Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов

Т. Б. Титкова, В. В. Виноградова

Институт географии РАН, Москва 119017, Россия
E-mails: ttitkova@igras.ru, vvvinog@yandex.ru

Рассмотрены тренды климатических характеристик в переходных ландшафтных зонах северных регионов России и дана оценка предпосылок возможных изменений ландшафтов. Для анализа спектральных характеристик поверхности использовались данные MODIS. Климатические условия в переходных ландшафтных зонах оценивались с помощью станционных данных. Определён отклик спектральных характеристик ландшафтов в крупных географических регионах севера России на современные климатические изменения. Согласно спутниковой информации выделены районы максимальных изменений зелёной фитомассы, где наблюдается положительный тренд суммы активных температур и отрицательный тренд осадков. На некоторых участках тундры, лесотундры и северной тайги климатические условия уже соответствуют более южным ландшафтным зонам. Это может привести к смещению границ переходных ландшафтных зон в более высокие широты. Климатические изменения подтверждаются положительными трендами вегетационного индекса за период 2000–2018 гг. в тундровой и лесотундровой зонах на Европейской части России. В Сибири положительные тренды NDVI характерны для ландшафтов лесотундры и северной тайги. Выделены районы переходной лесотундровой зоны с максимальными изменениями спектральных характеристик поверхности: Кольский п-ов, западная часть Большеземельской тундры, Западная и Восточная Сибирь.

Ключевые слова: изменения климата, ландшафтные зоны, MODIS, NDVI, альбедо, температура поверхности

Одобрена к печати: 15.08.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323

Ведение

Растительный покров и климат являются индикаторами природных экосистем. Растительность ландшафтов, в свою очередь, влияет на климатическую обстановку. Но всё же климат является первичным фактором, а его параметры и динамика в значительной степени определяют тип растительности в местностях, не подверженных интенсивному антропогенному воздействию.

Переходные природные зоны представляют собой открытую систему для воздействия климатических изменений и достаточно быстро реагируют на климатические флуктуации. Особенно это характерно для северных ландшафтов.

Глобальное потепление проявляется наиболее сильно в северных широтах России. Рост температуры в криолитозоне России почти вдвое превышает средний по планете, достигая 1,6 °C/10 лет. Атмосферные осадки на территории России демонстрируют изменения разной направленности в зависимости от региона и сезона с преобладанием тенденций к увеличению, в особенности весной и осенью (Доклад..., 2015). Под воздействием продолжающихся климатических изменений возможно сокращение до 10 % площади растительности тундры (Голубятников, Денисенко, 2007).

Продуктивность, биомасса и границы распространения растительности меняются в соответствии с динамикой теплообеспеченности и увлажнения. Последствием глобального потепления может быть смещение границы лесной зоны на север, а в горах — верхней границы леса в альпийский пояс (Кислов и др., 2008; Karger et al., 2018). Результаты прогнозирования и моделирования показывают рост температур, который подкрепляется расчётами роста биопродуктивности по данным спутниковых измерений разных лет (Yu et al., 2017). Увеличение

продолжительности безморозного осеннего периода способствует распространению видов, ранее не встречавшихся на данной местности, таких как полярные маки, крестовники, колокольчиковые и сложноцветные, которые могут менять спектральные характеристики поверхности (Кокорин и др., 2018). Также в литературе отмечается, что изменение температуры поверхности во время пика вегетационного периода оказывает влияние на рост продуктивности растительности (Xu et al., 2013).

При «миграции» растений на Север возникает повышенная конкуренция за участки произрастания. Особенно ярко этот процесс выражен на границе тундры и лесотундры, а также на границе южных и типичных тундр: там, где сформировались устойчивые сообщества с высоким проективным покрытием растительности. Вследствие этого следует ожидать появления видов-мигрантов лишь на участках с низким проективным покрытием коренной растительности или на нарушенных территориях. Как правило, на таких нестабильных местообитаниях предпочитают развиваться виды-ценофобы, слабо зависящие от окружающего их растительного сообщества (Кокорин и др., 2018).

Предположения о положительной динамике биомассы тундровой растительности, оценённой по нормализованному разностному вегетационному индексу NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), имеют много ограничений. К их числу следует отнести отсутствие учёта фенологической специфики при сравнении данных NDVI разных лет (Arctic..., 2017). Отмечается, что сокращение площади тундры и лесотундры может привести к уменьшению альбедо северных территорий, что, в свою очередь, вызовет дополнительное потепление в этом регионе (Сергиенко, 2015). Оценка отклика растительности на изменение климатических условий по спутниковым данным показывает, что увеличение вегетационного индекса в тундре может сопровождаться разнонаправленными трендами альбедо на соседних участках (Титкова, Виноградова, 2015).

В настоящей работе оцениваются изменения климатических характеристик ареалов природных экосистем севера России, произошедших в результате интенсивного глобального потепления, которые могут создать предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах. Также исследуется их проявление в изменениях спектральных характеристик переходных ландшафтных зон. Выделяются регионы севера России с максимальными изменениями спектральных характеристик поверхности.

Данные и методика исследования

Исследования проводились на субарктических (тундровых и лесотундровых) и бореальных (северотаёжных) ландшафтах на территории России севернее 65° с. ш., представленных зонами тундры, лесотундры, северной тайги. Привлечение станционных метеорологических данных позволило провести анализ климатических изменений, а система дистанционного мониторинга дала возможность оценивать тренды изменения спектральных характеристик подстилающей поверхности.

Таблица 1. Климатические характеристики ареалов природных экосистем севера России по (Базилевич и др., 1986)

Параметры	Тундры		Лесотундры		Северотаёжные леса	
	равнинные	горные	с берёзой извилистой	с елью сибирской	из ели обыкновенной	из ели сибирской
T, июль, °C	8,2–12	8–10	10,8–12,5	12,3–13,3	11,3–15,3	12,6–15,6
$\Sigma T_{10°}$	182–637	200–250	526–765	580–843	643–1228	795–1284
ΣP, мм	531–782	531–1342	557–700	528–642	564–656	570–707
$K_{увл}$	1,4–1,94	4	1,07–1,32	1,01–1,38	1,01–1,39	0,945–1,28

Климатические условия в значительной степени определяют характер растительного покрова. В работе (Базилевич и др., 1986) были проанализированы связи экосистем с климатическими условиями (до начала интенсивного потепления) и даны диапазоны изменений климатических параметров для различных ландшафтов (*табл. 1*).

Для количественной оценки климатических характеристик экосистем использованы данные по 169 метеостанциям на территории России, расположенным севернее 65° с. ш., из архива Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (http://meteo.ru/) за период 2000–2017 гг. Для каждой станции были проведены расчёты средней температуры самого тёплого месяца (июля), суммы активных температур выше 10 °C, годовых сумм осадков, коэффициента увлажнения. Коэффициент увлажнения — это отношение годового количества осадков к годовой величине испаряемости для данного ландшафта, является основным показателем соотношения тепла и влаги. Коэффициент увлажнения показывает, насколько велико количество осадков, выпадающих в течение периода в рассматриваемом регионе, что, в свою очередь, является одним из основных факторов, определяющих преобладающий тип растительности в этой местности. В работе используется общепринятый коэффициент увлажнения Иванова – Мезенцева (Иванов, 1954; Мезенцев, 1973), который рассчитывается по формуле: $K_{увл} = P/E$, где P — годовое количество осадков; E — испаряемость за год. В. С. Мезенцев предложил рассчитывать испаряемость за год (E) через сумму активных температур выше 10 °C: $0{,}2\times\Sigma T_{10°}$. Таким образом, коэффициент увлажнения вычислялся по формуле:

$$K_{увл} = \frac{\sum P}{0{,}2\times\sum T_{10\,°C} + 306},$$

где 306 — коэффициент, учитывающий в общей формуле сток. Значения $K_{увл} > 1$ характеризуют зоны избыточного увлажнения, $K_{увл} < 1$ — недостаточного, $K_{увл} \approx 1$ — оптимального.

