечена граница леса

Анализ региональных межгодовых изменений NDVI (β). Для всего периода наблюдений 2000–2016 гг. на Севере Евразии преобладали (72,5 %) участки с незначительными (несущественными) изменениями (–0,003 < β ⩽ 0,003) (*рис. 5б*). Положительные трансформации показателя выражены на 20,3 % территории (из них 16,3 % — слабые и 4,13 % — сильные), отрицательные на 6,47 % (из них 5,0 % — слабые, 1,47 % — сильные). Наиболее существенно (30,8 % от площади региона) положительные тренды затронули регионы ЗС (Тазовский и центральная часть Гыданского п-овов), ВС — 14,9 % (западные предгорья Барранга, бассейн нижнего течение р. Лена), С-ВС — 13,8 % (спорадически Чукотский п-ов) и востоке ЕТР — 12,1 % (прибрежные тундры Медынского и Югорского п-овов). Разбиение временного интервала на отдельные периоды 2000–2009 гг. (период формирования устойчивого тренда ПТВ) и 2009–2016 гг. (период развитого тренда) позволило наблюдать смены амплитуды изменений характеристик фитоценозов в пределах регионов. Для первого этапа доля площадей несущественных изменений составила 56,6 % территории, ко второму она снизилась до 35,5 %. Между этапами отмечен рост доли положительных изменений: с 20,0 % территории (слабые 14,6 %, сильные 5,4 %) до 41,1 % (17,1 и 24,0 % соответственно). Доля отрицательных изменений существенно не изменилась: от 23,9 % (слабых 15,7 %, сильных 8,3 %) до 23,1 % (слабых 10,9 %, сильных 12,2 %).

На территории ЕТР рост индекса NDVI для первого этапа наблюдений был наиболее выражен: низких 32,3 %, высоких 11,8 %. Основные трансформации затрагивали районы восточного и северного побережья Мурманской области, южную часть Югорского п-ва, Северный Тиман. Для второго этапа общий рост снизился до 30,4 % (*рис. 6а*), однако доля высоких положительных изменений увеличилась до 16,5 %. Визуально рост индекса NDVI локализован в тундрах Баренцевоморского побережья и северной части п-ова Югорский. На территории отмечен рост доли отрицательных изменений: с 6,1 до 25,2 % (с 2000–2016 гг. — 5,78 %). Полевые исследования и аэровизуальные наблюдения, выполненные на территории Большеземельской и Канинской тундр, позволяют установить доминирующие фитоценозы локализованные на участках отмеченных изменений. Рост величин индекса приходится на участки кустарниковых тундр (доминируют *S.lana*, *S.phylicifolia*), низкорослых ивняков с доминированием *S.glauca*, активно осваивающие обширные площади приморских тундр и северной части Югорского п-ва.

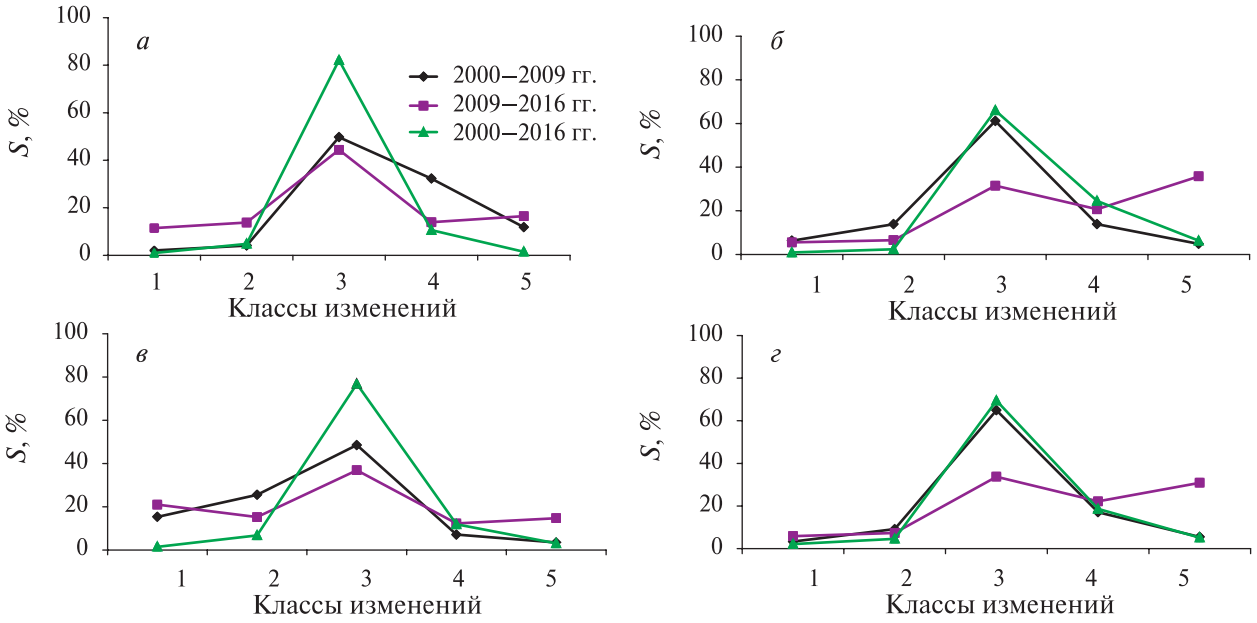


Рис. 6. Относительные площади изменений для разных периодов наблюдений (2000–2009 гг., 2009–2016 гг.; 2000–2016 гг.) отдельных классов β (ΔNDVI год$^{-1}$) (1 — высокие отрицательные изменения (β ⩽ –0,006), 2 — низкие отрицательные (–0,006 < β ⩽ –0,003), 3 — несущественные (–0,003 < β ⩽ 0,003), 4 — слабые положительные (0,003 < β ⩽ 0,006) и 5 — высокие положительные (0,006 < β) изменения): *а* — Европейская территория России (ЕТР); *б* — Западная Сибирь (ЗС); *в* — Восточная-Сибирь (ВС); *г* — Дальневосточный (Северо-Восток Сибири (С-ВС))

