

Проявление летнего потепления в изменениях спектральных характеристик поверхности природных зон России

Т. Б. Титкова, А. Н. Золотокрылин

Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия
E-mails: titkova@igras.ru, azolotokrylin1938@yandex.ru

Рассматривается изменение спектральных характеристик поверхности на основе данных MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), в частности вегетационного индекса, альбедо и температуры поверхности, и их связи в суббореальной, бореальной и субарктической зонах в выявленных районах максимального летнего роста температуры воздуха на территории России. Возможные изменения природных зон при потеплении климата тесно связаны с механизмами регулирования температуры подстилающей поверхности (радиационного и эвапотранспирационного). По данным наблюдений выявлено, что изменение температуры между 1991–2020 и 1961–1990 гг. неоднородно в течение летнего периода и затрагивает большое число природных зон России. Потепление максимально в июне на большей части Азиатской России с максимумом в субарктической зоне, в июле проявляется в большей степени в южной части Средней Сибири (Прибайкалье и Забайкалье), а в августе — в суббореальной зоне юга Европейской России. В районах максимального летнего роста температуры воздуха определены площади с радиационным типом регулирования температуры поверхности, сопровождающимся слабо развитым или отсутствующим растительным покровом, и рассчитаны их тренды. Показано, что в суббореальной зоне юга европейской территории России потепление климата на фоне деградации растительности поддерживает и может увеличивать территории с радиационным типом регулирования температуры поверхности, создавая новые сезонные очаги опустынивания. Получено, что в бореальной зоне юга Средней Сибири при превалировании эвапотранспирационного типа регулирования температуры поверхности повышение температуры и неблагоприятные природные условия мозаично могут поддерживать радиационный тип регулирования температуры поверхности. Выявлено, что увеличение температуры в субарктической зоне может привести к сокращению площади с радиационным типом регулирования температуры поверхности в результате роста фитомассы (север Средней Сибири). В итоге повышение температуры воздуха может привести к распространению территорий с радиационным типом регулирования температуры поверхности в суббореальной природной зоне и поддерживать участки с радиационным типом регулирования температуры поверхности в бореальной и субарктической зоне, что определяется рельефом и локальными природными и климатическими условиями.

Ключевые слова: температура, спектральные характеристики, вегетационный индекс, альбедо, температура поверхности, природные зоны, юг европейской территории России, юг Средней Сибири, север Средней Сибири, Чукотка

Одобрена к печати: 23.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-193-206

Введение

В соответствии с третьим оценочным докладом Росгидромета проявления изменений климата на территории России характеризуются впечатляющим многообразием и неоднозначностью последствий для природной среды. К настоящему времени установлено, что изменение климата оказывает существенное влияние на динамику природных экосистем и жизнедеятельность человека (Мохов и др., 2016; Семенов, Алешина, 2021; Beguería et al., 2014; Hersbach et al., 2015; IPCC..., 2021; La Sorte et al., 2021). Наблюдаемое потепление климата на большей части нашей планеты приводит к изменениям в составе, структуре и функционировании растительного компонента ландшафтов и, следовательно, спектральных свойств поверхности (Титкова, Золотокрылин, 2022). Растительный покров явно реагирует на отклонения от нормы основных климатических показателей — температуры и количества осадков (Коняев и др., 2003).

Отклик спектральных характеристик поверхности на прямое повышение температуры проявляется в различных диапазонах времени (быстрая реакция и накопленная) и неоднороден по пространству (Титкова, Виноградова, 2015; Тишков и др., 2020). Для густой растительности проявление глобального потепления в спектральных характеристиках поверхности замедлено (несколько лет), а при разреженной — достаточно быстрое (год в год), что определяется уровнем теплообмена в толще растительного покрова (Wu et al., 2016). Экстремальные явления в течение короткого промежутка времени оказывают гораздо более заметное воздействие на подстилающую поверхность по сравнению с постепенными изменениями (Bouwer, 2019). Реакция изменения продуктивности растительности на климатические аномалии в бореальной зоне может проявляться через 10–15 дней, а в зонах субарктических и суббореальных ландшафтов эти сроки сокращаются (Коняев и др., 2005). В результате исследований выявлено, что климатические условия на ряде участков тундры, лесотундры и северной и средней тайги изменяются вследствие глобального потепления и теперь соответствуют более южным ландшафтным зонам, что создаёт благоприятные условия для изменения растительности (Титкова, Виноградова, 2015). Также на юге России наблюдается увеличение суммы активной температуры и иссушение территории, что отражается в уменьшении нормализованного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) и может привести к расширению зоны степей, сухих степей и полупустынь (Виноградова, Титкова, 2024).

Совокупность альбедо (A_l), температуры поверхности (T_s), вегетационного индекса (NDVI), а также их связи практически полностью даёт спектральный портрет подстилающей поверхности в заданный момент времени (Титкова и др., 2020). Изменение значений и связей спектральных характеристик отдельного ландшафта может говорить о большой вероятности потери целостности и активности биома (Титкова, Виноградова, 2015). Связь между альбедо и температурой поверхности становится ключевой для понимания энергетического баланса Земли и климатических процессов. Доля отражённого падающего на поверхность излучения определяется количеством поглощённой энергии. Возможные изменения природных зон при потеплении климата тесно связаны с механизмами регулирования температуры подстилающей поверхности: радиационного (альбедного) и эвапотранспирационного (Золотокрылин, 2003). Каждому механизму соответствует положительная или отрицательная связь (корреляция) между альбедо и температурой поверхности (Золотокрылин, Титкова, 2011).

Радиационный механизм характерен для ландшафтов со слабо развитым или отсутствующим растительным покровом — для субарктических и суббореальных зон (Золотокрылин, Титкова, 2011). Радиационное регулирование температуры поверхности — это процесс, при котором с возрастанием альбедо поверхности происходит уменьшение поглощения радиационной энергии её деятельным слоем, при этом температура поверхности снижается; и наоборот — повышается при уменьшении альбедо. При доминировании этого механизма наблюдается отрицательная корреляция альбедо и температуры поверхности. Весь радиационный баланс расходуется на нагревание воздуха и почвы. Большая часть поступающего дневного тепла переносится потоком явного тепла в атмосферу. Такое регулирование температуры поверхности характерно для полупустынных, пустынных ландшафтов на юге и субарктических, арктических на севере (Золотокрылин, 2003; Тепловодообмен..., 2007; Kodama et al., 2000).

Эвапотранспирационное регулирование температуры поверхности становится доминирующим, когда при увеличении альбедо поверхности эвапотранспирация уменьшается, что ведёт к повышению температуры поверхности (положительная связь альбедо и температуры поверхности). В северных суббореальных и бореальных ландшафтах такое регулирование является доминирующим фактором (Титкова и др., 2020). В этих растительных зонах заметная часть поглощённого поверхностью радиационного тепла тратится на транспирацию и испарение. В итоге в случае увеличения альбедо поверхности её температура возрастает (между ними возникает положительная корреляция), так как часть тепла, тратившегося на транспирацию, переключается на турбулентный прогрев приземного слоя атмосферы, и с повышением температуры воздуха происходит увеличение температуры поверхности. Также

растительность в процессе развития, при сплошном покрытии, снижает альбедо поверхности относительно открытых участков почвы. При этом развитие растительности влияет и на саму температуру, поглощая солнечную радиацию для фотосинтеза и повышая температуру, но эта связь косвенная и зависит от других факторов, таких как вид растительности, влажность почвы, рельеф и т. д.

Изучение распространения на территории действия радиационного и эвапотранспирационного механизмов регулирования температуры поверхности, определяемых по отрицательной и, соответственно, положительной связи альбедо — температура поверхности, может быть полезно в качестве индикаторов эволюции растительного компонента ландшафтов.

