

ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 551.581.2

КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИЗМЕНЕНИЙ ГРАНИЦ
ЛАНДШАФТНЫХ ЗОН И ПОДЗОН В ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ
И ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2024 г. В. В. Виноградова^{1,2,*}, Т. Б. Титкова^{1,**}

¹Институт географии РАН, Москва, Россия

²НИУ “Высшая школа экономики”, Москва, Россия

*e-mail: vvvinog@yandex.ru

**e-mail: titkova@igras.ru

Поступила в редакцию 11.10.2023 г.

После доработки 29.11.2023 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

Глобальное потепление с различной степенью интенсивности проявляется в изменении ландшафтов равнин России. Продуктивность, биомасса и границы распространения растительности меняются в соответствии с динамикой теплообеспеченности и увлажнения. Последствием глобального потепления может быть смещение границ ландшафтных зон. В работе оцениваются изменения климатических характеристик ареалов природных ландшафтов равнин России, произошедших в результате глобального потепления последних двух десятилетий, которые могут создать предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах и подзонах. Исследования проводились для европейской части России и Западной Сибири от арктических до полупустынных ландшафтов. Использованы данные 265 метеостанций за 2000–2022 гг. и количественного показателя фотосинтетической активной биомассы – нормализованного вегетационного индекса NDVI за летний период. Рассматривались климатические характеристики: среднегодовая температура, температура января и июля, сумма температур выше 10°C, сумма годовых осадков, коэффициент увлажнения, их средние значения и стандартное отклонение, а также тренды за период 2000–2022 гг. Установлено, что в лесотундровой зоне наблюдается положительный тренд суммы активных температур и отрицательный тренд осадков. Коэффициент увлажнения уменьшается. Климатические условия на ряде участков тундры, лесотундры и северной и средней тайги изменяются и теперь соответствуют более южным ландшафтным зонам, что создает благоприятные условия для изменения растительности, проявляется в росте NDVI и может привести к смещению границ ландшафтных зон в более высокие широты. На юге России наблюдается увеличение суммы активных температур и иссушение территории, что отражается в уменьшении NDVI и может привести к расширению зоны степей, сухих степей и полупустынь. Реакция растительного покрова на климатические изменения подтверждается изменениями нормализованного вегетационного индекса.

Ключевые слова: ландшафтные зоны и подзоны, изменения климата, теплообеспеченность, температура, сумма активных температур, осадки, увлажнение, нормализованный вегетационный индекс NDVI

DOI: 10.31857/S2587556624030027 EDN: SOZAPE

ВВЕДЕНИЕ

Расчеты, приведенные в Шестом оценочном докладе об изменениях климата, показывают, что по всем сценариям глобальная приземная температура будет продолжать расти, по меньшей мере, до середины столетия. Глобальное потепление на 1.5 и 2°C может быть достигнуто в течение XXI в., если в предстоящие десятилетия не произойдет резкого сокращения выбро-

сов CO₂ и других парниковых газов (IPCC, 2022). В Арктике потепление может в два раза превышать скорость глобального потепления (IPCC, 2022). На территории России десятилетие 2011–2020 гг. было самым теплым за всю историю наблюдений (Третий ..., 2022; WMO ..., 2021), при этом количество глобальных осадков растет над сушей, но существуют районы, где засушливость усиливается.

Потепление различной степени интенсивности происходит практически на всей территории России (Третий ..., 2022) и может способствовать изменениям равнинных ландшафтов. По определению А.М. Рябчикова (1972), ландшафты определяются генетически однородными природными территориальными комплексами с однотипным составом и взаимосвязью основных компонентов геосферы (тепла, влаги, морфоструктуры, почв и биоценозов). Количественные критерии дифференциации ландшафтов, обуславливающие их зональность, Рябчиков определял по соотношению годового увлажнения и радиационного баланса или суммы активных температур, то есть по соотношению тепла и влаги. Продуктивность, биомасса и границы распространения растительности меняются в соответствии с динамикой теплообеспеченности и увлажнения. Последствием глобального потепления может быть смещение ландшафтных границ (Титкова, Виноградова, 2019; Vinogradova et al., 2021). В частности, в (Белоновская и др., 2016) отмечается сдвиг границы предтундровых редколесий на север и более медленное продвижение границы леса на север на Европейской территории России (ЕТР). Для высокоарктических и тундровых биомов возможно появление более южных видов, связанное с повышением температуры воздуха, а увеличение количества осадков и высоты снежного покрова может способствовать росту разнообразия кустарничков и цветковых растений (Тишков и др., 2019).

По мнению ряда исследователей, изменение климата одновременно влечет опасность значительной утраты биоразнообразия (Гребенюк, Кузнецова, 2014; Соловьев, 2007). Это проявляется в вытеснении одних древесных пород другими, зачастую менее ценными, снижении чистой продуктивности экосистем и биомов. Вследствие климатических изменений зоны распространения многих видов могут продвинуться в северном направлении или вверх по склону на возвышенностях и в горах. В России процессы трансформации сосняков могут затронуть 70% площадей и 50% – для ельников. Смешанные леса и дубравы можно отнести к менее чувствительным к потеплению климата, а самыми устойчивыми будут лиственничные леса Восточной Сибири. По прогнозам МГЭИК, к 2100 г. могут исчезнуть 30% сосновых и еловых лесов (Доклад ..., 2018).

Таежные ландшафты, расположенные на южной периферии криолитозоны, в подзонах островной и прерывистой вечной мерзлоты также могут быть подвержены трансформации при дальнейшем потеплении климата. Эти трансформации будут сопровождаться уменьшением площади мерзлотных ландшафтов и развитием высокобонитетных лесов с хорошо развитым на-

почвенным покровом (Медведков, 2018). В работе (Высоцкая, Медведков, 2022) подчеркивается, что зарастание курумов можно считать индикатором изменения границ зональных типов ландшафтов, поскольку эти ландшафты на западе Среднесибирского плоскогорья переходят в состояния, более характерные для южной тайги. Необходимо отметить, что ландшафты криолитозоны по-разному реагируют на климатические изменения (Васильев и др., 2020; Шполянская и др., 2022). Различия наблюдаются между северными и южными районами криолитозоны и связаны с характером наземных покровов. В частности, потепление климата, которое приводит к увеличению глубины сезонного протавивания и создает более благоприятные условия для растительности и увеличивает проективное покрытие кустарников (Васильев и др., 2020).