Для оценки изменений спектральных характеристик ландшафтов севера России использованы спутниковые данные спектрорадиометра MODIS (https://lpdaac.usgs.gov/product_search/?query=MOD11C3&view=list): вегетационный индекс (NDVI, Normalized Difference Vegetation Index), альбедо поверхности (*Al*) и температуры поверхности (*Ts*).

Для анализа NDVI была выбрана модель MOD13C2 версии 6 среднемесячных значений с разрешением CMG 0,05×0,05° в сетке моделирования (CMG) (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/). При создании этого ежемесячного продукта алгоритм принимает все продукты MOD13A2, которые перекрывают месяц, и использует средневзвешенное временное значение. Глобальные данные MOD13C1 представляют собой безоблачные пространственные композиты.

Альбедо поверхности представлено моделью MCD43C1, версия 6 (https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd43c1v006/). Функция двунаправленного распределения отражения и набор параметров модели Albedo (BRDF / Albedo) производятся ежедневно с использованием 16-дневных данных Terra и Aqua MODIS в CMG с разрешением 0,05×0,05°. Данные альбедо использовались для середины месяца с 7 по 25 июля.

Продукт MOD11C3 версии 6 (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c3v006/) обеспечивает ежедневные значения температуры поверхности Земли и коэффициента излучения (LST & E) с разрешением 0,05×0,05° в сетке моделирования (CMG). Значения LST & E в продукте MOD11C3 получены путём составления и усреднения значений из соответствующего месяца ежедневных файлов MOD11C1.

Интенсивность изменений спектральных характеристик поверхности оценивалась для июля, как месяца максимального развития растительного покрова, по коэффициенту линейного тренда со скоростью изменений в среднем за 10 лет. Для оценки статистической значимости тренда (уровень 90 %) использовался критерий Стьюдента.

Обработка массивов спутниковой информации о подстилающей поверхности, а также картографическое отображение результатов проводились в пакете анализа MatLab, для чего были созданы соответствующие программы.

Анализ результатов

Климатические предпосылки возможных изменений в переходных ландшафтных зонах

Глобальные колебания климата, возможно, будут приводить к изменениям ландшафтов, соответствующим новым условиям. Улучшение климатических условий севера может повлечь смещение границ ландшафтов в отдельных регионах в более высокие широты.

В *табл. 2* для крупных природно-географических районов севера России представлены значения климатических параметров за 2000–2017 гг. в ландшафтных зонах, выделенных А. Г. Исаченко до начала интенсивного потепления (Ландшафтная..., 1988). Средние значения температуры июля в тундре (см. *табл. 2*) по всему северу России входят в интервал июльских температур, определённых до начала потепления (см. *табл. 1*). В лесотундровой зоне июльские температуры превышают определённые ранее значения практически по всей протяжённости. В ландшафтах северной тайги превышение среднеиюльских температур не наблюдается только для Кольского полуострова и самой Восточной части России. Сумма активных температур в тундре — в пределах ранее определённых значений, а в лесотундре и северной тайге — выше с учётом стандартного отклонения, кроме восточной части России. Годовая сумма осадков для северных ландшафтов тундры, лесотундры и северной тайги в целом на уровне нижней границы или ниже раннее определённых значений. Уменьшение суммы осадков и повышение суммы активных температур в ходе глобального потепления привело к снижению коэффициента увлажнения на севере России.

Таблица 2. Средние климатические параметры и их стандартное отклонение для ландшафтных зон севера России за период 2000–2017 гг.

Часть России	Ландшафтная зона	T, июль, °C	$\Sigma T_{10°}$	ΣP, мм	$K_{увл}$	Число станций
Кольский п-ов	тундра	10,9±1,2	567±192	410±103	0,97±0,18	4
	лесотундра	13,2±0,5	902±78	530±30	1,09±0,08	3
	северная тайга	14,7±0,5	1094±103	570±30	1,09±0,04	4
Европейская часть до 50° в. д.	тундра	9,3±0,6	345±95	338±70	0,9±0,14	3
	лесотундра	12,1±0,38	646±71	397±31	0,9±0,04	3
	северная тайга	15±1,2	1190±206	486±130	0,9±0,19	5
Большеземельская тундра и Пай-Хой	тундра	6,9±3,9	340±170	300±107	1,00±0,18	5
	лесотундра	14,2±0,5	909±71	532±59	1,10±0,12	4
	северная тайга	15,8±0,4	1209±92	582±47	1,10±0,05	4
Западная Сибирь до 80° в. д.	тундра	6,8±4,4	268±200	264±79	0,8±0,3	5
	лесотундра	14,3±1,1	894±177	410±138	0,8±0,25	4
	северная тайга	16,4±0,6	1267±78	556±10	0,99±0,01	2
Средняя Сибирь с Таймыром	тундра	4,5±5,2	221±301	182±27	0,50±0,14	4
	лесотундра	13,8±0,5	793±113	379±86	0,80±0,15	4
	северная тайга	15,6±0,7	1079±138	389±153	0,70±0,30	7
Восточная Сибирь	тундра	5,8±3,7	200±150	230±120	0,70±0,30	2
	лесотундра	12±0,9	633±112	272±70	0,60±0,13	4
	северная тайга	16±0,6	1168±114	281±75	0,50±0,10	7
Восточная часть	тундра	7,3±3,2	284±264	235±133	0,60±0,33	9
	лесотундра	14,3±0,7	936±154	190±62	0,40±0,10	2
	северная тайга	15,1±0,3	1054±30	263±9	0,50±0,01	3

Рассмотрим изменения климатических параметров после интенсивного потепления 1980–1990-х гг. за период 2000–2017 гг. в обозначенных ландшафтных зонах севера России и их региональные отличия. Июльские температуры понижаются на всём Европейском севере и в зонах лесотундры и северной тайги востока России (*табл. 3*). На остальной территории они в основном растут. Тренды суммы активных температур выше 10 °С за 2000–2017 гг. в ландшафтных зонах северных регионов России положительны повсеместно, кроме тундры Таймыра и лесотундры Средней Сибири и Дальнего Востока. Отрицательный тренд осадков в зоне тундры и лесотундры наблюдается в большинстве районах, кроме Кольского полуострова. Это приводит к отрицательным трендам коэффициента увлажнения, что благоприятно влияет на растительность в зоне избыточного увлажнения, к которой относятся субарктические и бореальные ландшафты.

Таблица 3. Тренды климатических параметров за 10 лет и их стандартное отклонение для ландшафтных зон севера России за период 2000–2017 гг.