Работа направлена на исследование изменения типов регулирования температуры поверхности и эволюции растительности в выявленных районах максимального проявления глобального потепления в летние месяцы на территории России.

Территория, данные, методы

Рассматривается вся территория России. Определение ландшафтных районов, в которых отмечалось изменение параметров, проводилось по ландшафтной карте Национального атласа России (2004–2021) (рис. 1).

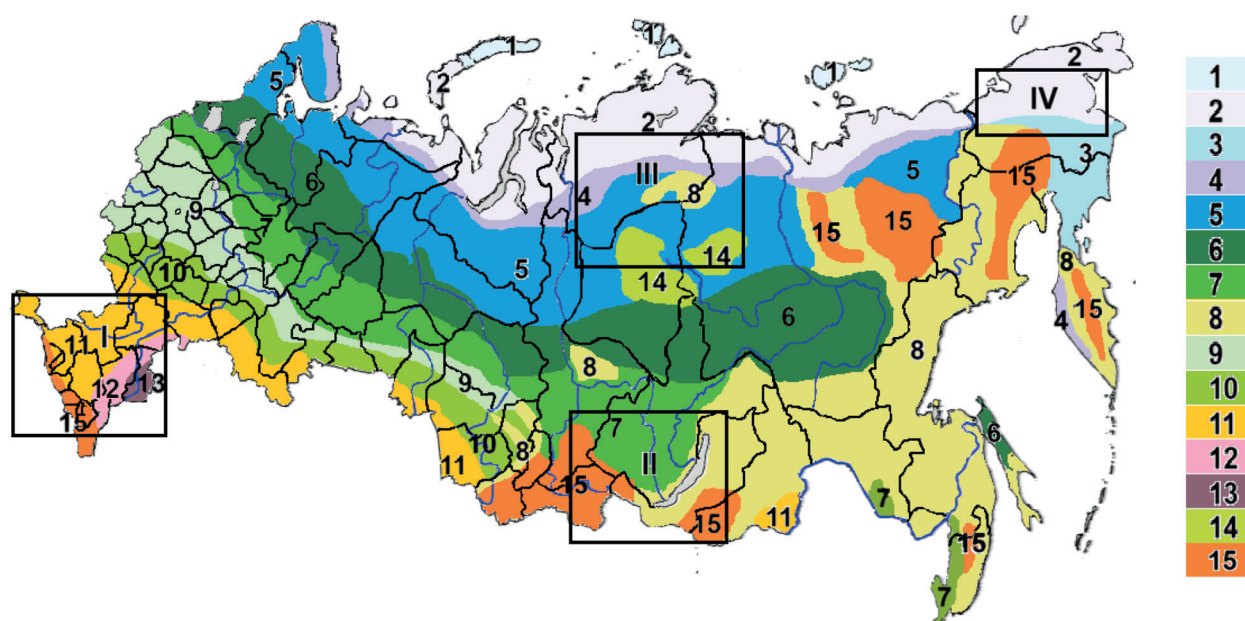


Рис. 1. Природные зоны (Ландшафты..., 2007) и административные границы России: 1 — Арктика, 2 — тундра, 3 — стланиковая тундра, 4 — лесотундра, 5 — северная тайга, 6 — средняя тайга, 7 — южная тайга, 8 — горная тайга, 9 — широколиственные леса, 10 — лесостепь, 11 — степь, 12 — южная степь, 13 — полупустыня, 14 — низкогорные бореальные, 15 — горные ландшафты. Квадратами выделены районы исследования спектральных характеристик поверхности: I — юг европейской территории России (ЕТР), II — юг Средней Сибири, III — север Средней Сибири, IV — северо-восточная оконечность России (Чукотка)

Изменение температуры воздуха оценивалось по среднемесячным данным наблюдений из архива метеорологической сети Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) (<http://www.meteo.ru>) за июнь, июль и август. В работе анализировались данные на 510 станциях из 521 исходной. Станции с пропусками значений более пяти лет подряд были исключены из работы. Расчёт проводился для рекомендованного Всемирной метеорологической

организацией базового периода 1961–1990 гг. и современного периода максимальных положительных трендов температуры 1991–2020 гг.

Для оценки отклика спектральных характеристик поверхности были использованы спутниковые данные MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer): вегетационный индекс (NDVI), альbedo (AI) и температура поверхности (T_s) — с разрешением CMG (*англ.* Climate Modelling Grid) $0,05 \times 0,05^\circ$ за 2000–2024 гг. Данные NDVI рассматривались по модели MOD13C2 для среднемесячных значений (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v061/>). Для оценки AI поверхности бралась модель MCD43C1 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd43c1v061/>). Данные AI отбирались для середины месяца с 7 по 25 число. Использовалось интегрированное (по семи каналам) изотропное альbedo для чёрного неба для видимого диапазона спектра. Это альbedo отражает свойства поверхности, влияющие на рассеяние радиации, такие как шероховатость и неоднородность. Температура поверхности анализировалась по модели MOD11C3 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c3v061/>). Значения в продукте MOD11C3 получены усреднением величин из соответствующего месяца ежедневных файлов MOD11C1.

Изменение месячной температуры воздуха приземного слоя было вычислено между двумя периодами — 1961–1990 и 1991–2020 гг. Рассчитывались тренды вегетационного индекса за 2000–2024 гг. отдельно по летним месяцам. Значимость изменений и трендов параметров оценивалась с вероятностью 0,95 по критерию Стьюдента. Была рассчитана парная корреляция альbedo и температуры поверхности с разрешением $0,25 \times 0,25^\circ$. Каждый коэффициент корреляции оценивался по 25 точкам (5×5). Анализировались средние месячные коэффициенты корреляции для каждого года и в целом для периода 2000–2024 гг. для летних месяцев. Рассчитывалась связь температуры воздуха (наблюдаемые данные) и типа регулирования температуры поверхности для каждого летнего месяца. Для периода пересечения данных наблюдения (1961–2020) и спутниковых (2000–2024) выявить промежутки значимого тренда температуры воздуха не представилось возможным из-за достаточно высокого межгодового колебания, что не дало оценить стабильность изменения типа регулирования температуры поверхности. Расчёты и графическое представление результатов производились в системе MATLAB.

Результаты

Изменение температуры воздуха в летний период

Температура воздуха значимо выросла в летние месяцы на ЕТР, в основном в её западной части (*рис. 2*). В июне она значительно выше только на юге ЕТР в степной зоне (до $1,5^\circ\text{C}$), а в июле и августе повышение распространяется и усиливается в западной части ЕТР до зоны средней тайги. В августе максимальное изменение температуры суббореальных ландшафтов в степной и полупустынной зоне составляет 2°C .