В горах отмечается продвижение древесной растительности в виде редколесий и кустарников в пояс горных тундр (Третий ..., 2022). В бореальных ландшафтах изменение климата и участвовавшие пожары смещают экотон южной тайги к северу (Brazhnik et al., 2017), а в неморальных ландшафтах восточная граница распространения широколиственных пород деревьев постепенно смещается на восток (Fedorov et al., 2021). В последние десятилетия в темнохвойных лесах гор Южной Сибири происходит массовое усыхание темнохвойных лесов (Бажина и др., 2013; Сайгин и др., 2019; Чебакова и др., 2022; Tchebakova et al., 2022), которое связывают с изменениями климата и аридизацией условий произрастания горных лесов (Воронин и др., 2019; Kharuk et al., 2017).

К середине XXI в., по данным модельных прогнозов, для большинства ландшафтов климатические условия уже могут не соответствовать господствующему типу растительности (Второй ..., 2014; Жильцова, Анисимов, 2015; Третий ..., 2022), например, как показано в работе (Anisimov et al., 2017) гипоарктические тундровые и частично арктические тундровые биомы будут становиться пригодными для развития лесной растительности. Также прогнозируется, что в XXI в. в более теплом и сухом климате сибирские леса сдвинутся на северо-восток, а на юге увеличатся по площади лесостепи и степи (Третий ..., 2022).

Целью работы является оценка изменений климатических характеристик ландшафтных зон/подзон равнин европейской части России и Западной Сибири, произошедших в результате глобального потепления двух последних десятилетий, которые могут создать предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах/подзонах, а также проявления этих изменений в спектральных характеристиках растительного покрова. В данной работе рассматриваются только климатические характеристики ландшафтов.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на Европейской территории России и Западной Сибири (ЗС) от арктических до полупустынных ландшафтов на основании данных 265 метеостанций (<http://meteo.ru/>) за 2000–2022 гг. Использование данных метеостанций позволило провести анализ климатических изменений за два последних десятилетия, а система дистанционного мониторинга дала возможность оценивать тренды изменения характеристик подстилающей поверхности.

Рассматривались климатические характеристики: среднегодовая температура ($T_{год}$), температуры самого холодного месяца (января) ($T_{январь}$) и самого теплого месяца (июля) ($T_{июль}$), сумма активных температур выше 10°C ($\Sigma T10^{\circ}$), сумма годовых осадков (ΣP), коэффициент увлажнения ($K_{увл}$).

Коэффициент увлажнения представлен отношением годового количества осадков к годовой величине испаряемости для данного ландшафта и является показателем соотношения тепла и влаги. Он 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. Был использован 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 по формуле:

$$K_{увл} = \Sigma P / (0.2 \times \Sigma T10^{\circ} + 306),$$

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.

В табл. 1 показаны диапазоны изменений климатических параметров для равнинных ландшафтов России, представленные в работе (Базилевич и др., 1986), где были проанализированы связи экосистем с климатическими условиями для базового климата (до потепления – 1960-е – 1970-е годы). Средний диапазон значений NDVI – нормализованного вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) – за летний период 2000–2018 гг. для каждой ландшафтной зоны оценивался на основании работы (Титкова и др., 2020). Климатические характеристики для современного климата сравнивались с базовым климатом. Считалось, что если более половины климатических параметров соответствует дру-

Таблица 1. Климатические характеристики природных равнинных экосистем России

Параметр/ландшафтная зона, подзона	Тундра	Лесо-тундра	Северо-таежные леса	Средне-таежные леса	Южно-таежные леса	Хвойно-широколиственные леса (подтаежные)	Широколиственные леса	Лесо-степи	Степи		Полупустыни
									настоящие	сухие	
Средняя температура самого теплого месяца, °C	8–12	10.8–13.3	10.6–15.8	15.6–17.7	16.2–18.7	15.8–19.3	16.9–23.2	17.1–21.4	20–23.8	22.4–25.2	24.3–25.5
Сумма активных температур больше 10 °C	182–637	526–843	643–1337	1276–1737	1525–2085	1585–2336	2870–3626	1990–3125	2488–3611	2358–3596	3329–3641
Годовая сумма осадков, мм	531–782	528–700	554–757	632–852	570–884	551–851	395–720	482–830	373–633	332–510	229–373
Коэффициент увлажнения	1.4–1.94	1.01–1.38	0.945–1.39	1.01–1.39	0.79–1.28	0.75–1.27	0.38–0.7	0.52–1.12	0.4–0.73	0.33–0.56	0.22–0.38
Среднегодовая температура, °C	–7.6–0.8	–5.9–0.0	–3.2–0.9	–1.6–3.0	1.0–4.5	2.1–6.6	7.8–12.0	2.7–9.0	3.1–11.0	6.1–10.6	7.9–10.4
Средняя температура самого холодного месяца, °C	–21.4...–5.8	–20.5...–10.1	–18.2...–10.8	–17.6...–9.6	–15.8...–7.2	–15.8...4.1	–5.1...2.6	–14.4...–0.5	–15.8...0.1	–11.8...0.8	–8.7...–3.9
Абсолютная минимальная температура, °C	–54.0...–51.0	–54...–33	–55...–39	–55...–33	–52...–38	–54...–34	–36...–22	–52...–26	–47...–26	–39...–28	–40...–32
Число станций	15	11	35	37	53	63	95	53	79	78	13

Составлено по: (Базилевич и др., 1986).

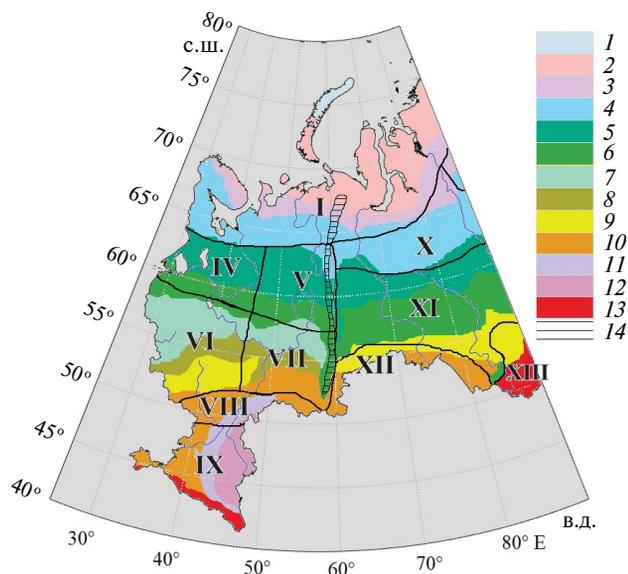


Рис. 1. Квазиоднородные климатические регионы (границы показаны линиями черного цвета): I – атлантическая Арктика; IV, V, VI, VII, VIII – северо-запад, северо-восток, юго-запад, юго-восток и степная часть Восточно-Европейской равнины; IX – степи и предгорье Северного Кавказа; X, XI – северная и южная части лесной зоны Западной Сибири, XII – степная зона Западной Сибири (Доклад ..., 2023). Цветом показаны ландшафтные зоны (Национальный ..., 2007, с. 398–399): 1 – арктические пустыни, 2 – тундра, 3 – лесотундра, 4 – северная тайга, 5 – средняя тайга, 6 – южная тайга, 7 – подтаежная зона, 8 – широколиственно-лесная, 9 – лесостепь, 10 – степь, 11 – сухая степь, 12 – полупустыня, 13 – высокогорные ландшафты, 14 – низкогорные ландшафты.