Часть России	Ландшафтная зона	T, июль, °С	$\Sigma T_{10°}$	ΣP, мм	$K_{увл}$
Кольский п-ов	тундра	–0,4±0,2	33±20	38±16	0,08±0,02
	лесотундра	–0,7±0,1	39±20	45±6	0,08±0,001
	северная тайга	–0,65±0,7	36±10	28±14	0,09±0,05
Европейская часть до 50° в. д.	тундра	–0,6±0,3	145±40	–150±20	–0,41±0,07
	лесотундра	–0,4±0,3	66±26	–38±15	–0,10±0,05
	северная тайга	–0,8±0,3	13±10	42±30	0,09±0,05
Большеземельская тундра и Пай-Хой	тундра	0,8±0,2	112±23	–27±10	–0,07±0,02
	лесотундра	0,5±0,2	50±20	–87±40	–0,22±0,10
	северная тайга	–0,4±0,2	60±18	–11±8	–0,04±0,01
Западная Сибирь до 80° в. д.	тундра	1,7±0,7	114±60	–15±12	–0,11±0,1
	лесотундра	1,0±0,4	42±30	–9±5	–0,17±0,14
	северная тайга	1,2±0,3	20±12	–40±12	–0,06±0,03
Средняя Сибирь с Таймыром	тундра	0,2±0,07	–15±10	34±14	0,02±0,005
	лесотундра	0,6±0,4	–12±10	–22±17	0,04±0,07
	северная тайга	0,8±0,5	23±16	–21±19	0,04±0,03
Восточная Сибирь	тундра	0,2±0	26±14	–24±19	–0,08±0,04
	лесотундра	–1±0,5	18±13	–13±30	–0,05±0,02
	северная тайга	–1,1±0,5	10±8	6±5	–0,2±0,03
Восточная часть	тундра	0,2±0,3	–112±52	–4±10	–0,05±0,1
	лесотундра	–1,1±0,3	6±10	–9±7	–1,00±0,04
	северная тайга	1,4±0,5	–34±30	12±10	–1,00±0,2

Тренды климатических характеристик природных экосистем за 2000–2017 гг. создают предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах севера России. Результаты расчётов показали, что современные климатические условия в районе некоторых метеостанций тундровой зоны (Ландшафтная..., 1988) соответствуют условиям лесотундровой зоны (*рис. 1*, см. с. 315). Это характерно для метеостанций Европейской части и Западной Сибири, находящихся вблизи границы тундры и лесотундры. На части территорий, где климатические условия соответствовали параметрам лесотундры, в современную эпоху наблюдаются условия, характерные для ландшафтов северной тайги. Эти изменения затронули большинство метеостанций, расположенных в лесотундровой зоне севера России, и были обусловлены положительными трендами суммы активных температур выше +10 °С и отрицательными трендами осадков (см. *табл. 2*, *3*).

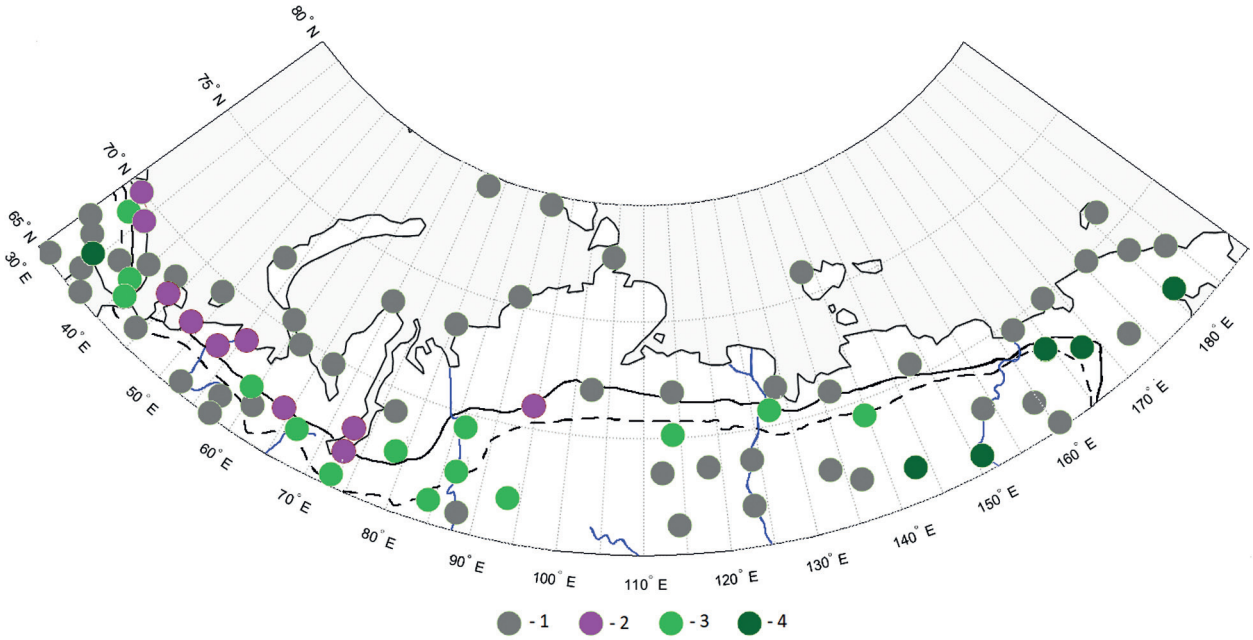


Рис. 1. Климатические предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах севера России: 1 — климатические условия соответствуют ландшафтной зоне; 2 — переход ландшафтов тундры в лесотундровую зону; 3 — переход ландшафтов лесотундры в зону северной тайги; 4 — переход ландшафтов северной тайги в зону средней тайги. Границы ландшафтных зон выделены по А. Г. Исаченко (1988): сплошная линия — граница тундры и лесотундры, пунктирная — граница лесотундры и северной тайги

Климатические предпосылки перехода ландшафтов северной тайги в среднюю тайгу наблюдаются в основном в Восточней Сибири. Изменения здесь происходят на фоне положительных трендов осадков.

Таким образом, современные климатические условия создают предпосылки возможных изменений ландшафтных зон. Они наблюдаются на большей части переходной лесотундровой зоны и прилегающих территориях тундры и северной тайги.

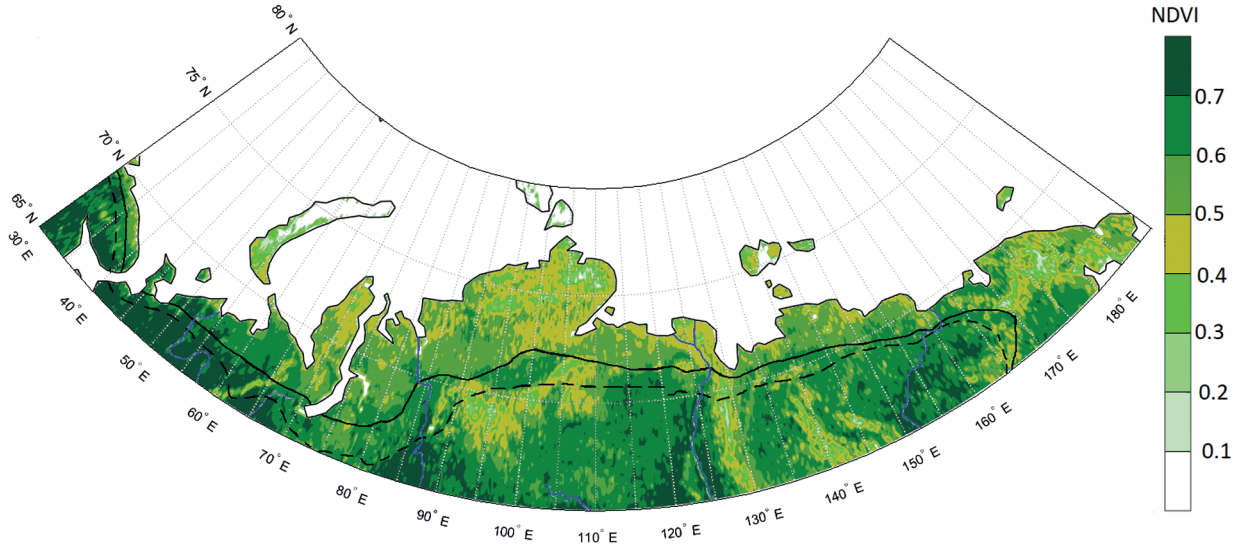
Изменение спектральных характеристик северных ландшафтов