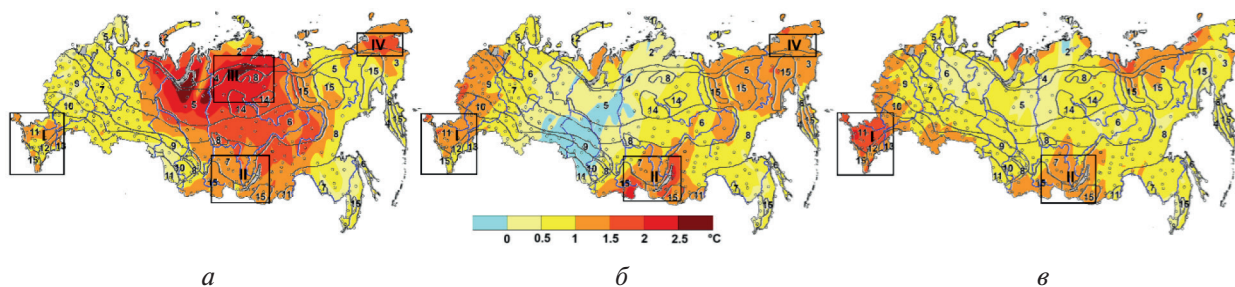


Рис. 2. Изменение температуры воздуха между 1991–2020 и 1961–1990 гг. по данным ВНИИГМИ-МЦД: *а* — июнь; *б* — июль; *в* — август. Изменения значимы при значениях >1 (<-1) $^\circ\text{C}$. Линии — границы природных зон России (см. *рис. 1*). Кружки — метеостанции. Квадраты — области максимальных значимых изменений температуры в летние месяцы

В начале летнего периода максимальное масштабное значимое изменение температуры воздуха между периодами наблюдается в северной половине Западной и на всей территории Средней Сибири (до $+3^{\circ}\text{C}$) и затрагивает равнинные и горные природные зоны от тундр до южной тайги. В июле и августе это потепление сохраняется только в южной части Средней Сибири, в зоне южной и горной тайги и в высокогорных ландшафтах.

Ещё один район значимого изменения летней температуры прослеживается на северо-восточной оконечности России — Чукотке, где он затрагивает субарктическую зону с ландшафтами тундр и стланиковых тундр. Этот рост температуры воздуха максимален в первой половине лета (до $+2^{\circ}\text{C}$) и уменьшается в августе (до $+1^{\circ}\text{C}$).

Таким образом, летнее изменение температуры затрагивает практически все природные зоны России. Проявление летнего потепления максимально в июне на большей части Азиатской России, в июле в южной части Средней Сибири (Прибайкалье и Забайкалье) и в августе в основном на юге ЕТР.

Спектральные характеристики поверхности в районах максимального повышения температуры воздуха

Рассмотрим реакцию спектральных характеристик поверхности в обозначенных нами районах максимального роста летней температуры воздуха, чтобы определить реакцию растительности и механизма регулирования температуры подстилающей поверхности в различных природных зонах России (суббореальной, бореальной и субарктической).

Южная часть ЕТР относится к суббореальной зоне и представлена степными, сухостепными и полупустынными ландшафтами. Усиление потепления в течение летнего периода на юге ЕТР (квадрат I на *рис. 1*) явно отражается на состоянии фитомассы (*рис. 3, I*). Вегетационный индекс падает в июне в сухостепной и полупустынной зоне, а в июле и августе уже и в степной зоне.

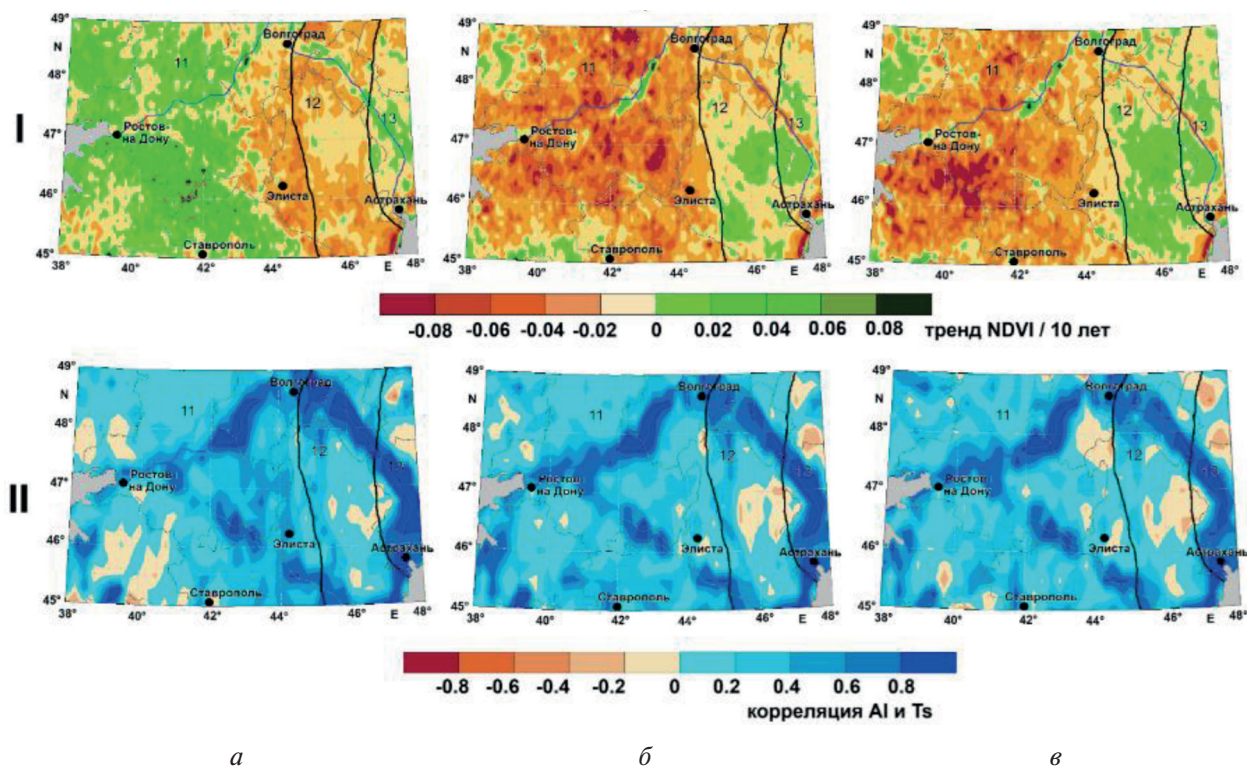


Рис. 3. Изменение спектральных характеристик поверхности на юге ЕТР за 2000–2024 гг. в летние месяцы по данным MODIS, I — тренд NDVI, II — корреляция AI и T_s ; а — июнь; б — июль; в — август. Цифрами отмечены природные зоны (см. *рис. 1*). Обозначены административные границы

Зависимость типа регулирования температуры поверхности от температуры воздуха в суббореальных ландшафтах юга ЕТР в летние месяцы показана на *рис. 4, I*. В начале вегетационного периода повышение температуры способствует развитию растительности и увеличению его проективного покрытия (в основном в степной зоне), что приводит к росту эвапотранспирационного типа регулирования температуры поверхности (см. *рис. 4а, I*). Коэффициент корреляции положителен (0,3). В июле и августе рост температуры воздуха имеет накопленный эффект и негативно влияет на вегетационный индекс и состояние подстилающей поверхности, что приводит к отрицательной связи температуры воздуха и регулирования температуры поверхности (см. *рис. 3, I, 4б, в, I*). Коэффициент корреляции меняет знак на отрицательный (–0,3). Начинает доминировать радиационный тип. На юге ЕТР области с радиационным механизмом регулирования температуры поверхности выделяются ландшафты со слабо развитым или отсутствующим растительным покровом, в основном в полупустынной зоне Прикаспия и на деградированных землях степной зоны (см. *рис. 3, II*). Здесь радиационный баланс расходуется на нагревание воздуха и почвы, велики потоки явного тепла в атмосферу (Титкова, Золотокрылин, 2023) и образуются очаги иссушения с деградированными землями.