гой ландшафтной зоне, то по климатическим условиям эту метеостанцию можно отнести к “новой” ландшафтной зоне/подзоне.

Для крупных квазиоднородных климатических регионов согласно (Доклад ..., 2023), для равнинных районов европейской территории России и Западной Сибири (рис. 1) получены средние по квазиоднородному региону значения и стандартные отклонения климатических параметров за 2000–2022 гг. в ландшафтных зонах/подзонах (табл. 2), определенных до начала потепления (Ландшафтная ..., 1988; Национальный ..., 2007), а также тренды климатических характеристик за период 2000–2022 гг. (табл. 3). Значимость трендов определялась по критерию Стьюдента с вероятностью 0.95.

Реакция растительного покрова на климатические изменения оценивалась с помощью анализа количественного показателя фотосинтетической активной биомассы – нормализованного вегетационного индекса NDVI, который представляет собой нормированную разность альbedo подстилающей поверхности в видимой и ближней инфракрасной области

спектра и базируется на двух наиболее стабильных (не зависящих от прочих факторов) участках спектральной кривой отражения сосудистых растений. Плотность растительности (NDVI) в определенной точке изображения равна разнице интенсивностей отраженного света в красном и инфракрасном диапазоне, деленной на сумму их интенсивностей и вычисляется по формуле: $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$, где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра, RED – отражение в красной области спектра. В красной области спектра (0.6–0.7 мкм) лежит максимум поглощения солнечной радиации хлорофиллом высших сосудистых растений, а в инфракрасной области (0.7–1.0 мкм) находится область максимального отражения клеточных структур листа. То есть высокая фотосинтетическая активность (связанная, как правило, с густой растительностью) ведет к меньшему отражению в красной области спектра и большему в инфракрасной. Отношение этих показателей друг к другу позволяет отделять растительные от других природных объектов. Использование нормализованной разности при расчете NDVI между минимумом и максимумом отражений увеличивает точность измерения, позволяет уменьшить влияние таких явлений как различия в освещенности снимка, облачности, дымки, поглощение радиации атмосферой.

Для анализа вегетационного индекса использовались данные спектрорадиометра MODIS спутника дистанционного зондирования земли Terra/NASA модели MOD13C2 версии 6.1 для среднемесячных значений с разрешением $CMG 0.05^\circ \times 0.05^\circ$ (около 5×5 км) за летний период 2000–2022 гг. Данные модели предоставлены центром обработки данных по наблюдению за Землей (LP DAAC) (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v061/>). Был обработан ежемесячный продукт модели MOD13C2, который состоит из ежедневных значений, полученных при безоблачных пространственных снимках. Ежемесячные значения NDVI были осреднены за летний период. Согласно (Титкова и др., 2020), в тундре ЕТР и ЗС при разреженной растительности значения NDVI составляют 0.5–0.6. При продвижении на юг и увеличении густоты растительности NDVI растет до 0.7 в зоне лесотундры до 0.76 в северной тайге и достигает своего максимума 0.85 в южной тайге и в подтаежных лесах 0.82. В широколиственных лесах NDVI – около 0.73. Далее на юг, при увеличении радиационного баланса вегетационный индекс уменьшается в зоне лесостепей до 0.69, а в степях до 0.51. В полупустыне на ЕТР при разреженной и сухой растительности NDVI падает до 0.23.

Таблица 2. Средние климатические параметры и их стандартное отклонение для равнинных ландшафтных зон/подзон Европейской территории России и Западной Сибири за период 2000–2022 гг. по квазиоднородным климатическим регионам

Регион	Ландшафтная зона/подзона	Кол-во станций	$T_{\text{июль}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{год}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{январь}}, ^\circ\text{C}$	$\Sigma T_{10}, ^\circ\text{C}$	$\Sigma P, \text{мм}$	$K_{\text{увл}}$
Атлантическая Арктика	арктические пустыни	3	3.3 ± 1.3	-9.7 ± 3.3	-18.7 ± 4.2	164 ± 54	217 ± 91	0.70 ± 0.27
Европейский Север	тундра	11	12.1 ± 2.0	0.1 ± 1.3	-9.7 ± 3.1	657 ± 75	433 ± 92	1.00 ± 0.22
	лесотундра	5	13.5 ± 2.1	-0.6 ± 1.2	-13.3 ± 4.0	848 ± 68	479 ± 80	1.00 ± 0.21
	северная тайга	18	15.8 ± 2.0	1.1 ± 1.1	-12.2 ± 3.7	1271 ± 61	561 ± 93	1.01 ± 0.20
Север Западной Сибири	тундра	6	10.2 ± 2.5	-7.3 ± 2.5	-21.5 ± 4.8	465 ± 81	337 ± 98	0.87 ± 0.25
	лесотундра	6	15.0 ± 2.2	-5.8 ± 1.7	-24.3 ± 5.4	1010 ± 37	481 ± 102	0.95 ± 0.24
	северная тайга	8	16.5 ± 2.2	-4.0 ± 1.6	-24.3 ± 5.6	1319 ± 9	541 ± 101	0.98 ± 0.20
Северо-запад ЕТР	средняя тайга	10	17.9 ± 2.0	3.3 ± 0.8	-10.5 ± 3.4	1805 ± 14	643 ± 84	0.97 ± 0.16
	южная тайга	11	18.6 ± 2.0	4.5 ± 0.6	-8.8 ± 3.2	2087 ± 26	663 ± 92	0.92 ± 0.15
Северо-восток ЕТР	средняя тайга	6	17.9 ± 2.1	1.7 ± 0.9	-13.9 ± 3.3	1704 ± 19	664 ± 98	1.03 ± 0.18
	южная тайга	3	18.8 ± 1.9	3.1 ± 1.1	-12.1 ± 3.4	2035 ± 130	609 ± 108	0.85 ± 0.14
Юго-запад ЕТР	подтаежная (хвойно-широколиственная)	7	19.1 ± 2.0	5.9 ± 0.6	-6.9 ± 3.3	2354 ± 30	677 ± 110	0.88 ± 0.16
	широколиственная	15	20.2 ± 1.9	6.3 ± 0.7	-7.6 ± 3.2	2624 ± 31	587 ± 110	0.71 ± 0.14
	лесостепь	6	21.1 ± 1.8	7.6 ± 0.7	-6.3 ± 3.2	2943 ± 131	554 ± 107	0.62 ± 0.13
Юго-восток ЕТР	подтаежная (хвойно-широколиственная)	12	19.3 ± 1.8	3.6 ± 0.9	-12.0 ± 3.6	2226 ± 67	537 ± 91	0.72 ± 0.13
	широколиственная	4	20.0 ± 1.7	4.4 ± 0.6	-11.7 ± 3.6	2486 ± 42	521 ± 87	0.65 ± 0.13
	лесостепь	6	19.7 ± 1.8	4.0 ± 1.0	-12.3 ± 3.6	2438 ± 101	517 ± 102	0.67 ± 0.14
Северная часть лесной зоны ЗС	средняя тайга	6	17.8 ± 1.8	0.4 ± 1.1	-18.4 ± 4.9	1803 ± 35	601 ± 96	0.92 ± 0.17
Южная часть лесной зоны ЗС	южная тайга	5	18.1 ± 1.6	0.7 ± 1.0	-18.8 ± 5.1	1922 ± 2	531 ± 83	0.77 ± 0.13
	подтаежная	11	18.3 ± 1.6	1.9 ± 0.9	-16.4 ± 4.5	2060 ± 38	528 ± 91	0.74 ± 0.15
Юг ЕТР	степь	28	22.9 ± 1.7	8.7 ± 0.8	-5.7 ± 3.3	3264 ± 612	487 ± 103	0.52 ± 0.11
	полупустыня	14	25.7 ± 1.5	11.5 ± 0.8	-2.2 ± 2.6	3960 ± 141	356 ± 84	0.33 ± 0.08
Степная часть ЗС	лесостепь	15	18.7 ± 1.5	2.2 ± 0.9	-16.8 ± 4.4	2213 ± 21	540 ± 91	0.78 ± 0.15
	степь	11	19.0 ± 1.2	2.5 ± 1.0	-16.9 ± 4.5	2300 ± 19	476 ± 89	0.63 ± 0.13