Западная Сибирь. Интенсивный рост (до 56,5 %) положительных трендов наблюдается для второго этапа наблюдений (низкие 20,8 %, высокие 35,8 %). На первом этапе положительные тренды изменений составили всего 18,7 % и были локализованы в юго-западном секторе п-ва Ямал и северной части п-ва Таз. Положительные тренды NDVI по всему периоду наблюдений показали 30,8 % площади региона (24,5 и 6,3 %). Рост продуктивности тундровых фитоценозов — последствие деградации ММП последних лет, что дополнительно подтверждено широко освещёнными в печати фактами: образование Ямальской воронки (2014); возникновение эпизоотий сибирской язвы в популяциях северного оленя в 2016 г. вследствие активизации «старых» почвенных очагов (Селянинов и др., 2016), роста закустаривания (Хитун и др., 2011), развитие термокарста (Полищук и др., 2017) и др. Отрицательные тренды первого этапа, выявленные на 20,2 % территории (высокие 6,31 %, низкие 13,9 %), снизили своё присутствие до 12,0 % (5,48 и 6,55 % соответственно). Интенсивное снижение значений индекса на первом этапе наблюдений можно связать со снижением запаса фитомассы, наблюдаемым вследствие высокой нагрузки выпаса северного оленя на территории (Магомедова и др., 2006).

Восточная Сибирь. Несмотря на то, что для всего периода наблюдений тренд отрицательных изменений отмечен только в пределах 8,2 % территории, он имел высокие показатели для первого периода наблюдений (высокие 15,3 %, низкие 25,2 %). В последующем наблюдаем рост высоких (21,0 %) и снижение низких (15,2 %) величин. Это характеризует возможность развития разнонаправленных трендов. Наиболее важными районами трансформации являются тундры Северо-Сибирской низменности. Расположенный в их пределах биогеоценологический стационар «Тарея» (среднее течение реки Пясины, Западный Таймыр) позволил верифицировать основные изменения. Для его окрестностей отмечена интенсивная деградация ММП, связанная с полигонизацией и заболачиванием тундр. Сравнение выполнено для интервала 1970–2010 гг. (Матвеева и др., 2014). Площадь участков положительных изменений невелика: для первого этапа составила 10,6 %, на втором интенсивность выросла до 26,9 % (для всего периода 14,9 %). Деградации ММП инициировала рост запаса зелёной фитомассы фитоценозов.

Северо-Восточная Сибирь. Этапы наблюдений демонстрируют существенный рост площадей положительных трендов (с 22,6 до 53,1 %, для всего периода 23,8 %). Доля незначимых изменений снизилась на территории с 64,9 до 33,7 %. Основные положительные трансформации первого этапа наблюдений приурочены к западным частям Яно-Индигирской, Нижнеколымской и Ванкаремской низменностям. Для Нижнеколымского района отмечено (Шадрин, 2009) катастрофическое сокращение и деградация пастбищных угодий северного оленя (до 30 % территории), связанная с быстрым распространением кустарников. Отрицательные тренды не изменились (первый этап на 12,5 % площади, второй — на 13,2 %). В пределах востока Колымской низменности отрицательные изменения отмечены на территориях с деградирующими ММП (низкая едомность и высокая степень термокарстовой заозёренности (>29 %) (Веремеева, Глушкова, 2016)).

Анализ статистически значимых изменений. Анализ межгодовых изменений данных MODIS для региона Северной Евразии ранее был выполнен на данных съёмки NASA MCD43C4 («надирные» коэффициенты спектральной яркости (bidirectional reflectance distribution function, BRDF)) с разрешением 0,05° (~5600 м) с охватом временного интервала 2000–2008 гг. (Beurs, Henebry, 2010). Отмеченные области изменений визуально сопоставимы с данной работой для соответствующего периода. Авторы отмечают, что значимый ($p \leqslant 0{,}05$) положительный тренд изменений на участках тундровой зоны отмечен на площади 9,3 %, отрицательный — на 18,9 %. По материалам выполненной нами работы доля устойчивых, статистически значимых ($p = 0{,}95$), положительных изменений периода 2000–2009 гг. отмечена на площадях 2,86 % (1,04 % слабые, 1,82 % сильные), отрицательных — 6,1 % территории (1,91 % слабые, 4,22 % сильные). Из них на территории ЕТР наблюдали 0,87 % положительных изменений (1/3). Трёхкратное превышение площадей, полученное в приведённой статье, может быть вызвано различиями в пространственном разрешении использованных снимков, продолжительности периода наблюдений и исключением из расчётов значений, входящих в класс «незначительных изменений» ($-0{,}003 < \beta \leqslant 0{,}003$).