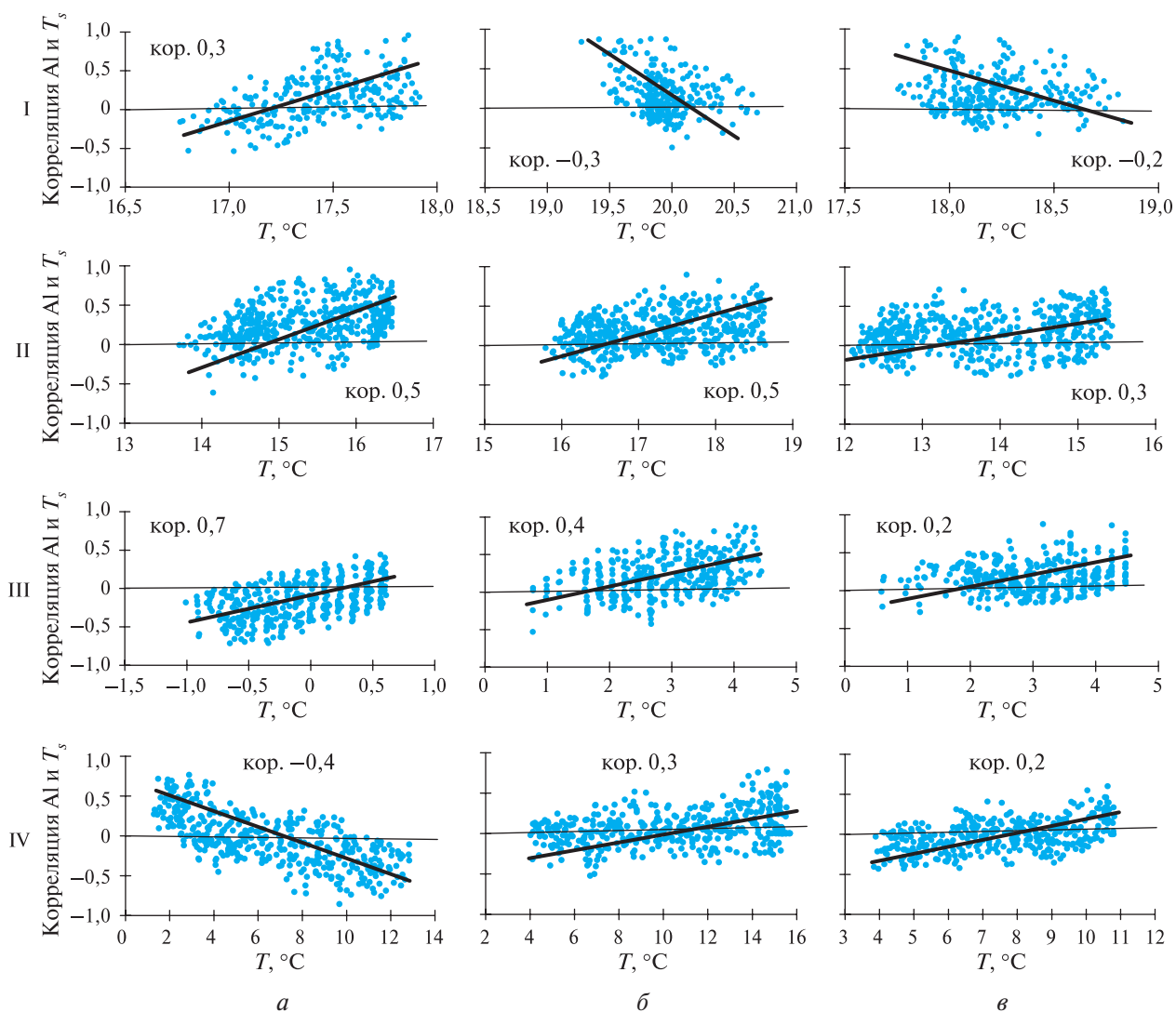


Рис. 4. Связь температуры воздуха с типом регулирования температуры поверхности (корреляция Al и T_s) в летние месяцы 2000–2020 гг. в районах юга ЕТР (I), юга Средней Сибири (II), севера Средней Сибири (III), Чукотки (IV): *а* — июнь; *б* — июль; *в* — август

Наибольший такой очаг опустынивания прослеживается в начале XXI в. на границе Калмыцкой Республики с Астраханской областью в полупустынных ландшафтах, который развивается в течение летнего периода. Также очаги опустынивания, но меньшего масштаба, можно отметить и в степной зоне Краснодарского и Ставропольского края. В среднем такие земли занимают 18 % (от площади выделенного квадрата I) в течение всего летнего периода с увеличивающимся стандартным отклонением от июня (1,5 %) к августу (2,5 %) (таблица). Тренды площади с очагами опустынивания на фоне деградации фитомассы не значимы за период 2000–2024 гг. и колеблются от 0,1 до 0,3 %.

Статистика площади (в %) с радиационным типом регулирования температуры поверхности (корреляция Al и $T_s < -0,2$) в районах максимального повышения температуры по природным зонам в летние месяцы 2000–2024 гг.

Природная зона	Район	Среднее	Стандартное отклонение	Тренд/10 лет
		<i>Июнь</i>		
Суббореальная	I — юг ЕТР	18,2	1,5	–0,1
Бореальная	II — юг Средней Сибири	23,6	1,5	–0,3
Субарктическая	III — север Средней Сибири	39,1	4,6	–2,4
	IV — Чукотка	44,1	4,7	0,2
		<i>Июль</i>		
Суббореальная	I — юг ЕТР	17,6	2,3	–0,3
Бореальная	II — юг Средней Сибири	23,1	1,5	0,6
Субарктическая	III — север Средней Сибири	20,7	1,4	–0,2
	IV — Чукотка	28,1	1,8	0,3
		<i>Август</i>		
Суббореальная	I — юг ЕТР	18,0	2,5	–0,1
Бореальная	II — юг Средней Сибири	26,0	1,3	0,5
Субарктическая	III — север Средней Сибири	24,3	2,4	–0,3
	IV — Чукотка	34,1	1,3	0,6

Примечание: Полужирным начертанием выделен значимый тренд с вероятностью 0,95 % по критерию Стьюдента.

В бореальной зоне юга Средней Сибири (Прибайкалье и Забайкалье) (квадрат II на рис. 1) в южной и горной тайге рост температуры во все летние месяцы сопровождается усилением эвапотранспирационного типа регулирования температуры поверхности (см. рис. 4, II). Коэффициенты корреляции наибольшие в июне (0,5) и немного убывают к августу (0,3), что естественно во второй половине вегетационного сезона.

Значимое увеличение температуры воздуха между тридцатилетними периодами на юге Средней Сибири (квадрат II на рис. 1) наблюдалось во все летние месяцы (см. рис. 2). Изменение фитомассы при большом основном объёме незначимо (в районе 0,02 индекса NDVI) (рис. 5, I, см. с. 200). Отмечаются мозаичные районы деградации растительности между летними месяцами в южной тайге и горных районах, что частично является следствием повышения температуры и уничтожения растительности лесными пожарами, наблюдаемыми здесь особенно часто в XXI в. (Барталев и др., 2015; Елисеев, Васильева, 2020).

При обилии растительности в бореальной зоне преобладает эвапотранспирационный тип регулирования температуры поверхности (см. рис. 5, II). Уменьшение Al при положительных трендах NDVI приводит к увеличению эвапотранспирации, что ведёт к понижению температуры поверхности. Большая часть поглощённого поверхностью радиационного тепла тратится на транспирацию и испарение, что подтверждается и другими исследованиями (Forzieri et al., 2017).