Таблица 3. Тренды климатических параметров за 10 лет для равнинных ландшафтов Европейской территории России и Западной Сибири за период 2000–2022 гг. по квазиоднородным климатическим регионам

Регион	Ландшафтная зона/ подзона	$T_{\text{июль}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{год}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{январь}}, ^\circ\text{C}$	$\Sigma T10^\circ, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм}$	$K_{\text{увл}}$	NDVI
Атлантическая Арктика	арктические пустыни	0.70	0.58	1.90	5.41	-11.16	-0.478	–
Европейский Север	тундра	0.63	0.29	0.05	7.50	-14.40	-0.053	0.017
	лесотундра	0.46	0.49	0.06	6.77	-30.26	-0.102	0.018
	северная тайга	0.04	0.52	0.23	6.09	24.19	0.031	0.016
Север Западной Сибири	тундра	1.01	1.02	1.67	8.08	-12.07	-0.009	0.020
	лесотундра	0.67	1.62	2.31	7.55	74.85	0.143	0.022
	северная тайга	0.64	1.19	1.32	6.11	0.75	-0.011	0.020
Северо-запад ЕТР	средняя тайга	-0.53	0.45	0.38	1.39	32.42	0.047	0.019
	южная тайга	-0.76	0.39	0.03	1.37	36.70	0.046	0.015
Северо-восток ЕТР	средняя тайга	-0.27	0.25	-0.18	1.93	24.83	0.028	0.019
	южная тайга	-0.55	-0.26	-0.50	-12.99	-22.17	-0.009	0.025
Юго-запад ЕТР	подтаежная (хвойно-широколиственная)	-0.64	0.42	0.14	3.02	21.61	0.022	0.007
	широколиственная	-0.31	0.31	-0.02	3.09	-30.91	-0.043	0.022
	лесостепь	-0.03	0.57	0.16	13.05	-5.30	-0.024	0.004
Юго-восток ЕТР	подтаежная (хвойно-широколиственная)	-0.28	0.00	-0.42	-6.70	-18.19	-0.009	0.025
	широколиственная	0.03	0.21	-0.57	4.22	-24.23	-0.038	0.000
	лесостепь	0.29	0.46	-1.12	7.08	-22.79	-0.057	-0.016
Северная часть лесной зоны ЗС	средняя тайга	0.27	0.45	0.41	3.51	-17.17	-0.036	0.020
Южная часть лесной зоны ЗС	южная тайга	0.23	0.35	0.39	0.19	-6.69	-0.009	0.014
	подтаежная	0.41	0.32	0.12	3.75	-21.00	-0.036	0.012
Юг ЕТР	степь	-0.19	-1.16	-4.12	13.80	-22.04	-0.040	-0.021
	полупустыня	0.54	0.47	0.42	14.09	-18.06	-0.027	0.000
Степная часть ЗС	лесостепь	0.41	0.15	-0.09	2.38	-38.27	-0.057	0.012
	степь	0.55	-0.01	-0.34	1.07	-18.45	-0.018	-0.010

Примечание. Значимые тренды выделены жирным шрифтом.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Средние климатические характеристики ландшафтов в современный период

Характер растительного покрова во многом определяется климатическими условиями. Сравнение полученных значений климатических параметров с характеристиками природных равнинных экосистем (см. табл. 1) показывает, что в условиях современного потепления температуры июля в тундре соответствуют интервалу июльских температур, определенных до начала потепления. В лесотундровой зоне как на ЕТР,

так и Западной Сибири, июльские температуры на 0.2–1.7°C превышают ранее определенные значения. В ландшафтах северной тайги в европейской части среднеиюльские температуры соответствуют верхней границе ранее определенного диапазона (см. табл. 2), а в Западной Сибири превышают это значение на 0.8°C. В средней и южной тайге эти температуры в современную эпоху не превышают ранее полученных значений, но практически вплотную приблизились к верхней границе диапазона. То же можно сказать и о подтаежной (хвойно-широколиственной) зоне и зоне широколиственных ле-

сов. В лесостепной зоне июльские температуры еще соответствуют ранее определенным значениям, достигая границы диапазона на европейской части. На юге ЕТР эти температуры находятся в определенных ранее пределах, а на юге ЗС оказываются ниже этих значений. Противоположные тенденции можно отметить в полупустынной зоне юга России, где средне июльская температура превышает верхнюю границу ранее определенного диапазона.