Рассмотрим реакцию спектральных характеристик поверхности экосистем севера России на произошедшие изменения климатических условий. Изменения климата предопределяют сложную и неоднозначную реакцию на них наземной растительности. Вегетационный индекс NDVI имеет тесную корреляцию с запасом зелёной фитомассы. При этом необходимо иметь в виду, что на одни и те же изменения климата различные элементы ландшафтов отзываются по-разному. Реакция может различаться как в качественном, так и в количественном отношении, что привносит неопределённость в изменения альбедо (*Al*) и температуры поверхности (*Ts*). Изменение спектральных характеристик поверхности в переходных ландшафтных зонах может говорить о возможности появления новых видов растений, ранее не встречавшихся на данной территории, новые биомы которых отличаются оптическими свойствами (Второй..., 2014; Замолодчиков, 2011).

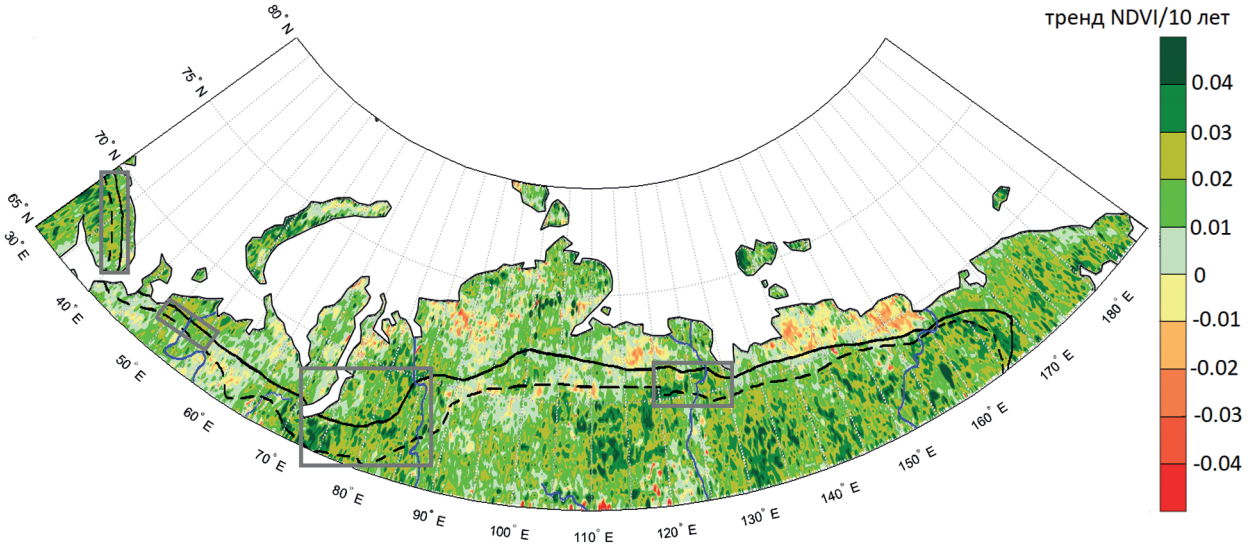
Анализ средних величин NDVI июля, рассчитанных для периода 2000–2002 гг., максимально приближённого к времени составления ландшафтной карты СССР (*рис. 2а*, см. с. 316), показал, что распределение индекса на территории имеет региональные особенности. Границы ландшафтно-геоботанического районирования (Ландшафтная..., 1988) лучше всего приближены к смене градаций NDVI на Европейской части России и в Западной

Сибири. Средние величины NDVI в июле для северных районов России изменяются в широких пределах от 0,1 в заснеженных областях до 0,7 в лесах северной тайги.

Откликом на улучшение климатических условий севера Европейской части России (30–60° в. д.) является значимый положительный тренд NDVI (до 0,04/10 лет) в ландшафтных зонах тундры, лесотундры и северной тайги на большей части полуостровов Кольского и Канина и в Большеземельской тундре (*рис. 2б*). При этом значимых трендов альбедо здесь практически не наблюдается (*рис. 3б*, см. с. 317). Тренд температуры поверхности *Ts* на севере Европейской части в июле положителен в основном на Кольском полуострове (до 0,02 °C/10 лет) и практически не выражен на остальной территории (см. *рис. 3б*). На Кольском полуострове и на Европейском севере значимые положительные изменения NDVI затронули большую часть всех ландшафтных зон (*табл. 4*). Значимое отрицательное уменьшение NDVI занимает не больше 1–3 % площади всех ландшафтов. В районе Большеземельской тундры и Пай-Хойе значимое увеличение площади NDVI занимает менее 50 % при максимальном увеличении в зоне тундры (49 % площади).