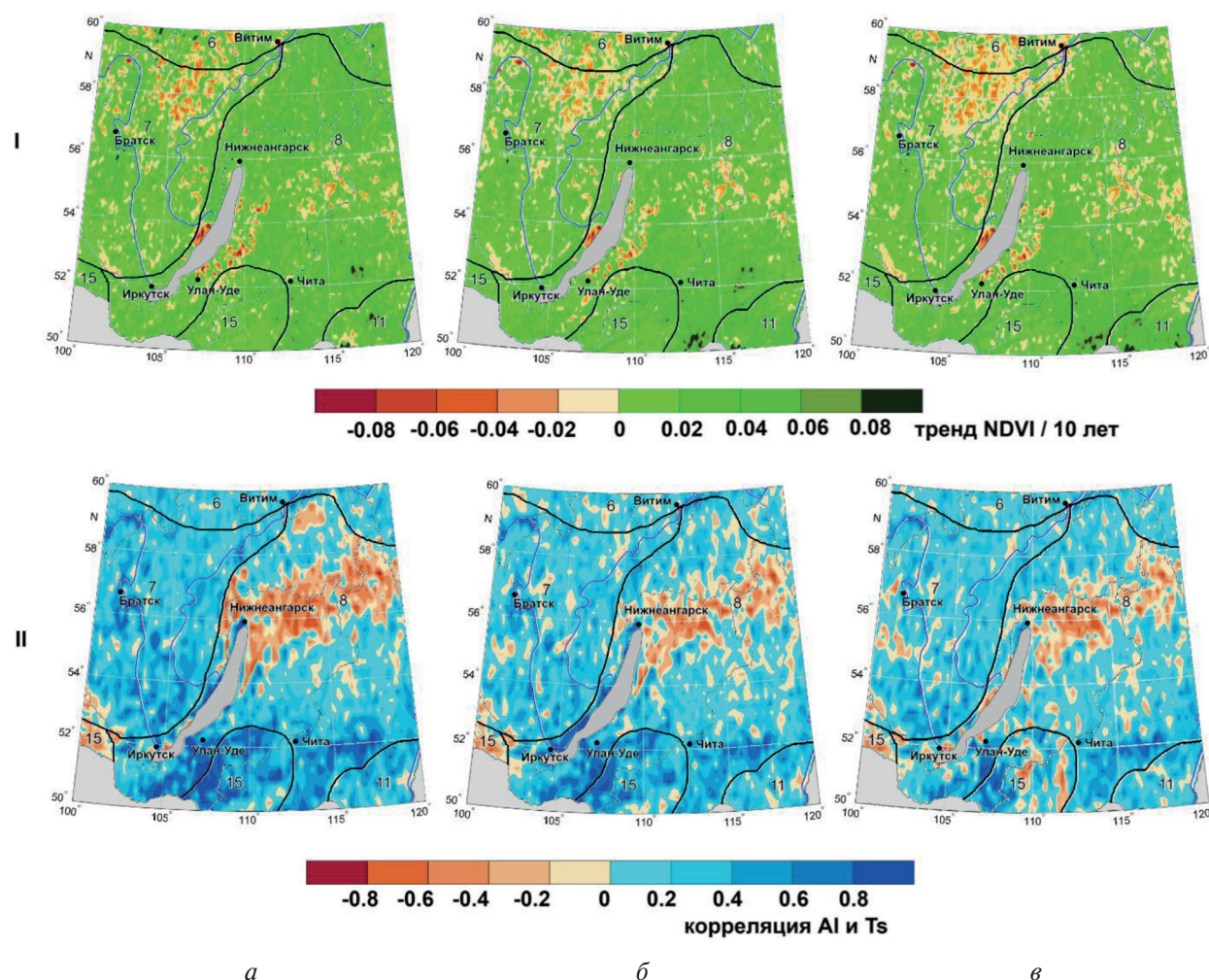


Рис. 5. То же, что и на рис. 3, для южной части Средней Сибири (Прибайкалье и Забайкалье)

В зоне горной тайги (Становое нагорье) на открытых участках выделяются области радиационного типа регулирования температуры поверхности, которые занимают чуть больше 20 % от общей площади квадрата со стандартным отклонением около 1,5 % (см. таблицу). За последние годы (2000–2024) площадь с радиационным регулированием температуры поверхности незначительно уменьшилась в июне при росте температуры и максимальной вегетации растительности. В июле и августе повышение температурного фона привело к значимому мозаичному увеличению районов с радиационным регулированием температуры поверхности на 0,5–0,6 %/10 лет как в зоне южной тайги, так и горной тайги.

На севере бореальной и в субарктической зоне севера Средней Сибири (квадрат III на рис. 1) увеличение температуры воздуха ведёт к сокращению радиационного типа регулирования температуры поверхности и росту эвапотранспирационного, особенно это заметно в июне (коэффициент корреляции 0,7) (см. рис. 4, III). В июле и августе эти зависимости сохраняются в меньшей мере (коэффициенты корреляции 0,4 и 0,2). Как было указано выше, на севере Средней Сибири в июне отмечался самый большой рост температуры между тридцатилетними периодами (см. рис. 2). В результате в зоне тундр и горной тайги значительно вырос вегетационный индекс в диапазоне до 10 %. Рост и развитие фитомассы в июле и августе на фоне незначительного изменения температуры (рис. 6, I, см. с. 201) незначимы. В июле при средней температуре 4–12 °C и избыточном увлажнении растительность здесь максимально развита (Третий..., 2022). На фоне незначительного изменения температуры воздуха в июле и августе в зоне тундры и лесотундры отмечаются участки с деградацией фитомассы.