Летнее потепление отражает также сумма активных температур, которая в тундре на ЕТР уже соответствует значениям, характерным для лесотундры, а в ЗС остается в пределах ранее определенных значений (см. табл. 1 и 2), что связано, по-видимому, с преобладанием здесь многолетнемерзлых пород, которые замедляют повышение температуры. В лесотундре суммы активных температур уже соответствуют значениям для северной тайги, как было отмечено в (Виноградова и др., 2015). На севере таежной зоны суммы активных температур соответствуют ранее полученным значениям, а в средней тайге превышают эти значения. На северо-западе ЕТР в южной тайге суммы активных температур выше пороговых значений, а на северо-востоке ЕТР и в Западной Сибири находятся вблизи верхней границы значений для этих ландшафтов. В подтаежной зоне этот параметр превышен только на юго-западе ЕТР, а для широколиственных лесов он оказывается даже ниже установленного. В лесостепной и степной зонах суммы активных температур соответствуют ранее установленным, а в полупустыне на юге ЕТР они значительно превышают эти значения.

Для современного периода зимние (январские) температуры на ЕТР для тундровых, лесотундровых, таежных, лесостепных и степных ландшафтов соответствуют установленным значениям, а в Западной Сибири оказываются немного ниже. В подтаежной (хвойно-широколиственной) зоне температуры января соответствуют установленным значениям, а для зоны широколиственных лесов они ниже установленных. В полупустынной зоне на юге ЕТР январские температуры в современном климате оказываются выше ранее установленных (см. табл. 1 и 2).

Среднегодовые температуры на севере ЕТР и в Западной Сибири, в тундровой и лесотундровой зонах находятся в установленных диапазонах, а в северо-таежной зоне находятся на верхней границе диапазона или превышают его (см. табл. 1 и 2). На северо-западе ЕТР среднегодовые температуры оказываются выше ранее установленных, а на северо-востоке и в Западной Сибири соответствуют им. В южной тайге, подтаежной, лесостепной и степной зонах среднегодовая температура понижается в восточном направлении, оставаясь в установлен-

ных границах. В зоне широколиственных лесов она ниже установленных значений. Среднегодовые температуры оказываются превышены в полупустынной зоне на юге европейской части страны.

Годовая сумма осадков для северных ландшафтов тундры, лесотундры и северной тайги находится на уровне нижней границы, для тундры и лесотундры даже ниже ранее определенных значений (см. табл. 1 и 2). Такая же ситуация характерна для средней и южной тайги и подтаежной зоны. Причем в Западной Сибири годовая сумма осадков меньше, чем в европейской части. В лесостепной, степной зонах и зоне широколиственных лесов количество осадков соответствует ранее установленным значениям. В полупустыне количество осадков приближается к нижней границе диапазона.

Уменьшение суммы осадков и повышение суммы активных температур в тундре и лесотундре привело к снижению коэффициента увлажнения, который на севере России стал соответствовать зоне северной тайги. В большинстве остальных ландшафтных зон коэффициент увлажнения находится вблизи нижней границы ранее установленного диапазона, то есть за счет роста температур условия становятся суше. В зонах средней, южной тайги, подтаежной и широколиственных лесов условия увлажнения близки к оптимальным, а увлажнение в лесостепной, степной и полупустынных зонах недостаточно. С запада на восток нарастает засушливость во всех ландшафтных зонах/подзонах.

Тренды климатических параметров

Тренды климатических параметров за 2000–2022 гг. в ландшафтных зонах/подзонах севера ЕТР и ЗС демонстрируют рост июльских, январских и среднегодовых температур, а также суммы активных температур выше $+10^{\circ}\text{C}$. На европейской части в тундре и лесотундре и в тундре Западной Сибири положительные тренды температуры сопровождаются отрицательным трендом осадков (см. табл. 3), что уменьшает переувлажнение и благоприятно влияет на растительность в субарктических ландшафтах. В зоне северной тайги тренды осадков положительны. На северо-западе и северо-востоке ЕТР, как уже отмечалось в (Титкова, Виноградова, 2019), наблюдается отрицательный тренд июльских температур в зонах средней и южной тайги, но за исключением южной тайги на северо-востоке ЕТР тренды годовых и январских температур, суммы активных температур и осадков здесь положительны.

На северо-востоке ЕТР в подзоне южной тайги тренды всех рассматриваемых климатических параметров отрицательны (см. табл. 3).

В лесной зоне Западной Сибири климатические тренды летних, зимних, годовых температур и суммы активных температур положительны, а тренд осадков отрицателен, что способствует уменьшению коэффициента увлажнения.

На юге ЕТР в зоне хвойно-широколиственных и широколиственных лесов июльские температуры также понижаются, хотя, по данным (Доклад ..., 2023), средние за лето температуры растут. На юго-востоке ЕТР понижаются также и январские температуры. Но тренд среднегодовых температур и суммы активных в основном положительный (Виноградова и др., 2015), за исключением хвойно-широколиственных лесов. На западе территории тренды осадков в этой зоне отрицательны (см. табл. 3).

В лесостепной зоне отмечается отрицательный тренд осадков, который увеличивается в восточной части. Сумма активных температур увеличивается, также растут среднегодовые температуры. На юго-востоке ЕТР и в Западной Сибири наблюдаются отрицательные тренды январской температуры. Для степной зоны на юге ЕТР и ЗС характерны отрицательные тренды осадков и температуры января и положительный тренд суммы активных температур. На ЕТР июльские температуры уменьшаются, а в Западной Сибири растут (см. табл. 3).

В полупустынных ландшафтах юга ЕТР в последние десятилетия отмечаются положительные тренды температур, суммы активных температур и отрицательные тренды осадков, что приводит к дальнейшему увеличению засушливости этих ландшафтов (см. табл. 3).

Реакция растительности на изменение климатических характеристик

Реакция растительного покрова на современные изменения климата оценивалась с использованием вегетационного индекса NDVI. Потепление климата начале XXI в. отразилось в трендах вегетационного индекса. Так, в субарктических и северных бореальных ландшафтах положительный тренд суммы активных температур и отрицательный тренд осадков привели к положительному тренду вегетационного индекса в среднем около 0.02/10 лет, а местами до 0.03/10 лет (см. рис. 2, табл. 3). В свою очередь, в работе (Высоцкая, Медведков, 2022) отмечается увеличение NDVI в тундровых, лесотундровых и северотаежных районах Средней Сибири и “позеленения” курумов в районе средней тайги за счет увеличения площади мохового покрова, разрастания кустарников, подроста мелколиственных пород и появления разреженного древостоя. В криолитозоне рост среднегодовой температуры пород и увеличение глубины сезонного протаивания создают благоприятные усло-

вия для растительности (Васильев и др., 2020), что подтверждается положительными трендами NDVI. По исследованиям (Замолотчиков, 2011; Титкова, Виноградова, 2015), уровень воздействия изменения климата на растительность тундр следует считать критическим, поскольку для возврата в прежнее состояние недостаточно вернуть климатические характеристики к их исходным значениям (Раунер, 1972). Здесь увеличение вегетационного индекса сопровождается разнонаправленным трендом альбедо, что говорит об увеличении биомассы, а также появлением видов, ранее не встречавшихся на данной территории.