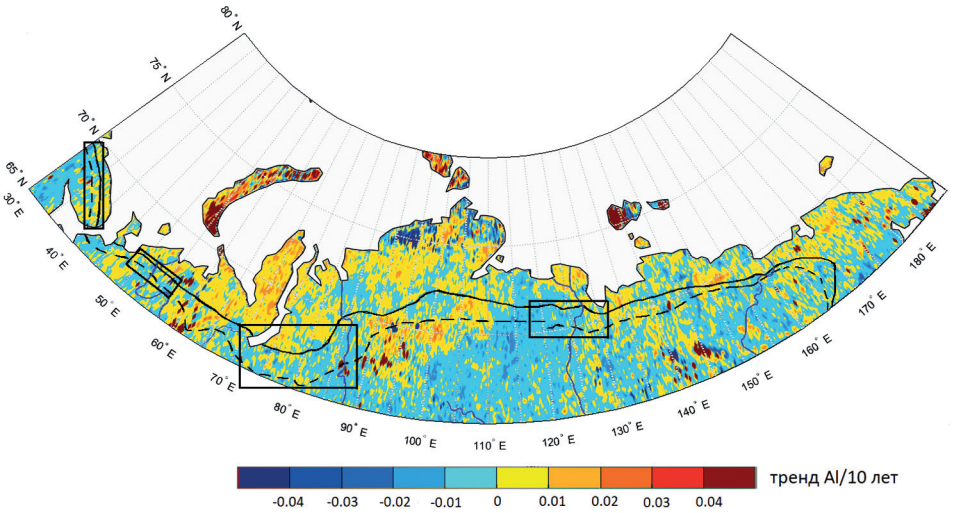


а

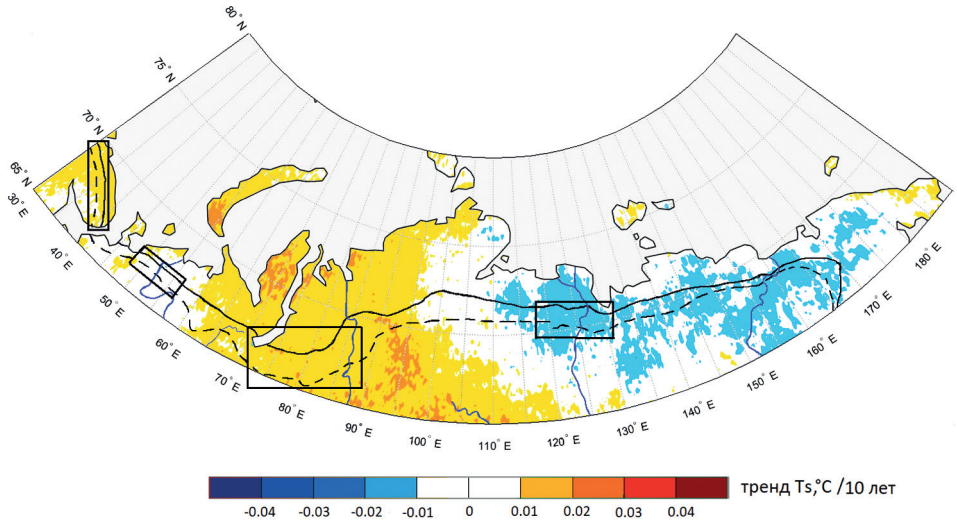


б

Рис. 2. Вегетационный индекс NDVI, июль 2000–2018 гг.: *а* — среднее значение; *б* — тренд за 10 лет, значимые изменения больше/меньше ±0,01. Прямоугольники — схематично выделенные районы лесотундры с максимальным трендом NDVI



а



б

Рис. 3. Тренд за 10 лет спектральных характеристик за июль 2000–2018 гг. (значимы при значениях больше/меньше ±0,01): *а* — альбедо *Al*; *б* — температура поверхности *Ts*. Прямоугольники — схематично выделенные районы лесотундры с максимальным трендом NDVI

Таблица 4. Значимые изменения NDVI (в процентах от площади всей зоны) для ландшафтных зон севера России за июль 2000–2018 гг.

Ландшафтная зона	Тундра		Лесотундра		Северная тайга	
Знак тренда	+	–	+	–	+	–
Кольский п-ов	77	2	**87**	0	65	1
Европейская часть до 50° в. д.	**83**	3	65	1	47	2
Большеземельская тундра и Пай-Хой	**49**	6	42	6	37	8
Западная Сибирь до 80° в. д.	42	11	**84**	2	82	4
Средняя Сибирь с Таймыром	54	14	**82**	2	75	1
Восточная Сибирь	32	18	68	2	**80**	2
Восточная часть	64	8	79	3	**85**	2
Вся Россия	48	12	66	3	**71**	3

Примечание: полужирным начертанием выделены максимальные изменения.

В Западной Сибири в зоне тундры увеличение NDVI (до 0,03/10 лет) произошло в основном на границе с лесотундрой при слабом положительном тренде альбедо (до ±0,01/10 лет) и положительном тренде *Ts* (до 0,02 °C/10 лет). В тундровой зоне полуострова Ямал небольшое увеличение NDVI ((0,01–0,02)/10 лет) сопровождается значимым увеличением альбедо больше 0,01/10 лет и максимальным трендом *Ts* до 0,3 °C/10 лет. Уменьшение NDVI на (0,01–0,02)/10 лет и *Al* на (0,01–0,02)/10 лет наблюдается в зоне тундры на Гыданском полуострове. Для Западной Сибири значительное улучшение климата характерно для лесотундровой зоны, что нашло отражение в максимальном увеличении площади значимых изменений NDVI (84 % площади зоны) (см. *табл. 4*), чуть меньшие изменения наблюдаются в северной тайге (82 %). Альбедо поверхности в этих районах в основном уменьшается, а температура поверхности растёт.

В тундре и лесотундре Средней Сибири увеличение NDVI до 0,04/10 лет сопровождается разнонаправленным изменением альбедо поверхности на ±(0,01–0,02)/10 лет. Изменения затронули более 50 % площади этих ландшафтных зон. Наибольшие положительные изменения NDVI произошли в лесотундре (значимые изменения около 80 % площади). Продуктивность растительности в северной тайге Средней Сибири увеличивается. Здесь рост NDVI до 0,04/10 лет сопровождается уменьшением альбедо до 0,02/10 лет и ростом температуры поверхности до 0,03 °C/10 лет.

В тундре Восточной Сибири наблюдаются разнонаправленные изменения NDVI и альбедо. Значимые изменения NDVI занимают около 30 % территории. Увеличение вегетационного индекса до 0,03/10 лет происходит в районе устья р. Лены, а уменьшение — на Яно-Индигирской низменности: до –0,02/10 лет. В Восточной Сибири климатические условия создают предпосылки продвижения ландшафтов северной тайги на территорию лесотундровой зоны. Здесь максимальное значимое увеличение NDVI отмечается в лесотундровой зоне и в зоне северной тайги и затрагивает до 80 % территории ландшафтных зон, в основном при отрицательном тренде альбедо до –0,03/10 лет, что может происходить при увеличении лесистости (Раунер, 1972), и отрицательном тренде температуры поверхности (до –0,02 °C/10 лет).

На севере Дальнего Востока климатические условия способствуют переходу ландшафтов северной тайги в зону средней тайги, что проявляется в увеличении NDVI до 0,04/10 лет. Альбедо здесь в основном растёт до 0,03/10 лет, а температура поверхности снижается до –0,02 °C/10 лет во внутренних районах и растёт до 0,02 °C/10 лет на открытых участках прибрежной зоны.

В целом для севера России для периода 2000–2018 гг. характерны положительные тренды вегетационного индекса. Максимальный рост NDVI в зоне тундры отмечается на европейской части России. Значимый рост NDVI наблюдается во всей лесотундре. Наибольшее увеличение NDVI происходит в зоне северной тайги и затрагивает почти всю Сибирь. Альбедо поверхности в основном растёт в тундровой зоне и падает в лесотундре и северной тайге. Тренд температуры поверхности положителен западней 90° с. ш. и отрицателен в восточной части севера России.

Регионы максимальных изменений NDVI в лесотундровой зоне

Наибольшие (более 60 % площади) значимые положительные изменения NDVI в лесотундровой зоне затронули четыре больших района. Это Кольский полуостров и западная часть Большеземельской тундры, Западная и Восточная Сибирь (нижнее течение р. Лены). Подробнее остановимся на изменениях спектральных характеристик в этих регионах и процессах, их обусловивших. В рассматриваемых районах лесотундры наблюдается значительный рост суммы активных температур и отрицательный тренд годовой суммы осадков и коэффициента увлажнения.

По литературным данным, состояние растительности экотона «тундра – тайга» на Кольском полуострове характеризуется увеличением сомкнутости редколесий, ростом проективного

покрытия кустарников в тундре и лесотундре, её продвижением в лишайниковую тундру и зарастанием болот древесно-кустарниковыми породами (Kravtsova, Loshkareva, 2013). Данные изменения растительности лесотундры сопровождаются ростом NDVI до 0,04/10 лет, слабыми отрицательными трендами альбедо (до –0,01/10 лет) и положительными трендами температуры поверхности (до 0,02 °C/10 лет) за счёт увеличения прогрева поверхности на фоне роста температуры воздуха (см. *рис. 3а*, *б*, *4а*). Связь между трендами NDVI и *Al* — слабоотрицательная, а между NDVI и *Ts* — слабоположительная (*рис. 5а*, см. с. 320).