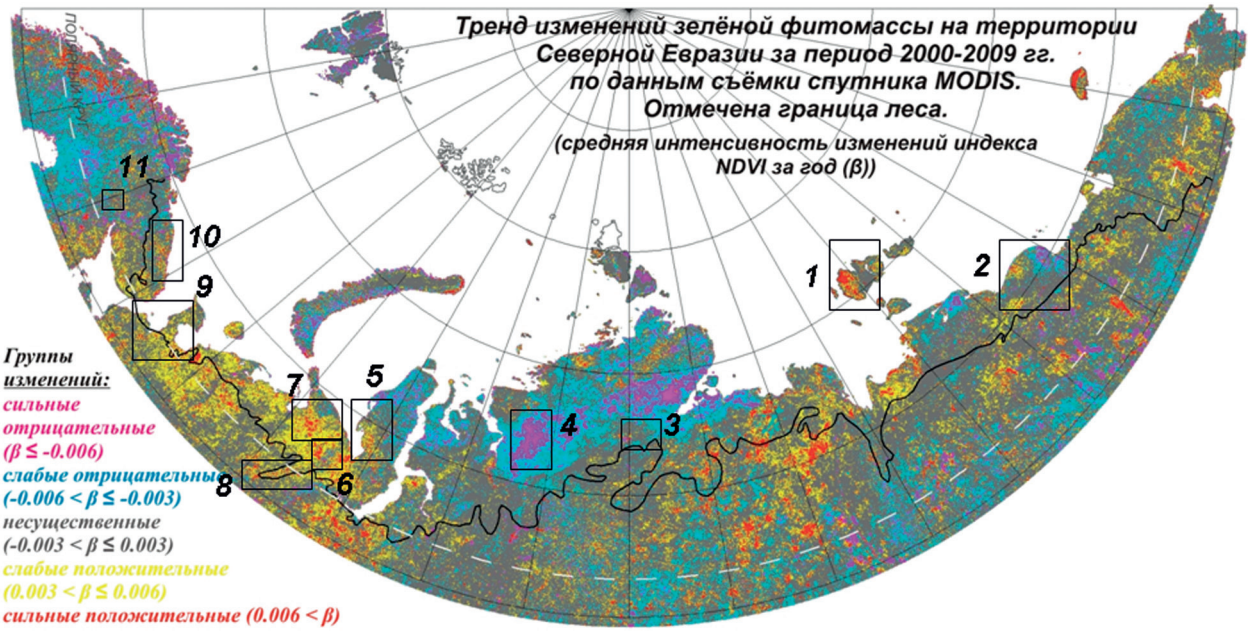


Рис. 7. Изменения растительных сообществ, фиксированные инструментальными методами и отмеченные в научных публикациях. Цифрами отмечены участки значимых изменений, зафиксированные в публикациях: 1 — формирование высокопродуктивных осоково-злаковых фитоценозов на лессовых байджараках Новосибирских о-вов (Левыкин и др., 2013); 2 — закустаривание катастрофическое сокращение и деградация пастбищных угодий в Нижнеколымском районе (пастбища общины «Турваургин») (Шадрин, 2009); 3 —увеличение сомкнутости лиственничных редколесий урочища Ары-Мас (Таймыр) (Харук и др., 2006); 4 — полигонизация и заболачивание тундр в районе биогеоценологического стационара «Тарея» (Матвеева и др., 2011, 2014); 5 — аномально высокий рост показателя NDVI на территории западной части п-ва Ямал в южной части Бованенковского ГКМ (сравнительный анализ съёмки Landsat) (Якубсон и др., 2012), активное распространение высоких (до 1,0–1,5 м) зарослей ив (и.шерстистая, и.сизая) (Хитун и др., 2011); 6 — локальное продвижение границы леса в экотоне тундра-тайга на Полярном Урале (Шиятов и др., 2005); 7 — закустаривание на территории Югорского п-ва (Елсаков, Кулюгина, 2014); 8 — изменения границы леса в экотонных зонах Приполярного Урала (Елсаков, Марущак, 2011); 9 — изменения экотонных зон Мезенской тундры (Елсаков, 2014); 10 — увеличение сомкнутости и расширение северных границ берёзовых редколесий, сгущение кустарниковой растительности и продвижение её в лишайниковую тундру (бассейн р. Териберка) (Кравцова, Лошкарева, 2013); 11 — продвижение границы леса в Хибинах (Михеева, 2011; Михеева и др., 2017)

Для отдельных регионов наблюдали существенное снижение доли площади положительных изменений между двумя сравниваемыми периодами для ЕТР (с 7,4 до 2,8 %) и их повсеместное увеличение для остальных регионов (особо интенсивно для С-ВС — с 3,2 до 7,0 %). Обратную зависимость наблюдали для отрицательных изменений.

Верификация выявленных изменений по опубликованным литературным данным. В опубликованной литературе преимущественно отмечены результаты, связанные с анализом изменений характеристик растительного покрова за период до 2009 г., поэтому основное сопоставление опубликованных данных с выявленными трендами изменений выполняли по результатам съёмки MODIS 2000–2009 гг. (*рис. 7*).

Заключение

Метеорологические наблюдения, выполненные для Севера России, демонстрируют наличие устойчивого тренда потепления, наблюдаемого, прежде всего, по изменениям приземной температуры воздуха (ПТВ). Рост показателя инициирует увеличение продуктивности тундровых сообществ, интенсивность деградации ММП. На территории ЕТР повышение ПТВ вызвало увеличение показателя NDVI уже в течение первых лет наблюдений по съёмкам MODIS. Увеличение продуктивности растительных сообществ хорошо наблюдается на изображениях 2000–2009 гг., в последующий период стабилизируется. Для периода последних

лет наблюдений 2009–2016 гг. рост значений NDVI отмечен на участках ЗС и С-ВС, в меньшей мере ВС с реликтовыми ММП, имеющих высокую льдистость и в меньшей степени подверженных влиянию ПТВ. Участки устойчивых изменений продуктивности фитоценозов на этих территориях маркируют ландшафты с активными перестройками мерзлотных условий. Они преимущественно связаны с быстрым развитием ивняков и травянистых растений (положительные изменения), полигонизацией тундр и заболачиванием (отрицательные).