Наибольший рост NDVI в среднем 0.025/10 лет отмечается на юге бореальных ландшафтов (в подтаежной и широколиственной зоне), а фрагментарно до 0.08/10 лет, как отклик на рост среднегодовых температур и суммы активных температур при умеренном увлажнении. Но в этих ландшафтах, как отмечалось в (Зеликсон, 2010; Семенов, 2012), изменения могут проявиться прежде всего в составе трав и подростов деревьев, так как реальные сдвиги границ хвойно-широколиственных лесов и их ареалов достаточно малы. В работе (Сергиенко, Константинов, 2016) говорится, что в бореальных лесах таежной зоны из-за угнетения более холодолюбивых видов темнохвойной тайги можно ожидать увеличение количества березы и осии-

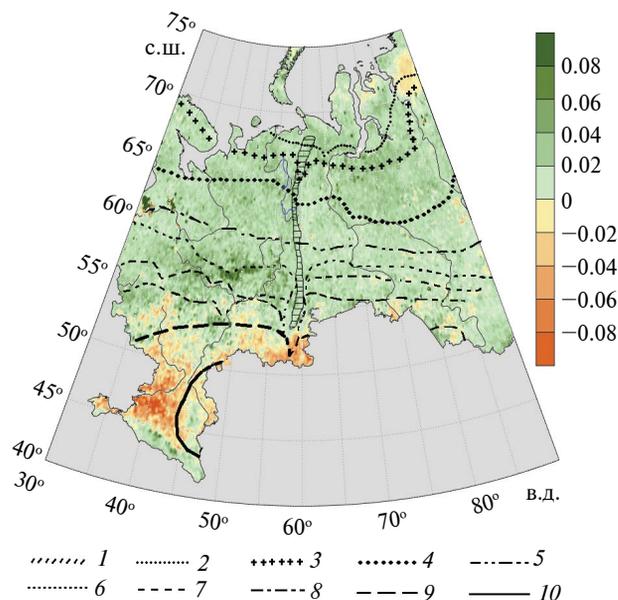


Рис. 2. Тренд NDVI/10 лет за летний период 2000–2022 гг. Тренд значим при значениях больше (меньше) 0.02/10 лет. Границы ландшафтных зон/подзон: 1 – арктические, 2 – тундровые, 3 – лесотундровые, 4 – северотаежные, 5 – среднетаежные, 6 – южно-таежные, 7 – подтаежные, 8 – широколиственные леса, 9 – лесостепные, 10 – степные типичные и сухостепные.

ны, а около южной границы хвойно-широколиственных лесов уменьшения количества ели. В подзоне широколиственных лесов прогнозируется возобновление древесных пород – дуба, липы, граба, бука (Сергиенко, Константинов, 2016).

На юге равнинной части России рост температурных характеристик и уменьшение годовых осадков привели к падению коэффициента увлажнения. Вегетационный индекс в степной зоне, при этих условиях, снижается в среднем на 0.01–0.02/10 лет, а местами на величину 0.06/10 лет. Уязвимость степей юга ЕТР к изменению климата связана во многом с пожарами и засухами, а также с биогенными факторами. Согласно (Фролова и др., 2020), для степной зоны ЕТР характерно усиление аридизации для биомов среднедонских разнотравно-дерновинно-злаковых степей и доно-волжских дерновиннозлаковых степей, а также прикаспийских пустынно-степных биомов. Иссушение степей и расширение пустынь приведут к сокращению продуктивности этих экосистем (Третий ..., 2022.) Очаги снижения NDVI в степных и сухостепных ландшафтах в нижнем течении Волги могут быть также сопряжены с трансформацией растительности в результате перевыпаса (Золотокрылин и др., 2015).

Предпосылки возможных изменений границ ландшафтных зон

Рассмотренные выше современные изменения климатических условий создают предпосылки возможных изменений границ ландшафтных зон. Как показано на рис. 3, такие изменения наблюдаются на большей части равнинных территорий Европейской России и Западной Сибири и для почти для половины метеостанций (табл. 4).

Результаты проведенных исследований показывают, что современные климатические условия для семи метеостанций тундровой зоны (Национальный ..., 2007) уже соответствуют условиям лесотундровой зоны (см. рис. 3, табл. 4). Эти метеостанции в основном расположены на Европейском Севере и севере Западной Сибири. В свою очередь современные климатические условия на восьми метеостанциях, расположенных в основном вдоль границы лесотундры и северной тайги, уже соответствуют параметрам северной тайги, что связано, в основном, с ростом температуры (см. табл. 4, рис. 3).

Для 12 метеостанций, расположенных в зоне северной тайги, за счет роста температуры и осадков современные климатические условия больше похожи на условия, характерные для средней тайги, а на большей части среднетаежной зоны (24 метеостанции) условия климата соответствуют

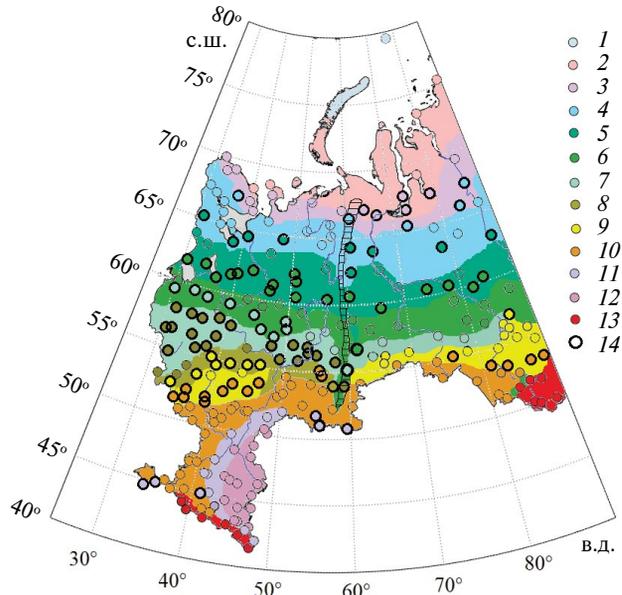


Рис. 3. Климатические предпосылки возможных изменений в ландшафтных зонах/подзонах равнин России по метеостанциям. Цвет метеостанции показывает ее соответствие ландшафтной зоне до 2000 г.: 1 – арктические пустыни, 2 – тундра, 3 – лесотундра, 4 – северная тайга, 5 – средняя тайга, 6 – южная тайга, 7 – подтаежная зона, 8 – широколиственно-лесная, 9 – лесостепь, 10 – степь, 11 – сухая степь, 12 – полупустыня, 13 – высокогорные ландшафты, 14 – климатические показатели в современном климате (2000–2020 гг.) не соответствуют ландшафтной зоне. Обозначения ландшафтных зон см. на рис. 1.