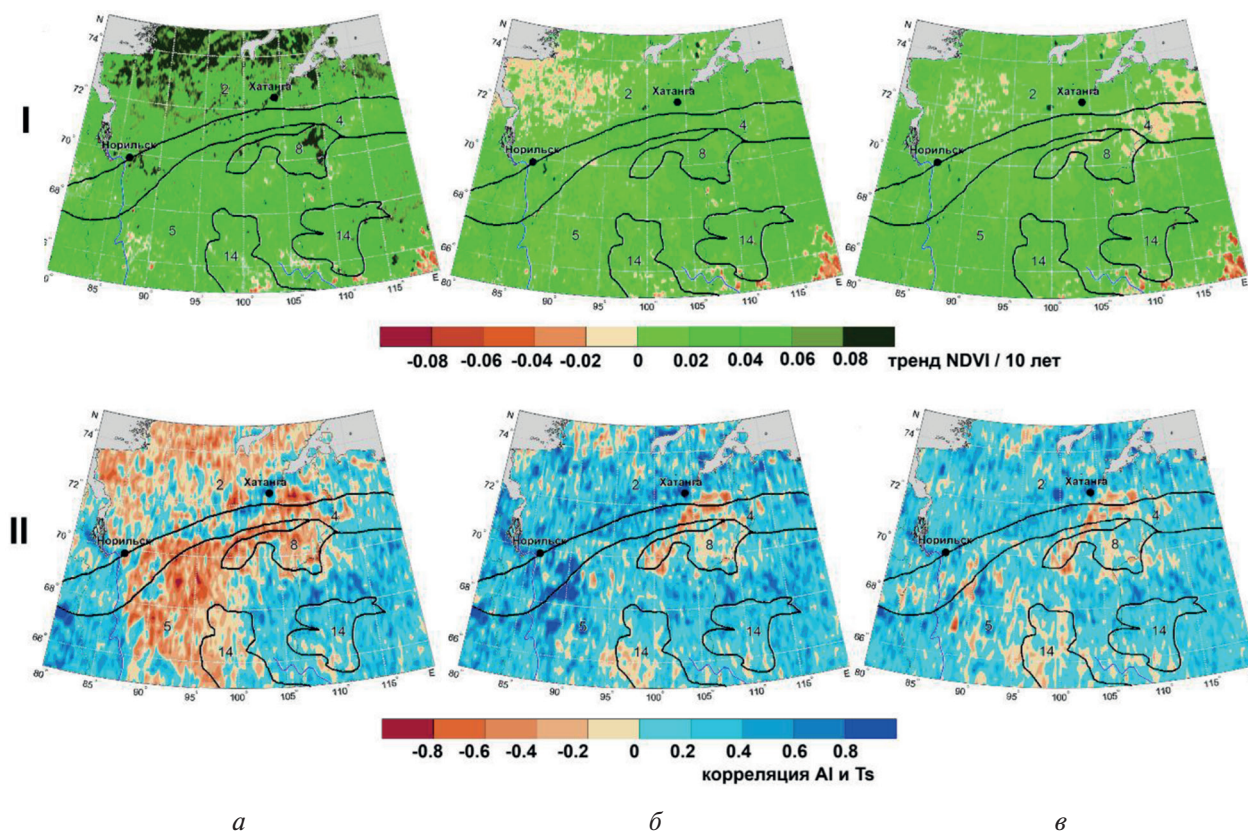


Рис. 6. То же, что и на рис. 3, для северной части Средней Сибири

В июне в тундре Средней Сибири и в северной тайге (плато Путорана и Анабарское плато) при ещё недостаточно развитом растительном покрове на больших площадях горной и каменистой поверхности доминирует радиационный механизм регулирования температуры поверхности с отрицательной корреляцией AI и T_s (см. рис. 6а, II), что охватывает около 39 % площади квадрата (см. таблицу). В июне 2000–2024 гг. наблюдается сокращение таких участков на 2,5 %/10 лет. В июле и августе радиационный тип регулирования температуры поверхности отмечается только в горных районах тайги и лесотундры. Он занимает 20–25 % от общей территории и практически не меняется с начала XXI в.

Субарктическая зона Чукотского полуострова с тундровыми и сланцево-тундровыми ландшафтами — ещё один район максимального роста температуры воздуха между периодами 1961–1990 и 1991–2020 гг., особенно в первой половине лета. Июнь на восточной Чукотке — время таяния снегов. В горных массивах и долинах вода и остатки снега мозаично присутствуют везде. Это откладывает свой отпечаток на зависимость температуры воздуха и типа регулирования температуры поверхности. В июне она отрицательна (коэффициент корреляции $-0,4$) (см. рис. 4, IV). В июле и августе связь уже слабо положительна.

Июньское потепление субарктической зоны в период максимальной вегетации растительности вызывает рост вегетационного индекса (квадрат IV на рис. 1) практически повсеместно, за исключением узкой прибрежной зоны Чукотского моря и высокогорных районов (рис. 7, I, см. с. 202). Зона тундр Чукотского полуострова с разреженной растительностью имеет радиационный тип регулирования температуры поверхности (см. рис. 7, II) на 44 % площади квадрата с большим стандартным отклонением 4–5 % в июне и уменьшается до порядка 30 % в июле и августе (см. таблицу). При этом повышение температуры воздуха привело к положительным трендам площади с радиационным типом регулирования температуры поверхности в конце летнего периода. Предположительно, гористая щебнисто-каменистая поверхность тундры в конце лета в условиях ветреной погоды подвержена интенсивному высушиванию с последующим ростом альбедо поверхности.

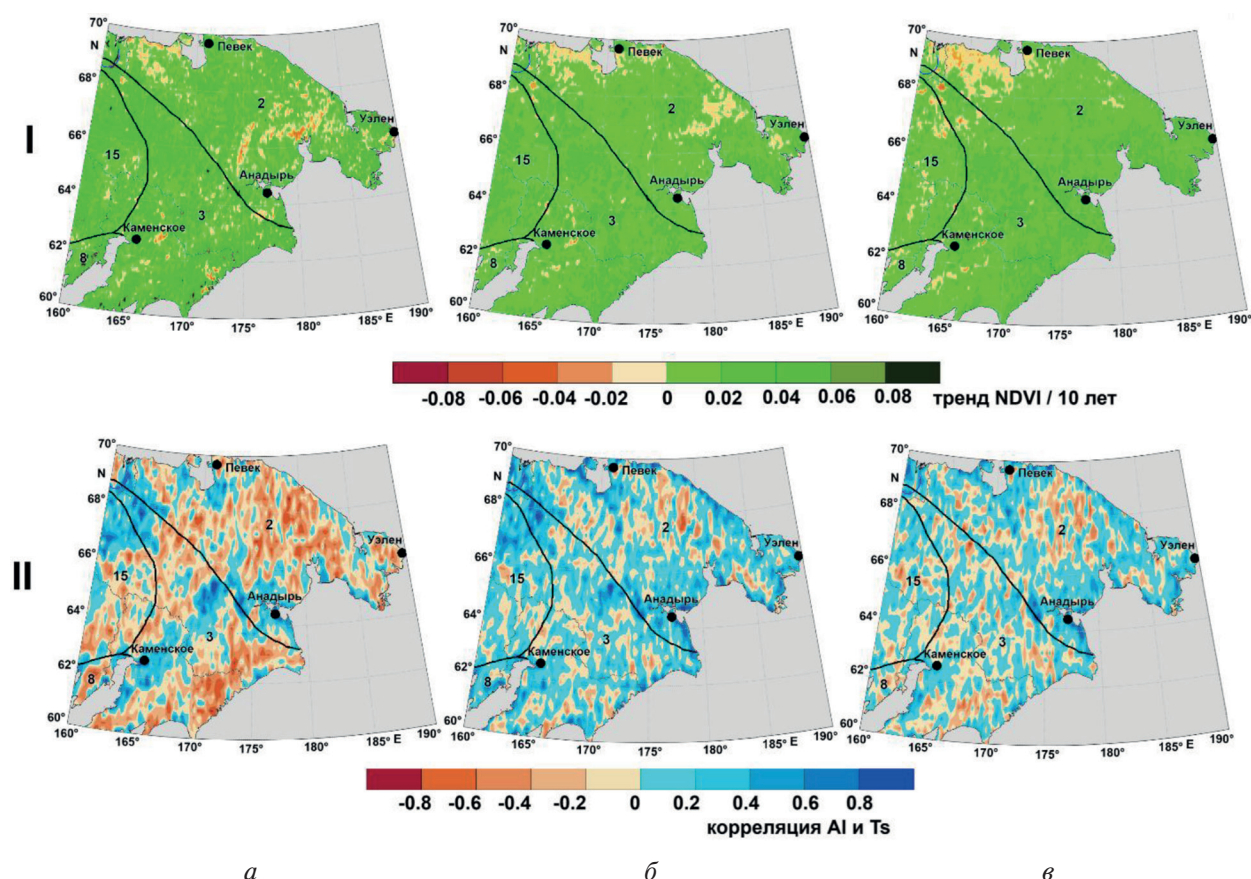


Рис. 7. То же, что и на рис. 3, для Чукотки

Заключение и обсуждение

Изменение температуры воздуха на территории России между периодами 1991–2020 и 1961–1990 гг. неоднородно в течение летнего периода и затрагивает большое число природных зон. Потепление максимально в июне на большей части Азиатской России, в июле в большей степени проявляется в южной части Средней Сибири (Прибайкалье и Забайкалье), а в августе — на юге ЕТР. Рост температуры приводит к изменению растительного компонента ландшафтов и регулирования температуры поверхности с разным знаком в зависимости от природной зоны.

Усиление потепления в течение летнего периода в суббореальной зоне юга ЕТР приводит к деградации растительности. В целом колебание очагов опустынивания на фоне деградации фитомассы не значимо во все летние месяцы, что не исключает их значительное увеличение в годы сильных засух (Титкова, Золотокрылин, 2021). Здесь потепление климата поддерживает и может увеличивать территории с радиационным типом регулирования температуры поверхности, создавая новые очаги опустынивания.