«Позеленение» российской Арктики, широко отмеченное в работах многих авторов последних лет, инициировано различными факторами: для ЕТР предиктором изменений выступает, прежде всего, ПТВ, для сообществ Зауралья — степень деградации и температурный режим ММП. Поэтому в различные тёплые годы интервала 2000–2016 гг. рост продуктивности растительных сообществ (зелёной фитомассы) на территории распределён неравномерно.

Разрозненность полевых геоботанических и экологических инструментальных исследований, выполненных для различных регионов территории Севера Евразии, закрытие и сокращение программ долговременных стационарных наблюдений сделали затруднительным статистически корректный анализ трендов изменений растительного покрова труднодоступных регионов Арктической и Субарктической России. Привлечение материалов разновременной спутниковой съёмки позволяет частично восполнить образовавшиеся пробелы. Полученные в работе результаты демонстрируют широкие возможности использования спутниковых съёмок MODIS для визуальной и количественной оценки изменений продуктивности, связанных с деградацией ММП, анализа интенсивности и направленности временных трансформаций фитоценозов (динамическое картографирование), выявления роли ландшафтных (фациальных), геоморфогенных и климатогенных условий в формировании исследуемых показателей.

Работа выполнена в рамках Комплексной программы фундаментальных научных исследований УрО РАН 2018–2020 гг. Подпрограмма Арктика. Проект № 18-9-4-5.

Литература

1. *Анисимов О. А.*, *Жильцова Е. Л.*, *Разживин В. Ю.* Моделирование биопродуктивности в арктической зоне России с использованием спутниковых наблюдений // Исследование Земли из космоса. 2015. № 3. С. 60–70.
2. *Астахов В. И.*, *Свенсен Й. И.* Покровная формация финального плейстоцена на крайнем северо-востоке европейской России // Региональная геология и металлогения. 2011. № 47. С. 12–27.
3. Атлас Арктики. М.: Глав. упр. геодезии и картографии при СМ СССР, 1985. С. 97–98.
4. *Базилевич Н. И.* Биологическая продуктивность экосистем Северной Евразии. М.: Наука, 1993. 293 с.
5. *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.
6. *Баулин В. В.*, *Данилова Н. С.*, *Суходольская Л. А.* История развития многолетнемерзлых пород на территории СССР и методы ее изучения // История развития многолетнемерзлых пород Евразии. М.: Наука, 1981. С. 24–40.
7. *Белоновская Е. А.*, *Тишков А. А.*, *Вайсфельд М. А.*, *Глазов П. М.*, *Кренке-мл. А. Н.*, *Морозова О. В.*, *Покровская И. В.*, *Царевская Н. Г.*, *Тертицкий Г. М.* «Позеленение» Российской Арктики и современные тренды изменения её биоты // Известия Российской академии наук. Сер. географическая. 2016. № 3. С. 28–39.
8. *Борисов А. А.* Климатография Советского Союза. Л.: Ленинградский университет, 1970. 310 с.
9. *Веремеева А. А.*, *Глушкова Н. В.* Формирование рельефа в районах распространения отложений ледового комплекса в тундрах колымской низменности // Криосфера Земли. 2016. Т. 20. № 1. С. 15–25.
10. *Воронин П. Ю.* Хлорофильный индекс и фотосинтетический сток углерода Северной Евразии // Физиология растений. 2006. Т. 53. № 5. С. 777–785.
11. *Елсаков В. В.* Визуализация данных климатических изменений растительных сообществ Мезенской и Канинской тундр по материалам спутниковых съёмок // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 1. С. 83–86.