южнотаежной зоне (см. табл. 4, рис. 3). Эти метеостанции расположены как на ЕТР, так и в ЗС. По климатическим характеристикам 14 метеостанций, расположенных в зоне южной тайги на ЕТР, могут относиться к подтаежной зоне и зоне хвойно-широколиственных лесов. За счет отрицательных трендов осадков в современном климате для 2 метеостанций, расположенных в зоне широколиственных лесов, климатические условия соответствуют лесостепной зоне, а для 10 метеостанций – степной зоне (см. рис. 3, табл. 4).

В лесостепной зоне продолжается рост температуры и уменьшение количества осадков, в результате чего климатические условия 24 метеостанций уже могут быть отнесены к степной зоне, что было отмечено в (Виноградова и др., 2015). Для степной зоны на юге и юго-востоке европейской части отрицательные тренды годовых осадков приводят к тому, что на 7 станциях климатические показатели соответствуют сухостепной зоне. Эти станции расположены вблизи границы степной и сухостепной зон (см. рис. 3). Климатические условия для 5 метеостанций, расположенных в сухостепной зоне, уже соответствуют условиям полупустыни, для 4 станций, наоборот, климатические условия больше подходят для степи (см. табл. 4).

Таблица 4. Количество метеостанций, по климатическим параметрам соответствующих ландшафтным зонам/подзонам до начала потепления и в современном климате

Ландшафтная зона/подзона	Количество станций до начала потепления (Национальный ..., 2007)	Возможное количество станций в современный период (2000–2022 гг.)	Число станций, где климатические параметры соответствуют другой ландшафтной зоне/подзоне
арктическая	3	3	–
тундра	21	14	для 7 метеостанций климатические условия соответствуют лесотундре
лесотундра	12	11	для 8 метеостанций климатические условия соответствуют северной тайге
северная тайга	22	19	для 12 метеостанций климатические условия соответствуют средней тайге
средняя тайга	28	16	для 24 метеостанций климатические условия соответствуют южной тайге, а для 1 – подтаежной зоне
южная тайга	25	34	для 14 метеостанций климатические условия соответствуют подтаежной зоне, а для 2 – широколиственной
подтаежная/хвойно-широколиственные леса	34	36	для 17 метеостанций климатические условия соответствуют широколиственной зоне, для 1 – лесостепи, а для 2 – степи
широколиственная	17	29	для 2-х метеостанций климатические условия соответствуют лесостепи, для 10 – степи, а для 2 – подтаежной зоне
лесостепь	26	4	для 24 метеостанций климатические условия соответствуют степи
степь	42	62	для 7 метеостанций климатические условия соответствуют сухой степи, для 4 – широколиственной зоне, а для 1 – подтаежной зоне
сухая степь	19	17	для 5 метеостанций климатические условия соответствуют полупустыне, а для 4 – степи
полупустыня	4	8	–
горные ландшафты	12	12	–
Всего	265	265	127

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изменения климата, произошедшие за два последних десятилетия на равнинных территориях Европейской территории России и Западной Сибири, привели к существенным изменениям климатических характеристик ландшафтных зон, определенных А.Г. Исаченко до начала потепления (Ландшафтная ..., 1988; Национальный ..., 2007). Самые значительные изменения произошли на Европейском Севере, севере Западной Сибири и юге ЕТР.

В лесотундровой зоне Севера России наблюдается положительный тренд суммы активных температур и отрицательный тренд осадков. Коэффициент увлажнения уменьшается. Климатические условия на ряде участков тун-

дры, лесотундры, северной средней и южной тайги, особенно на ЕТР, изменяются и теперь соответствуют более южным ландшафтным зонам/подзонам, что может привести к смещению границ ландшафтных зон/подзон в более высокие широты. Реакция растительности на эти изменения проявляется в росте вегетационного индекса. Эти результаты хорошо согласуются с выводами, полученными в (Arctic ..., 2019; Myers-Smith and Hik, 2018; Pastick et al., 2019), где отмечают “позеленение” Арктической тундры в России, на Аляске и в Канаде и положительные тренды вегетационного индекса, которые в основном связаны с ростом летних температур. Одним из факторов, способствующих наступлению леса на тундру, является деградация вечной мерзлоты, которая

приводит к увеличению растительного покрова и перемещению границ биоклиматических зон к северу (Васильев и др., 2020). Эти процессы наблюдаются на большей части лесотундровой зоны и прилегающих территориях тундры и северной тайги и отмечаются многими авторами (Титкова, Виноградова, 2019; Jia et al., 2003; Kravtsova and Loshkareva, 2013; Kullman et al., 2009).

В южной равнинной части России наблюдаются рост суммы температур выше 10°C и уменьшение суммы годовых осадков и коэффициента увлажнения, что может привести к расширению зоны степей, сухих степей и полупустынь. Отрицательные тренды NDVI за последние десятилетия в этих ландшафтных зонах могут свидетельствовать о том, что эти процессы уже начались.

Произошедшие изменения климатических условий создают предпосылки возможных изменений границ ландшафтных зон, которые могут затронуть большую часть равнинных территорий Европейской России и Западной Сибири, поскольку почти на половине метеостанций современные климатические условия соответствуют более южным или более засушливым ландшафтным зонам. Реакция вегетационного индекса на изменение климатических условий подтверждает полученные выводы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа подготовлена в рамках госзадания Института географии РАН FMWS-2024-0001, 1021051403088-5 и гранта, предоставленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (№ соглашения о предоставлении гранта: 075-15-2022-325).