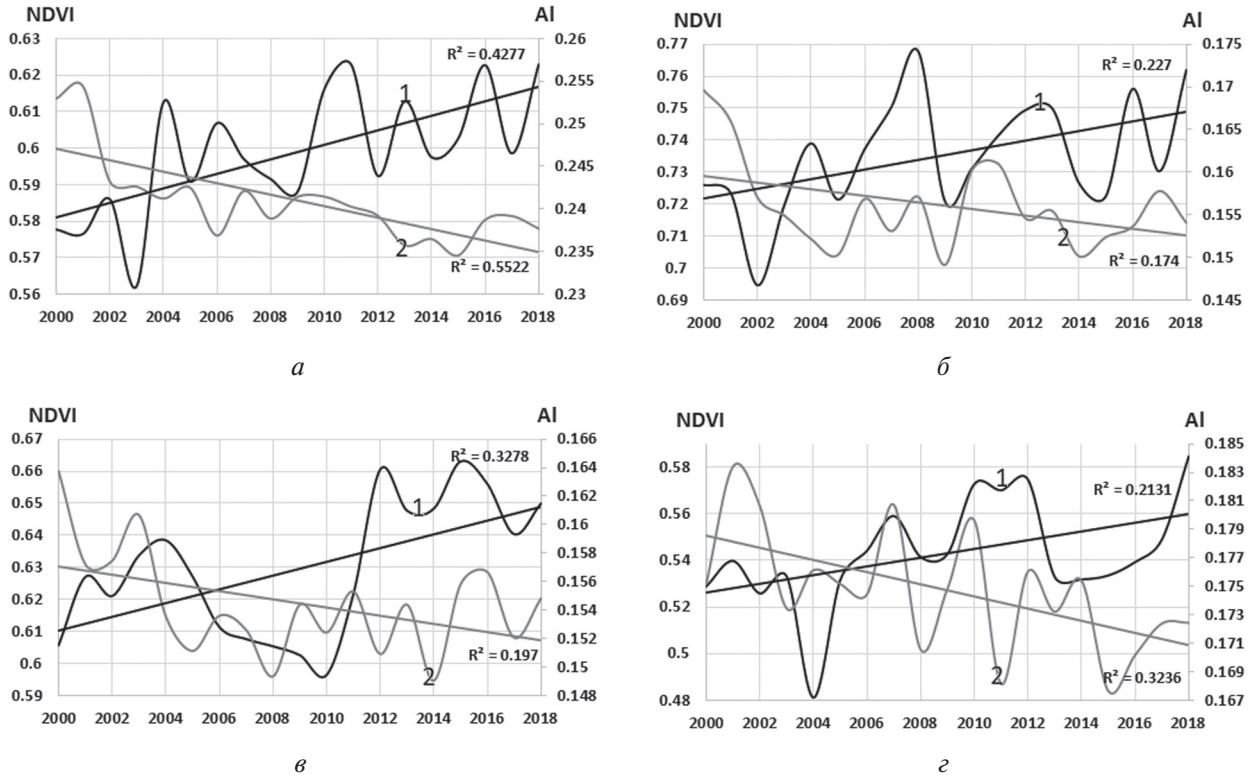


Рис. 4. Изменение спектральных характеристик в выделенных районах лесотундры (см. *рис. 2б*, *3а*, *б*) с линейными трендами в июле 2000–2018 гг.: *а* — лесотундра Кольского полуострова; *б* — лесотундра западной части Большеземельской тундры; *в* — лесотундра Западной Сибири; *г* — лесотундра Восточной Сибири. На графиках: 1 — NDVI, 2 — *Al*

В районе р. Печора и в западной части Большеземельской тундры реакция растительного покрова на климатические изменения проявляется в увеличении высоты кустарников в ряде изолированных лесных островов и в появлении на месте моховых тундр густых ерниковых зарослей (Русанова, 2006). Наблюдаемый рост NDVI ((0,01–0,03)/10 лет) на большей части территории сопровождается отрицательной динамикой альбедо (в среднем –0,01/10 лет) и отсутствием динамики температуры поверхности (см. *рис. 4б*, *3а*, *б*). При этом устойчивая связь между трендами NDVI, *Al* и *Ts* отсутствует (*рис. 5б*).

Лесотундра Западной Сибири отличается сильной заболоченностью. Встречаются лиственничные редколесья. В составе древесных пород преобладает ель европейская, ель сибирская, кустарниковый ярус сложен берёзой карликовой. По оценкам, полученным в работе (Замолодчиков, 2011), в этом районе при положительной динамике теплообеспеченности произошло увеличение количества карликовой берёзы больше чем на 25 %. Активное зарастание лесотундры Западной Сибири проявляется в росте NDVI до максимальных значений 0,04/10 лет. Устойчивая связь между изменениями NDVI и *Al* отсутствует. При этом между трендами NDVI и *Ts* наблюдается слабая обратная связь (*рис. 5в*).