При обилии растительности в бореальной зоне юга Средней Сибири рост температуры воздуха приводит к усилению интенсивности эвапотранспирационного типа регулирования температуры поверхности. Увеличение вегетационного индекса способствует росту эвапотранспирации, приводит к снижению альбедо и температуры поверхности (Forzieri et al., 2017). Повышение температурного фона в течение летнего периода, рост числа пожаров (Барталев и др., 2015) привели к мозаичному увеличению районов с радиационным регулированием температуры поверхности в зонах южной и горной тайги. Таким образом, рост температуры в бореальной зоне также может привести к распространению областей с радиационным типом регулирования температуры поверхности за счёт неблагоприятных климатических условий.

В тундре Средней Сибири и в северной тайге на больших площадях горной и каменистой поверхности доминирует радиационный механизм регулирования температуры поверхности с отрицательной корреляцией AI и T_s . Повышение температуры воздуха в зоне тундр и горной тайги значительно увеличило количество фитомассы, что сократило площади с радиационным типом регулирования температуры поверхности. Зона тундр Чукотского полуострова, с разреженной растительностью, имеет районы с радиационным типом регулирования температуры поверхности. Повышение температуры в тундрах Чукотки также влечёт за собой рост вегетационного индекса, как и в субарктической зоне Средней Сибири. В конце летнего периода в горных районах Чукотки увеличение температуры воздуха сопровождается положительным трендом площади с радиационным типом регулирования температуры поверхности, предположительно в результате того, что гористая щебнисто-каменистая поверхность тундры в конце лета подвержена интенсивному высыханию с последующим ростом альбедо поверхности. В итоге повышение температуры в субарктической зоне может привести как к сокращению площади с радиационным типом регулирования температуры поверхности вследствие роста фитомассы (север Средней Сибири), так и к росту таких площадей в результате свойств щебнисто-каменистой поверхности в горных районах (Чукотка). Таким образом, независимо от природной зоны увеличение температуры воздуха может привести к распространению территорий с радиационным типом регулирования температуры поверхности, что во многом определяется рельефом и локальными природными условиями. Эти процессы выступают ещё одним индикатором эволюции ландшафтов на фоне глобального потепления.

Исследование выполнено по теме госзадания Института географии РАН «Изменения климата, их причины и последствия для окружающей среды и жизнедеятельности населения на территории России» FMWS-2024-0001.

Литература

1. Барталев С. А., Стыценко Ф. В., Егоров В. А., Луян Е. А. Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
2. Виноградова В. В., Титкова Т. Б. Климатические предпосылки изменений границ ландшафтных зон и подзон в европейской части России и Западной Сибири // Изв. РАН. Сер. геогр. 2024. Т. 88. № 3. С. 281–295. DOI: 10.31857/S2587556624030027.
3. Елисеев А. В., Васильева А. В. Природные пожары: данные наблюдений и моделирование // Фундам. и приклад. климатология. 2020. Т. 3. С. 73–119. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-3-73-119.
4. Золотокрылин А. Н. Климатическое опустынивание / отв. ред. А. Н. Кренке. М.: Наука, 2003. 246 с.
5. Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б. Новый подход к мониторингу очагов опустынивания // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 3(48). С. 14–22.
6. Коняев К. В., Золотокрылин А. Н., Виноградова В. В., Титкова Т. Б. Определение по спутниковым данным реакции растительного покрова на аномалии климатических показателей // Исслед. Земли из космоса. 2003. № 2. С. 18–26.
7. Коняев К. В., Золотокрылин А. Н., Виноградова В. В., Титкова Т. Б. Зависимость продуктивности растительного покрова от радиационного баланса и потока скрытого тепла в Северной Евразии // Исслед. Земли из космоса. 2005. № 2. С. 13–19.
8. Мохов И. И., Семенов В. А. Погодно-климатические аномалии в российских регионах в связи с глобальными изменениями климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 2. С. 16–28. DOI: 10.31857/S268673972260206X.
9. Ландшафты (карта, масштаб 1:15 000 000) // Национальный атлас России. Т. 2. «Природа. Экология». М.: Картография, 2007. С. 398–399. <https://nationalatlas.ru/tom2/398-399.html>.
10. Семенов В. А., Алешина М. А. Оценка прямого радиационного воздействия в изменениях приземной температуры в современный период // Докл. Российской акад. наук. Науки о Земле. 2021. Т. 497. № 2. С. 155–160. DOI: 10.31857/S2686739721040150.
11. Тепловодообмен в мерзлотных ландшафтах Восточной Сибири и его факторы: моногр. / отв. ред. А. Г. Георгиади, А. Н. Золотокрылин. М.; Тверь: Изд-во «Триада», 2007. 576 с.
12. 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.

13. Титкова Т. Б., Золотокрылин А. Н. Региональная неравномерность летнего потепления материковой Арктики как индикатор природных границ северных ландшафтов // Арктика: экономика и экология. 2021. Т. 11. № 3. С. 386–396. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-386-396.
14. Титкова Т. Б., Золотокрылин А. Н. Мониторинг подверженных опустыниванию земель Республики Калмыкия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 130–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141.
15. Титкова Т. Б., Золотокрылин А. Н. Пространственная неоднородность летнего турбулентного теплообмена на равнинах России // Фундам. и приклад. климатология. 2023. № 4. С. 467–481. DOI: 10.21513/2410-8758-2023-4-467-481.
16. Титкова Т. Б., Золотокрылин А. Н., Виноградова В. В. Спектральные характеристики тундровых и лесотундровых ландшафтов в годы летних температурных аномалий // Фундам. и приклад. климатология. 2020. № 4. С. 88–103. DOI: 10.21513/2410-8758-2020-4-88-103.
17. Тишков А. А., Белоновская Е. А., Вайсфельд М. А. и др. Региональные биогеографические эффекты «быстрых» изменений климата в Российской Арктике в XXI в. // Арктика: экология и экономика. 2020. № 2 (38). С. 31–44. DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-44.
18. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова; Росгидромет. СПб.: Научные технологии, 2022. 676 с.
19. Beguería S., Vicente-Serrano S. M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring // Intern. J. Climatology. 2014. V. 34. No. 10. P. 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>.
20. Bouwer L. M. Observed and projected impacts from extreme weather events: Implications for loss and damage // Loss and Damage from Climate Change. Concepts, Methods and Policy Options. Cham, Switzerland; Springer, 2019. P. 63–82. DOI: 10.1007/978-3-319-72026-5_3.
21. Forzieri G., Alkama R., Miralles D. G., Cescatti A. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth // Science. 2017. V. 356. No. 6343. P. 1180–1184. DOI: 10.1126/science.aal1727.
22. Hersbach H., Peubey C., Simmons A. et al. ERA-20CM: a twentieth-century atmospheric model ensemble // Quarterly J. Royal Meteorological Soc. 2015. V. 141. Iss. 691. P. 2350–2375. DOI: 10.1002/qj.2528.
23. IPCC, 2021: Summary for policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. P. 1–32.
24. Kodama Y., Ishii Y., Nomura M., Sato N., Yabuki H., Ohata T. Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, Eastern Siberia. Activity Report of GAME-Siberia, 2000. P. 13–14.
25. La Sorte F. A., Johnstone A., Ault T. R. Global trends in the frequency and duration of temperature extremes // Climatic Changes. 2021. V. 166. Article 1. DOI: 10.1007/s10584-021-03094-0.
26. Wu M., Schurgers G., Rummukainen M. et al. Vegetation-climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change // Earth System Dynamics. 2016. V. 7. No. 3. P. 627–647. <https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>.