12. *Елсаков В. В.*, *Кулюгина Е. Е.* Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических изменений последних десятилетий // Исследования Земли из космоса. 2014. № 3. С. 65–77.
13. *Елсаков В. В.*, *Щанов В. М.* Особенности спектральных характеристик приморских лугов восточного побережья Малоземельской тундры // Биоразнообразие наземных и водных экосистем охраняемых территорий Малоземельской тундры и прилегающих регионов. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 2005. № 178. С. 5–20.
14. *Королева Т. М.*, *Зверев А. А.*, *Петровский В. В.*, *Поспелов И. Н.*, *Поспелова Е. Б.*, *Хитун О. В.*, *Чиненко С. В.* Отражение широтной дифференциации растительного покрова Крайнего Севера в структуре локальных флор // Теоретическая и прикладная экология. 2014. № 1. С. 12–15.
15. *Кравцова В. И.*, *Лошкарева А. Р.* Динамика растительности экотона тундра-тайга на Кольском полуострове в связи с климатическими колебаниями // Экология. 2013. № 4. С. 275–283.
16. *Левыкин С. В.*, *Яковлев И. Г.*, *Казачков Г. В.*, *Грудинин Д. А.* Ландшафтные особенности острова Новая Сибирь // Охрана окружающей среды и природопользование. 2013. № 1. С. 79–83.
17. *Магомедова М. А.*, *Морозова Л. М.*, *Эктова С. Н.*, *Ребристая О. В.*, *Чернядьева И. В.*, *Потемкин А. Д.*, *Князев М. С.* Полуостров Ямал: растительный покров. Тюмень: Сити-пресс, 2006. 360 с.
18. *Матвеева Н. В.*, *Заноха Л. Л.*, *Янченко З. А.* Биогеоценологический стационар «Тарея» — взгляд из прошлого // Развитие геоботаники: история и современность. Материалы конференции, посвящённой 80-летию кафедры геоботаники и экологии растений Санкт-Петербургского государственного университета. 31 января – 2 февраля 2011. СПб., 2011. С. 76–77.
19. *Матвеева Н. В.*, *Заноха Л. Л.*, *Янченко З. А.* Изменения во флоре сосудистых растений в районе Таймырского биогеоценологического стационара (среднее течение реки Пясины, Западный Таймыр) с 1970 по 2010 г. // Ботанический журн. 2014. Т. 99. № 8. С. 841–867.
20. *Михеева А. И.* Исследование изменений верхней границы леса по аэрокосмическим снимкам // Геодезия и картография. 2011. № 1. С. 31–36.
21. *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) // Исследования Земли из космоса. 2017. № 1. С. 24–34.
22. *Оберман Н. Г.* Глобальное потепление и изменение криолитозоны Печоро-Уральского региона // Разведка и охрана недр. 2007. № 4. С. 63–68.
23. *Полищук Ю. М.*, *Куприянов М. А.*, *Брыксина Н. А.* Дистанционное исследование динамики площади термокарстовых озер в сплошной криолитозоне Сибири // География и природные ресурсы. 2017. № 3. С. 164–170.
24. Природная среда в условиях открытой разработки угля (на примере Юньягинского месторождения). Сыктывкар, 2005. 246 с.
25. *Селянинов Ю. О.*, *Егорова И. Ю.*, *Колбасов Д. В.*, *Листишенко А. А.* Сибирская язва на Ямале: причины возникновения и проблемы диагностики // Ветеринария. 2016. № 10. С. 3–7.
26. Физико-географическое районирование СССР (характеристика региональный единиц). М.: МГУ, 1968. 575 с.
27. *Харук В. И.*, *Рэнсон К. Дж.*, *Им Ст.*, *Наурзбаев М. М.* Лиственичники лесотундры и климатические тренды // Экология. 2006. № 5. С. 323–331.
28. *Хитун О. В.*, *Лейбман М. О.*, *Москаленко Н. Г.*, *Орехов П. Т.*, *Уолкер Д. А.*, *Фрост Д. Д.*, *Хомутов А. В.*, *Эпштейн Х. Е.* Зональные изменения некоторых параметров растительного покрова в западносибирской Арктике // Отечественная геоботаника: основные вехи и перспективы: Материалы Всероссийской научной конф. с международным участием. Санкт-Петербург, 20–24 сент. 2011. СПб., 2011. Т. 1. С. 429–432.
29. *Шадрин В. И.* Коренные народы в условиях изменения климата (на примере народов Севера Якутии) // Вопросы истории и культуры северных стран и территорий: Материалы научн. симп. 2009. № 2. Т. 6. С. 95–101.
30. *Шерстюков А. Б.* Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. 127 с.
31. *Шиятов С. Г.* Динамика древесной и кустарниковой растительности в горах Полярного Урала под влиянием современных изменений климата. Екатеринбург: УрО РАН, 2009. 216 с.
32. *Якубсон К. И.*, *Корниенко С. Г.*, *Разумов С. О.*, *Дубровин В. А.*, *Крицук Л. Н.*, *Ястреба Н. В.* Геоиндикаторы изменения окружающей среды в районах интенсивного освоения нефтегазовых месторождений и методы их оценки // Электрон. науч. журн. «Георесурсы, геоэнергетика, геополитика». 2012. Вып. 2. № 6. 12 с. URL: http://oilgasjournal.ru/vol_6/kornienko.pdf/.
33. *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.
34. *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.

35. *Bhatt U. S.*, *Walker D. A.*, *Raynolds M. K.*, *Comiso J. C.*, *Howard E.*, *Epstein H. E.*, *Jia G.*, *Gens R.*, *Pinzon J. E.*, *Tucker C.J*, *Tweedie C. E.*, *Webber P. J.* Circumpolar Arctic Tundra Vegetation Change Is Linked to Sea Ice Decline // Earth Interactions. 2010. V. 14. No. 8. 19 p.
36. *Blok D.*, *Schaepman-Strub G.*, *Bartholomeus H.*, *Heijman M.*, *Maximov T.*, *Berendse F.* The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature // Environmental Research Letters. 2011. V. 6. DOI:10.1088/1748-9326/6/3/035502.
37. *Goetz Sc.*, *Bunn A. G.*, *Fiske G. J.*, *Houghton R. A.* Satelite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance // PNAS (Proc. National Academy of Sciences of the United States of America). 2005. V. 102. No. 38. P. 13521–13525.
38. *Olson D. M.*, *Dinerstein E.*, *Wikramanayake E. D.*, *Burgess N. D.*, *Powell G. V. N.*, *Underwood E. C.*, *D'Amico J.*, *Itoua I.*, *Strand H. E.*, *Morrison J. C.*, *Loucks C. J.*, *Allnutt Th. F.*, *Rickets T. H.*, *Kura Y.*, *Lamoreux J. F.*, *Wettengel W. W.*, *Hedao P.*, *Kassem K. R.* Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth // BioScience. 2001. V. 51. No. 10. 6 p.
39. *Raynolds M. K.*, *Walker D. A.*, *Maier H. A.* NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 102. P. 271–281.
40. *Raynolds M. K.*, *Walker D. A.*, *Epstein H. E.*, *Pinzon J. E.*, *Tucker C.* 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.
41. *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. DOI:10.1029/2007JG000407.