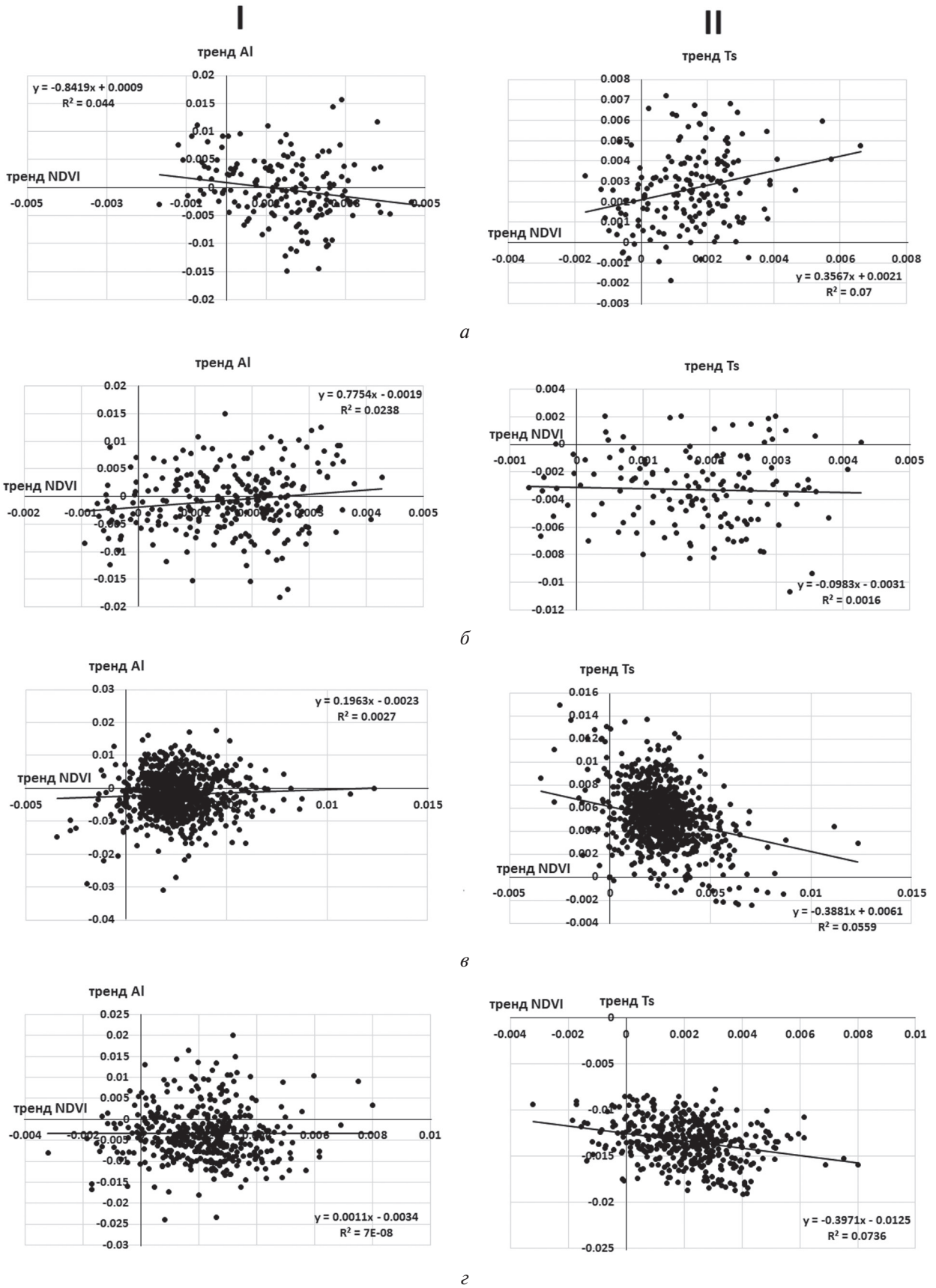


Рис. 5. Зависимости трендов спектральных характеристик поверхности NDVI и *Al* (I), NDVI и *Ts* (II) в лесотундровой ландшафтной зоне в выделенных районах (см. *рис. 2б*, *3а*, *б*): *а* — Кольского полуострова; *б* — западной части Большеземельской тундры; *в* — Западной Сибири; *г* — Восточной Сибири

Ещё одна область интенсивного роста фитомассы в лесотундровой зоне отмечена в Восточной Сибири в нижнем течении р. Лены. Лесотундра Восточной Сибири представляет собой сложную мозаику урочищ кустарниковой тундры, заболоченных водоразделов, крупнобугристых торфяников в понижениях и лиственничного или елово-лиственничного редколесья. Особенность изменений спектральных характеристик этого района состоит в том, что здесь на фоне роста NDVI (до 0,04/10 лет) и уменьшения альбедо (до 0,02/10 лет) наблюдается отрицательный тренд температуры поверхности (до –0,02 °C/10 лет). Связь между трендами NDVI и *Al* не проявляется. Между трендами NDVI и *Ts* выявляется слабая обратная связь (*рис. 5г*).

Выводы

В лесотундровой зоне Севера России наблюдается положительный тренд суммы активных температур и отрицательный тренд осадков. Коэффициент увлажнения этой зоны в целом уменьшается. Климатические условия на ряде участков тундры, лесотундры и северной тайги изменяются и теперь соответствуют более южным ландшафтным зонам, что создаёт благоприятные условия для изменения растительности и может привести к смещению границ переходных ландшафтных зон в более высокие широты.

Климатические изменения привели к значимым положительным трендам вегетационного индекса в период 2000–2018 гг. на больше части севера России. На Европейской части России эти изменения затронули тундровую и лесотундровую зону. В Сибири и на Дальнем Востоке положительные тренды NDVI характерны для ландшафтов лесотундры и северной тайги.

В переходной зоне лесотундры выделяются четыре района с наибольшими значимыми положительными изменениями NDVI. Это Кольский полуостров, западная часть Большеземельской тундры, Западная и Восточная Сибирь.

В целом на больших масштабах устойчивая связь трендов вегетационного индекса и альбедо отсутствует. Рост NDVI может сопровождаться как отрицательным трендом *Al*, так и положительным. Связь изменений NDVI и *Ts* зависит от типа растительности и состояния мерзлотных почв.

Таким образом, использование спутниковой информации подтверждает выводы, полученные на основании климатических данных, о возможности перехода некоторых северных территорий в другую ландшафтную зону и создании предпосылок для смешения к северу границ переходных ландшафтов.

Статья подготовлена по материалам исследований по гранту Российского научного фонда № 16-17-10236-П. Синтез материалов для *табл. 2*, *3* проводился в рамках темы Государственного задания № 0148-2019-0009.

Литература

1. *Базилевич Н. И.*, *Гребенщиков О. С.*, *Тишков А. А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем / ред. Исаков Ю. А. М.: Наука, 1986. 297 с.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет. 2014. 1009 с.
3. *Голубятников Л. Л.*, *Денисенко Е. А.* Модельные оценки влияния изменений климата на ареалы зональной растительности равнинных территорий России // Изв. РАН. Серия биологическая. 2007. № 2. С. 212–228.
4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. М.: Росгидромет, 2015. 107 с.
5. *Замолодчиков Д. Г.* Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учета лесного фонда // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 382–392.
6. *Иванов Н. Н.* Об определении величин испаряемости // Изв. Всесоюзного геогр. об-ва. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.

7. *Кислов А. В.*, *Евстигнеев В. М.*, *Малхазова С. М.*, *Соколихина Н. Н.*, *Суркова Г. В.*, *Торопов П. А.*, *Чернышев А. В.*, *Чумаченко А. Н.* Прогноз климатической ресурсообеспеченности Восточно-Европейской равнины в условиях потепления XXI века. М.: МАКС Пресс, 2008. 292 с.
8. *Кокорин А. О.*, *Добрынин Д. В.*, *Сухова О. В.* Для понимания климатической динамики и адаптации системы охраны природы требуются детальные данные и прогнозы // Арктические ведомости. 2018. № 2(25). С. 96–105.
9. Ландшафтная карта СССР / ред. А. Г. Исаченко. М., 1988. Масштаб 1:4 000 000.
10. *Мезенцев В. С.* Водный баланс. Новосибирск, 1973. 229 с.
11. *Раунер Ю. Л.* Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1972. 210 с.
12. *Русанова Г. В.* Почвы реликтовых островков ели на северо-западе Большеземельской тундры // Лесоведение. 2006. № 2. С. 21–25.
13. *Сергиенко В. Г.* Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата // Тр. Санкт-Петербургского НИИ лесного хоз-ва. 2015. № 1. С. 5–19.
14. *Титкова Т. Б.*, *Виноградова В. В.* Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
15. Arctic Report Cards / eds. Richter-Mange J., Overland J. E., Mathis J. T., Osborne E. 2017. 96 p. URL: http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card.
16. *Karger D. N.*, *Kessler M.*, *Conrad O.*, *Weigelt P.*, *Kreft H.*, *König C.*, *Zimmermann N. E.* Why tree lines are lower on islands — Climatic and biogeographic effects hold the answer // Global Ecology and Biogeography. 2018. P. 1–12. DOI: 10.1111/geb.12897.
17. *Kravtsova V. I.*, *Loshkareva A. R.* Dynamics of vegetation in the tundra-taiga ecotone on the Kola Peninsula depending on climate fluctuations // Russian J. Ecology. 2013. No. 4. P. 303–311. DOI: 10.1134/S1067413613040085.
18. *Xu L.*, *Myneni R. B.*, *Chapin III F. S.*, *Callaghan T. V.*, *Pinzon J. E.*, *Tucker C. J.*, *Zhu Z.*, *Bi J.*, *Ciais P.*, *Tømmervik H.*, *Euskirchen E. S.*, *Forbes B. C.*, *Piao S. L.*, *Anderson B. T.*, *Ganguly S.*, *Nemani R. R.*, *Goetz S. J.*, *Beck P. S.A.*, *Bunn A. G.*, *Cao C.*, *Stroeve J. C.* Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands // Nature Climate Change. 2013. P 1–6. DOI: 10.1038/NCLIMATE1836.
19. *Yu Q.*, *Epstein H.*, *Engstrom R.*, *Walker D.* Circumpolar arctic tundra biomass and productivity dynamics in response to projected climate change and herbivory // Global Change Biology. 2017. V. 23. P. 3895–3907. DOI: 10.1111/gcb.13632.

Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics

T. B. Titkova, V. V. Vinogradova

Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mails: ttitkova@igras.ru, vvvinog@yandex.ru

The trends of climatic characteristics in transitional landscape zones of the northern regions of Russia are considered. MODIS data are used for the analysis of surface spectral characteristics. In transitional landscape zones, climatic conditions are estimated on the basis of station data. In large geographical regions of the Russian North, the response of the spectral characteristics of landscapes to modern climatic changes is determined. The areas with the most significant changes of green phytomass are identified based on satellite data. Nowadays, the climatic conditions of some areas in tundra, forest tundra and northern taiga correspond to more southerly landscape zones. This can lead to a shift in the boundaries of transitional landscape zones to higher latitudes. Climatic changes are confirmed by the positive trends in the vegetation index in the tundra and forest-tundra zones in the European part of Russia for the period of 2000–2018. In Siberia, positive NDVI trends characterize the landscapes of forest tundra and northern taiga. The areas of the transitional forest-tundra zone with maximum changes in the spectral characteristics of the surface are distinguished: the Kola Peninsula, the western part of the Bolshezemelskaya tundra, Western and Eastern Siberia.

Keywords: climate change, landscape areas, MODIS, NDVI, albedo, surface temperature

Accepted: 15.08.2019
DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323

References

1. Bazilevich N. I., Grebenshchikov O. S., Tishkov A. A., *Geograficheskie zakonomernosti struktury i funktsionirovaniya ekosistem* (Geographic patterns of ecosystem structure and functioning), Isakov Yu. A. (ed.), Moscow: Nauka, 1986, 297 p.
2. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (The second assessment report Hydromet about climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), Moscow: Rosgidromet, 2014, 1009 p.
3. Golubyatnikov L. L., Denisenko E. A., Model'nye otsenki vliyaniya izmenenii klimata na arealy zonal'noi rastitel'nosti ravninnykh territorii Rossii (Model estimates of the impact of climate change on the areas of zonal vegetation of the lowland territories of Russia), *Izvestiya RAN. Seriya biologicheskaya*, 2007, No. 2, pp. 212–228.
4. *Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Report on climate features in the Russian Federation for 2014), Moscow: Rosgidromet, 2015, 107 p.
5. Zamolodchikov D. G., Otsenka klimatogennykh izmenenii raznoobraziya drevesnykh porod po dannym lesnogo fonda (Evaluation of changes in climatogenic diversity of tree species according to the forest fund data), *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2011, Vol. 131, No. 4, pp. 382–392.
6. Ivanov N. N., Ob opredelenii velichin isparyaemosti (On the determination of evaporation values), *Izvestiya Vsesouyznogo geograficheskogo obshchestva*, 1954, Vol. 86, No. 2, pp. 189–196.
7. Kislov A. V., Evstigneev V. M., Malkhazova S. M., Sokolikhina N. N., Surkova G. V., Toporov P. A., Chernyshev A. V., Chumachenko A. N., *Prognoz klimaticheskoi resursoobespechennosti Vostochno-Evropeiskoi ravniny v usloviyakh potepleniya XXI veka* (Forecast of climate resource supply of the East European Plain in conditions of warming of the XXI century), Moscow: MAKS Press, 2008, 292 p.
8. Kokorin A. O., Dobrynin D. V., Sukhova O. V., Dlya ponimaniya klimaticheskoi dinamiki i adaptatsii sistemy okhrany prirody trebuyutsya detalnye dannye i prognozy (Detailed data and forecasts are needed to understand climate dynamics and adapt the nature preservation system), *Arkticheskie vedomosti*, 2018, No. 2(25), pp. 96–105.
9. *Landshaftnaya karta SSSR* (Landscape map of USSR), 1988. Scale 1: 4 000 000.
10. Mezentsev V. S., *Vodnyi balans* (Water balance), Novosibirsk, 1973, 229 p.
11. Rauner Yu. L., *Teplovoi balans rastitel'nogo pokrova* (Heat balance of vegetation cover), Leningrad: Rosgidromet, 1972, 210 p.
12. Rusanova G. V., Pochvy reliktovykh ostrovkov eli na severo-zapade Bol'shezemel'skoi tundry (Soils of relict islets ate in the northwest of the Bolshezemelskaya tundra), *Lesovedenie*, 2006, No. 2, pp. 21–25.
13. Sergienko V. G., Dinamika granits lesorastitel'nykh zon Rossii v usloviyakh izmeneniya klimata (The dynamics of the borders of forest vegetation zones of Russia in a changing climate), *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaistva*, 2015, No. 1, pp. 5–19.
14. Titkova T. B., Vinogradova V. V., Otklik rastitel'nosti na izmenenie klimaticheskikh uslovii v boreal'nykh I subarkticheskikh landshaftakh v nachale XXI veka (The response of vegetation to climate change in boreal and subarctic landscapes at the beginning of XXI century), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 75–86.
15. *Arctic Report Cards*, Richter-Mange J., Overland J. E., Mathis J. T., Osborne E. (eds.), 2017, 96 p., available at: http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card.
16. Karger D. N., Kessler M., Conrad O., Weigelt P., Kreft H., König C., Zimmermann N. E., Why tree lines are lower on islands — Climatic and biogeographic effects hold the answer, *Global Ecology and Biogeography*, 2018, pp. 1–12, DOI: 10.1111/geb.12897.
17. Kravtsova V. I., Loshkareva A. R., Dynamics of vegetation in the tundra-taiga ecotone on the Kola Peninsula depending on climate fluctuations, *Russian J. Ecology*, 2013, No. 4, pp. 303–311, DOI: 10.1134/S1067413613040085.
18. Xu L., Myneni R. B., Chapin III F. S., Callaghan T. V., Pinzon J. E., Tucker C. J., Zhu Z., Bi J., Ciais P., Tømmervik H., Euskirchen E. S., Forbes B. C., Piao S. L., Anderson B. T., Ganguly S., Nemani R. R., Goetz S. J., Beck P. S.A., Bunn A. G., Cao C., Stroeve J. C., Temperature and vegetation seasonality diminishment over northern lands, *Nature Climate Change*, 2013, pp. 1–6, DOI: 10.1038/NCLIMATE1836.
19. Yu Q., Epstein H., Engstrom R. Walker D., Circumpolar arctic tundra biomass and productivity dynamics in response to projected climate change and herbivory, *Global Change Biology*, 2017, Vol. 23, pp. 3895–3907, DOI: 10.1111/gcb.13632.