Summer warming effects on changes in spectral characteristics of natural zone surfaces in Russia

T. B. Titkova, A. N. Zolotokrylin

Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia
E-mails: titkova@igras.ru, azolotokrylin1938@yandex.ru

Changes in surface spectral characteristics are examined on the basis of MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) data, particularly vegetation index, albedo and surface temperature, and their relationships in the subboreal, boreal and subarctic zones in identified areas of maximum summer air temperature increase across Russia. Possible changes in natural zones under climate warming are closely linked to mechanisms regulating the underlying surface temperature (radiation and evapotranspiration). Observational data reveal that temperature changes between 1991–2020 and 1961–1990 are heterogeneous during the summer season and affect numerous natural zones in Russia. Warming is most pronounced in June across most of Asian Russia with a peak in the subarctic zone, in July

it manifests primarily in southern Central Siberia (Baikal and Trans-Baikal regions), and in August in the subboreal zone of southern European Russia. In areas of maximum summer air temperature increase, territories with radiation type of surface temperature regulation, characterized by poorly developed or absent vegetation cover, were identified and their trends were calculated. It is shown that in the subboreal zone of the south of European Russia, climate warming, against the background of vegetation degradation, maintains and may increase areas with radiation type of surface temperature regulation, creating new seasonal desertification hotspots. It was found that in the boreal zone, in the south of Central Siberia, with the predominance of evapotranspiration type of surface temperature regulation, temperature rise and unfavorable natural conditions can support in a mosaic way the radiation type of surface temperature regulation. It has been revealed that an increase in temperature in the subarctic zone can lead to a reduction in the area with a radiation type of surface temperature regulation as a result of the growth of phytomass (north of Central Siberia). Thus, an increase in air temperature can lead to the spread of territories with radiation type of surface temperature regulation in the subboreal natural zone, and support areas with radiation type of surface temperature regulation in the boreal and subarctic zones, which is determined by the relief and local natural and climatic conditions.

Keywords: temperature, spectral characteristics, vegetation index, albedo, surface temperature, natural zones, southern European Russia, southern Central Siberia, northern Central Siberia, Chukotka

Accepted: 23.04.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-193-206

References

1. Bartalev S. A., Stytsenko F. V., Egorov V. A., Loupian E. A., Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality, *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94 (in Russian).
2. Vinogradova V. V., Titkova T. B., Climatic prerequisites for changes of zonal and subzonal landscape boundaries in European Russia and Western Siberia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2024, V. 88, No. 3, pp. 281–295 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556624030027.
3. Eliseev A. V., Vasilyeva A. V., Wildfires: Observational data and modeling, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2020, V. 3, pp. 73–119 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2020-3-73-119.
4. Zolotokrylin A. N., *Klimaticheskoe opustynivanie* (Climatic desertification), A. N. Krenke (ed.), Moscow: Nauka, 2003, 246 p. (in Russian).
5. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., A new approach to monitoring desertification hotspots, *Arid Ecosystems*, 2011, V. 17, No. 3 (48), pp. 14–22 (in Russian).
6. Konyaev K. V., Zolotokrylin A. N., Vinogradova V. V., Titkova T. B., Determination of the response of vegetation cover to anomalies of climatic indicators using satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2003, No. 2, pp. 18–26 (in Russian).
7. Konyaev K. V., Zolotokrylin A. N., Vinogradova V. V., Titkova T. B., Dependence of vegetation productivity on radiation balance and latent heat flux in Northern Eurasia, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2005, V. 2, pp. 13–19 (in Russian).
8. Mokhov I. I., Semenov V. A., Weather and climate anomalies in Russian regions related to global climate change, *Russian Meteorology and Hydrology*, 2016, V. 41, No. 2, pp. 84–92, DOI: 10.3103/S1068373916020023.
9. Landscape map (M 1:15 000 000), *Natsional'nyi atlas Rossii. T. 2. "Priroda. Ekologiya"* (National atlas of Russia. V. 2. Nature. Ecology), Moscow: Kartografiya, 2007, pp. 398–399 (in Russian), <https://nationalatlas.ru/tom2/398-399.html>.
10. Semenov V. A., Aleshina M. A., Assessment of direct radiative forcing impact on surface air temperature changes in the modern period, *Doklady Earth Sciences*, 2021, V. 497, No. 2, pp. 314–318, DOI: 10.1134/S1028334X21040152.
11. *Teplovodooobmen v merzlotnykh landshaftakh Vostochnoi Sibiri i ego faktory* (Heat and water exchange in the permafrost landscapes of Eastern Siberia and its factors), A. G. Georgeadi, A. N. Zolotokrylin (eds.), Moscow, Tver': Izd. "Triada", 2007, 576 p. (in Russian).
12. Titkova T. B., Vinogradova V. V., 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, V. 12, No. 3, pp. 75–86 (in Russian).
13. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Regional unevenness of the summer warming in the continental Arctic as an indicator of natural boundaries of northern landscapes, *Arktika: ehkologiya i ehkonomika*, 2021, V. 11, No. 3, pp. 386–396 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-386-396.

14. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Monitoring of lands affected by desertification in the Republic of Kalmykia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 2, pp. 130–141 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141.
15. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., The spatial heterogeneity of the summer turbulent heat exchange on the plains of Russia, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2023, No. 4, pp. 467–481 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2023-4-467-481.
16. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Vinogradova V. V., The spectral portrait of plain landscapes in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 3, pp. 117–126 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126.
17. Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Weisfel'd M. A. et al., Regional biogeographical effects of “fast” climate changes in the Russian Arctic in the 21st century, *Arktika: ehkologiya i ehkonomika*, 2020, No. 2 (38), pp. 31–44 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-44.
18. *Tretii otsenochnyi doklad ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Third assessment report on climate change and its consequences on the territory of the Russian Federation), V. M. Kattsov (ed.), Roshydromet, Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022, 676 p. (in Russian).
19. Beguería S., Vicente-Serrano S. M., Reig F., Latorre B., Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring, *Intern. J. Climatology*, 2014, V. 34, No. 10, pp. 3001–3023, <https://doi.org/10.1002/joc.3887>.
20. Bouwer L. M., Observed and projected impacts from extreme weather events: Implications for loss and damage, In: *Loss and Damage from Climate Change. Concepts, Methods and Policy Options*, Cham, Switzerland: Springer, 2019, pp. 63–82, DOI: 10.1007/978-3-319-72026-5_3.
21. Forzieri G., Alkama R., Miralles D. G., Cescatti A., Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of Earth, *Science*, 2017, V. 356, No. 6343, pp. 1180–1184, DOI: 10.1126/science.aal1727.
22. Hersbach H., Peubey C., Simmons A. et al., ERA-20CM: a twentieth-century atmospheric model ensemble, *Quarterly J. Royal Meteorological Soc.*, 2015, V. 141, Iss. 691, pp. 2350–2375, DOI: 10.1002/qj.2528.
23. IPCC, 2021: Summery for policymakers, In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge: Cambridge University Press, 2021, pp. 1–32.
24. Kodama Y., Ishii Y., Nomura M., Sato N., Yabuki H., Ohata T., Seasonal energy exchange over tundra region near Tiksi, Eastern Siberia, *Activity Report of GAME-Siberia*, 2000, pp. 13–14.
25. La Sorte F. A., Johnstone A., Ault T. R., Global trends in the frequency and duration of temperature extremes, *Climatic Changes*, 2021, V. 166, Article 1, DOI: 10.1007/s10584-021-03094-0.
26. Wu M., Schurgers G., Rummukainen M. et al., Vegetation-climate feedbacks modulate rainfall patterns in Africa under future climate change, *Earth System Dynamics*, 2016, V. 7, No. 3, pp. 627–647, <https://doi.org/10.5194/esd-7-627-2016>.