Spatial and interannual heterogeneity of changes in the vegetation cover of Eurasian tundra: Analysis of 2000–2016 MODIS data

V. V. Elsakov

Institute of Biology of Komi Science Centre UrB RAS, Syktyvkar, 167610, Russia
E-mail: elsakov@ib.komisc.ru

Changes in vegetation cover of north Eurasian tundra (about 1750 thousand km^2) for period 2000–2016 were analyzed using the dynamics of NDVI year maximum obtained by MODIS time series (MOD13Q1.005). Long term changes in annual index maxima were calculated for a grid compiled by plotting a grid of map sheets of scale 1:200 000. Analysis of dynamics of average index values was carried out for each year for the elements of the grid. There were years with simultaneous presence of maximal and minimal values. Correlation between the sites was calculated using Pearson correlation parameters and coincided with the climatic zoning. Trend of linear changes (β) ($\Delta NDVI_{MAX}$ year^{-1}) was calculated for the entire time interval and for individual intervals (2000-2009 and 2009–2016). The initial stages of phytocenosis modifications manifested most intensively in the territory of European Russia for the period 2009–2016 after growth of the surface air temperature in 2000 (positive 44.1 %, of which 32.3 % are weak positive, negative 6.1 %). The intensity of positive changes decreased to 30.4 % (however, the growth of strong positive changes continued to 16.5 %). The main predictor of changes for Trans-Ural region was the temperature regime of permafrost delaying response of plant communities to warming. Year changes had a similar pattern at West and North-East Siberia. The increase of the NDVI changes for West Siberia was strongly positive for the period 2009–2016 (from 4.8 % for the period 2000–2009 to 35.8 % for next period). For North-East Siberia, communities' parameter changed from 5.5 to 30.9 %. The greatest differences of NDVI trends were noted for the territory of East Siberia. The negative changes were associated with the starting degradation of permafrost expressed as polygonization and bogging processes at tundra during 2000–2009 years. Growth of significant negative (from 15.3 to 21.0 %), decrease of weak negative (from 25.5 to 15.2 %) transformations and slow increase of intensity of significant positive changes (from 3.5 to 14.7 %) were noted for the comparable periods. Significant ($p = 0.95$) positive changes were registered up to 6.0 % (for the period 2000-2009, from 2.4 to 3.1 % for 2009–2016) for the all period of observations at territory of the North Eurasia. Changes in many sites were associated with changes in ecosystem components and were confirmed by the publications and our own field materials.

Keywords: satellite methods of research, MODIS time series, vegetation cover of the North of Eurasia

Accepted: 22.11.2017
DOI:10.21046/2070-7401-2017-14-6-56-72

References

1. Anisimov O. A., Zhil'tsova E. L., Razzhivin V. Yu., Modelirovanie bioproduktivnosti v arkticheskoi zone Rossii s ispol'zovaniem sputnikovykh nablyudenii (Modeling of bioproductivity in the Arctic zone of Russia using satellite observations), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2015, No. 3, pp. 60–70.
2. Astakhov V. I., Svensen I. I., Pokrovnaya formatsiya final'nogo pleistotsena na krainem severo-vostoke evropeiskoi Rossii (The cover formation of the final Pleistocene in the extreme north-east of European Russia), *Regional'naya geologiya i metallogeniya*, 2011, No. 47, pp. 12–27.
3. *Atlas Arktiki* (Atlas of the Arctic), Moscow: Glavnoe upravlenie geodezii i kartografii pri SM SSSR, 1985, pp. 97–98.
4. Bazilevich N. I., *Biologicheskaya produktivnost' ekosistem Severnoi Evrazii* (Biological productivity of Northern Eurasia ecosystems), Moscow: Nauka, 1993, 293 p.
5. Bartalev S. A., Egorov V. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A., Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii po dannym spektroradiometra MODIS (Satellite mapping of Russia vegetative cover according to the MODIS spectroradiometer), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 4, pp. 285–302.
6. Baulin V. V., Danilova N. S., Sukhodol'skaya L. A., Istoriya razvitiya mnogoletnemerzlykh porod na territorii SSSR i metody ee izucheniya (The history of the permafrost development in the USSR and the methods for it studying), In: *Istoriya razvitiya mnogoletnemerzlykh porod Evrazii* (History of permafrost evolution in Eurasia), Moscow: Nauka, 1981, pp. 24–40.
7. Belonovskaya E. A., Tishkov A. A., Vaisfel'd M. A., Glazov P. M., Krenke-ml. A. N., Morozova O. V., Pokrovskaya I. V., Tsarevskaya N. G., Tertitskii G. M., "Pozelenenie" Rossiiskoi Arktiki i sovremennye trendy izmeneniya ee bioty ("Greening" of the Russian Arctic and current trends in the changing of its biota), *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya Geograficheskaya*, 2016, No. 3, pp. 28–39.
8. Borisov A. A., *Klimatografiya Sovetskogo Soyuza* (Climatography of the Soviet Union), Leningrad: Leningradskii universitet, 1970, 310 p.
9. Veremeeva A. A., Glushkova N. V., Formirovanie rel'efa v raionakh rasprostraneniya otlozhenii ledovogo kompleksa v tundrakh kolymskoi nizmennosti (Formation of the relief in the regions of the ice complex deposits distribution in the Kolyma lowland tundra), *Kriosfera Zemli*, 2016, Vol. 20, No. 1, pp. 15–25.
10. Voronin P. Yu., Khlorofil'nyi indeks i fotosinteticheskii stok ugleroda Severnoi Evrazii (Chlorophilic index and photosynthetic carbon sink of Northern Eurasia), *Fiziologiya rastenii*, 2006, Vol. 53, No. 5, pp. 777–785.
11. Elsakov V. V., Vizualizatsiya dannykh klimaticheskikh izmenenii rastitel'nykh soobshchestv Mezenskoi i Kaninskoi tundr po materialam sputnikovykh s"emok (Visualization of climate change data of plant communities of Mezenskaya and Kaninskaya tundra based on satellite imagery), *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2014, No. 1, pp. 83–86.
12. Elsakov V. V., Kulyugina E. E., Rastitel'nyi pokrov Yugorskogo poluostrova v usloviyakh klimaticheskikh izmenenii poslednikh desyatiletii (The vegetation cover of the Jugorskii peninsula in the climatic changes of the last decades), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 3, pp. 65–77.
13. Elsakov V. V., Shchanov V. M., Osobennosti spektral'nykh kharakteristik primorskikh lugov vostochnogo poberezh'ya Malozemel'skoi tundry (Features of the spectral characteristics of the coastal meadows of the eastern coast of the Malozemelskaya tundra), *Bioraznoobrazie nazemnykh i vodnykh ekosistem okhranyaemykh territorii Malozemel'skoi tundry i prilegayushchikh regionov* (Biodiversity of terrestrial and aquatic ecosystems of protected areas of the Malozemelskaya tundra and adjacent regions), Syktyvkar: Komi SC UrD RAS, 2005, No. 178, pp. 5–20.
14. Koroleva T. M., Zverev A. A., Petrovskii V. V., Pospelov I. N., Pospelova E. B., Khitun O. V., Chinenko S. V., Otrazhenie shirotnoi differentsiatsii rastitel'nogo pokrova Krainego Severa v strukture lokal'nykh flor (Reflection of the latitudinal differentiation of the vegetation cover of the Far North in the structure of local floras), *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*, 2014, No. 1, pp. 12–15.
15. Kravtsova V. I., Loshkareva A. R., Dinamika rastitel'nosti ekotona tundra-taiga na Kol'skom poluostrove v svyazi s klimaticheskimi kolebaniyami (Dynamics of vegetation of ecotone of tundra-taiga on the Kola Peninsula in connection with climatic variations), *Ekologiya*, 2013, No. 4, pp. 275–283.
16. Levykin S. V., Yakovlev I. G., Kazachkov G. V., Grudinin D. A., Landshaftnye osobennosti ostrova Novaya Sibir' (Landscape features of the island of New Siberia), *Okhrana okruzhayushchei sredy i prirodopol'zovanie*, 2013, No. 1, pp. 79–83.
17. Magomedova M. A., Morozova L. M., Ektova S. N., Rebristaya O. V., Chernyad'eva I. V., Potemkin A. D., Knyazev M. S., *Poluostrov Yamal: rastitel'nyi pokrov* (The Yamal Peninsula: vegetation cover), Tyumen': Sitipress, 2006, 360 p.
18. Matveeva N. V., Zanokha L. L., Yanchenko Z. A., Biogeotsenologicheskii statsionar "Tareya" — vzglyad iz proshlogo (Biogeocenological field site "Tareya" — a view from the past), *Razvitie geobotaniki: istoriya i*

sovremennost' (The development of geobotany: history and modernity), Proc. Conference of SPb university, SPb., 31 January – 2 February 2011, 2011. pp. 76–77.

19. Matveeva N.V., Zanokha L.L., Yanchenko Z.A., Izmeneniya vo flore sosudistykh rastenii v raione Taimyrskogo biogeotsenologicheskogo statsionara (srednee techenie reki Pyasiny, Zapadnyi Taimyr) s 1970 po 2010 g. (Changes in the flora of vascular plants in the area of the Taimyr biogeocenological site at (middle flow of the Pyasina River, Western Taimyr) from 1970 to 2010), *Botanicheskii zhurnal*, 2014, Vol. 99, No. 8, pp. 841–867.
20. Mikheeva A.I., Issledovanie izmenenii verkhnei granitsy lesa po aerokosmicheskim snimkam (Investigation of changes in the upper forest boundary by aerospace images), *Geodeziya i kartografiya*, 2011, No. 1, pp. 31–36.
21. 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) (The method of subpixel classification of ecotone vegetation "tundra-taiga" from space images (on the example of the valley of the river Tulok, Khibiny mountains)), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 1, pp. 24–34.
22. Oberman N.G., Global'noe poteplenie i izmenenie kriolitozony Pechoro-Ural'skogo regiona (Global warming and change of the permafrost zone of the Pechora-Ural region), *Razvedka i okhrana nedr*, 2007, No. 4, pp. 63–68.
23. Polishchuk Yu.M., Kupriyanov M.A., Bryksina N.A., Distantsionnoe issledovanie dinamiki ploshchadi termokarstovykh ozer v sploshnoi kriolitozone Sibiri (Remote study of the dynamics of the area of thermokarst lakes in the continuous cryolithozone of Siberia), *Geografiya i prirodnye resursy*, 2017, No. 3, pp. 164–170.
24. *Prirodnaya sreda v usloviyakh otkrytoi razrabotki uglya* (*na primere Yun'yaginskogo mestorozhdeniya*) (The natural environment in conditions of open coal mining (on the example of the Yunyaginskoye field)), Syktyvkar, 2005, 246 p.
25. Selyaninov Yu.O., Egorova I.Yu., Kolbasov D.V., Listishenko A.A., Sibirskaya yazva na Yamale: prichiny vozniknoveniya i problemy diagnostiki (Anthrax on Yamal: causes and problems of diagnosis), *Veterinariya*, 2016, No. 10, pp. 3–7.
26. *Fiziko-geograficheskoe raionirovanie SSSR* (kharakteristika regional'nyi edinits) (Physico-geographical zoning of the USSR (characteristics of regional units)), Moscow: MGU, 1968, 575 p.
27. Kharuk V.I., Renson K.Dzh., Im St., Naurzbaev M.M., Listvenichniki lesotundry i klimaticheskie trendy (The larch forest of tundra and climatic trends), *Ekologiya*, 2006, No. 5, pp. 323–331.
28. Khitun O.V., Leibman M.O., Moskalenko N.G., Orekhov P.T., Uolker D.A., Frost D.D., Khomutov A.V., Epshtein Kh.E., Zonal'nye izmeneniya nekotorykh parametrov rastitel'nogo pokrova v zapadnosibirskoi Arktike (Zonal changes in some parameters of the vegetation cover in the West Siberian Arctic), *Otechestvennaya geobotanika: osnovnye vekhi i perspektivy*, St Petersburg, 2011, Vol. 1, pp. 429–432.
29. Shadrin V.I., Korennye narody v usloviyakh izmeneniya klimata (na primere narodov Severa Yakutii) (Indigenous peoples in the context of climate change (on the example of the peoples of the North of Yakutia)), *Voprosy istorii i kul'tury severnykh stran i territorii* (Questions of history and culture of northern countries and territories), Proc. of science conf., 2009, No. 2, Vol. 6, pp. 95–101.
30. 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.
31. Shiyatov S.G., *Dinamika drevesnoi i kustarnikovoi rastitel'nosti v gorakh Polyarnogo Urala pod vliyaniem sovremennykh izmenenii klimata* (Dynamics of tree and shrub vegetation in the mountains of the Polar Urals under the influence of modern climate changes), Ekaterinburg: UrD RAS, 2009, 216 p.
32. Yakubson K.I., Kornienko S.G., Razumov S.O., Dubrovin V.A., Kritsuk L.N., Yastreba N.V., Geoindikatory izmeneniya okruzhayushchei sredy v raionakh intensivnogo osvoeniya neftegazovykh mestorozhdenii i metody ikh otsenki (*Geo-indicators of environmental change in areas of intensive development of oil and gas fields and methods for their assessment*), Electronic scientific journal "Georesursy, geoenergetika, geopolitika", 2012, No. 6(2), 12 p., available at: http://oilgasjournal.ru/vol_6/kornienko.pdf/.
33. Beurs K.M., Henebry G.M., Northern Annular Mode effects on the land surface phenologies of Northern Eurasia, *Journal of Climate*, 2008, Vol. 21, pp. 4257–4279.
34. Beurs K.M., Henebry G.M., A land surface phenology assessment of the northern polar regions using MODIS reflectance time series, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 2010, Vol. 36, pp. 87–110.
35. Bhatt U.S., Walker D.A., Raynolds M.K., Comiso J.C., Howard E., Epstein H.E., Jia G., Gens R., Pinzon J.E., Tucker C.J, Tweedie C.E., Webber P.J., Circumpolar Arctic Tundra Vegetation Change Is Linked to Sea Ice Decline, *Earth Interactions*, 2010, Vol. 14, No. 8, 19 p.
36. Blok D., Schaepman-Strub G., Bartholomeus H., Heijman M., Maximov T., Berendse F., The response of Arctic vegetation to the summer climate: relation between shrub cover, NDVI, surface albedo and temperature, *Environmental Research Letters*, 2011, Vol. 6. DOI:10.1088/1748-9326/6/3/035502.

37. Goetz Sc., Bunn A. G., Fiske G. J., Houghton R. A., Satelite-observed photosynthetic trends across boreal North America associated with climate and fire disturbance, *PNAS* (*Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*), 2005, Vol. 102, No. 38, pp. 13521–13525.
38. Olson D. M., Dinerstein E., Wikramanayake E. D., Burgess N. D., Powell G. V. N., Underwood E. C., D'Amico J., Itoua I., Strand H. E., Morrison J. C., Loucks C. J., Allnutt Th. F., Rickets T. H., Kura Y., Lamoreux J. F., Wettengel W. W., Hedao P., Kassem K. R., Terrestrial Ecoregions of the World: A New Map of Life on Earth, *BioScience*, 2001, Vol. 51, No. 10, 6 p.
39. Raynolds M. K., Walker D. A., Maier H. A., NDVI patterns and phytomass distribution in the circumpolar Arctic, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 102, pp. 271–281.
40. Raynolds M. K., Walker, D. A., Epstein, H. E., Pinzon J. E., Tucker C., A new estimate of tundra-biome phytomass from trans-Arctic field data and AVHRR NDVI, *Remote Sensing Letters*, 2012, Vol. 3, No. 5, pp. 403–411.
41. Robin J., Dubayah R., Sparrow E., Levine E., Monitoring start of season in Alaska with GLOBE, AVHRR, and MODIS data, *Journal of geophysical research. Biogeosciences*, 2007, Vol. 113. DOI:10.1029/2007JG000407.