FUNDING

The work was prepared within the framework of the state task of the Institute of Geography of the Russian Academy of Sciences FMWS-2024-0001, 1021051403088-5 and a grant provided by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Grant agreement no.: 075-15-2022-325).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бажина Е.В., Сторожев В.П., Третьякова И.Н.* Усыхание пихтово-кедровых лесов Кузнецкого Алатау в условиях техногенного загрязнения // *Лесоведение*. 2013. № 2. С. 15–21.
- Базилевич Н.И., Гребенщиков О.С., Тишков А.А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем / ред. Ю.А. Исаков. М.: Наука, 1986. 297 с.
- 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 ее биоты // *Изв. РАН. Сер. геогр.* 2016. № 3. С. 28–39.
- Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., Дроздов Д.С. и др.* Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геокриологического мониторинга в западном секторе Российской Арктики // *Криосфера Земли*. 2020. Т. 24. № 2. С. 15–30.
- Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А.* Динамика увлажнения и теплообеспеченности в переходных ландшафтных зонах по спутниковым и метеорологическим данным в начале XXI века // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2015. Т. 12. № 2. С. 162–172.
- Воронин В.И., Софронов А.П., Морозова Т.И., Осколков В.А., Суховольский В.Г., Ковалёв А.В.* Ландшафтная приуроченность бактериальных болезней темнохвойных лесов хребта Хамар-Дабан (Южное Прибайкалье) // *География и природные ресурсы*. 2019. № 4. С. 56–65. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(56-65\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(56-65))
- Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1009 с.
- Высоцкая А.А., Медведков А.А.* Климатогенное “позеленение” в долине нижнего течения р. Подкаменная Тунгуска // *ИнтерКарто. ИнтерГИС*. 2022. Т. 28. № 1. С. 305–313.
- Гребенюк Г.Н., Кузнецова В.П.* Современная динамика климата и Фенологическая изменчивость северных территорий // *Вестн. Нижневартовского гос. ун-та*. 2014. № 3. С. 223–225.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2016 год. М.: Росгидромет, 2018. 74 с.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Росгидромет, 2023. 104 с.
- Жильцова Е.Л., Анисимов О.А.* Динамика растительности Северной Евразии: анализ современных наблюдений и прогноз на 21 век // *Арктика XXI век. Естественные науки*. 2015. № 2 (3). С. 48–59.
- Замолодчиков Д.Г.* Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учета лесного фонда // *Успехи современной биологии*. 2011. Т. 131. № 4. С. 382–392.
- Зеликсон Э.М., Борисова О.К., Величко А.А.* Растительный покров // *Климаты и ландшафты Северной Евразии в условиях глобального потепления: ретроспективный анализ и сценарии* / ред. А.А. Величко. М.: Геос, 2010. Гл. 8. С. 110–119.

- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Виноградова В.В.* Тренды увлажнения и биофизических параметров засушливых земель европейской части России за период 2000–2014 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 155–161.
- Иванов Н.Н.* Об определении величин испаряемости // Изв. Всесоюзного геогр. общ-ва. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.
- Ландшафтная карта СССР. М-б 1 : 4000000 / ред. А.Г. Исаченко. М., 1988.
- Национальный Атлас России. Ландшафты. 2007. Т. 2 / М-б: 1 : 30000000. 331 с. <https://nationalatlas.ru/tom2/398-399.html>
- Медведков А.А.* Климатогенная динамика ландшафтов сибирской тайги в бассейне Среднего Енисея // География и природные ресурсы. 2018. № 4. С. 122–129.
- Мезенцев В.С.* Водный баланс. Новосибирск, 1973. 229 с.
- Методы оценки последствий изменения климата для физических и биологических систем / ред. С.М. Семенова. М.: Росгидромет, 2012. 512 с.
- Раунер Ю.Л.* Тепловой баланс растительного покрова. Л.: Гидрометеиздат, 1972. 210 с.
- Рябчиков А.М.* Структура и динамика геосферы, ее естественное развитие и изменение человеком. М.: Мысль, 1972. 223 с.
- Сайгин И.А., Барталев С.А., Стыценко Ф.В.* Метод детектирования долгосрочных усыхания темнохвойных лесов России на основе спутниковых данных: матер. 17-й Всерос. открытой конф. “Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса”. М.: ИКИ РАН, 2019. <http://conf.rse.geosmis.ru>
- Сергиенко В.Г.* Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата // Труды Санкт-Петербург. НИИ лесного хозяйства. 2015. № 1. С. 5–19.
- Сергиенко В.Г., Константинов А.В.* Прогноз влияния изменения климата на разнообразие природных экосистем и видов флористических и фаунистических комплексов биоты России // Труды Санкт-Петербург. научно-исслед. ин-та лесного хозяйства. 2016. № 2. С. 29–44.
- Соловьев А.Н.* Климатогенная динамика сезонной активности биоты Востока Русской равнины в XX столетии // Изв. РАН. Сер. геогр. 2007. № 4. С. 54–65.
- 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.
- Титкова Т.Б., Виноградова В.В.* Изменения климата в переходных природных зонах севера России и их проявление в спектральных характеристиках ландшафтов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 5. С. 310–323. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323>
- Титкова Т.Б., Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В.* Спектральный портрет равнинных ландшафтов России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 117–126. <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126>
- Тишков А.А., Белоновская Е.А., Глазов П.М., Кренке А.Н., Титова С.В., Царевская Н.Г., Шматова А.Г.* Антропогенная трансформация арктических экосистем России: подходы, методы, оценки // Арктика: экология и экономика. 2019. № 4 (36). С. 38–51.
- Третий оценочный докл. Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2022. 676 с.
- Фролова Н.Л., Киреева М.Б., Харламов М.А., Самсонов Т.Е., Энтин А.Л., Лурье И.К.* Картографирование современного состояния и трансформации водного режима рек Европейской территории России // Геодезия и картография. 2020. № 7. С. 14–26.
- Чебакова Н.М., Бажина Е.В., Парфенова Е.И., Сенашова В.А.* В поисках фактора “икс”: обзор публикаций по проблеме усыхания темнохвойных лесов Северной Евразии // Метеорология и гидрология. 2022. № 5. С. 123–140.
- Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В.* Современное изменение климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского Севера России) // Географическая среда и живые системы. 2022. № 1. С. 6–30.
- Anisimov O., Kokorev V., Zhiltcova Y.* Arctic Ecosystems and their Services under Changing Climate: Predictive-Modeling Assessment // Geographical Review. 2017. Vol. 107. № 1. P. 108–124. <https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2016.12199.x>
- Arctic Report Cards, 2019 / J. Richter-Mange, M.L. Druckenmiller, M. Jeffries (Eds.). 99 p. <http://www.arctic.noaa.gov/Report-Card>
- Brazhnik K., Hanley C., Shugart H.H.* Simulating changes in fires and ecology of the 21st century Eurasian boreal forests of Siberia // Forests. 2017. Vol. 8. № 2. 49 p. <https://doi.org/10.3390/f8020049>
- Fedorov N.I., Martynenko V.B., Zhigunova S.N., Mikhailenko O.I., Shendel' G.V., Naumova L.G.* Changes in the Distribution of Broadleaf Tree Species in the Central Part of the Southern Urals since the 1970s // Russian J. of Ecology. 2021. Vol. 52. P. 118–125. <https://doi.org/10.1134/S1067413621020053>
- IPCC. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / H.-O. Pörtner,

- D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (Eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2022.
- Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A.* Greening of arctic Alaska, 1981–2001 // *Geophys. Res. Let.* 2003. Vol. 30. № 20. 2067 p.
<https://doi.org/10.1029/2003GL018268>
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Golyukov A.S., Ranson K.J., Yagunov M.N.* Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia // *Forest Ecology and Management*. 2017. Vol. 384. P. 191–199.
- 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. № 4. P. 303–311.
<https://doi.org/10.1134/S1067413613040085>
- Kullman L., Oberg L.* Post Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective // *J. of Ecology*. 2009. Vol. 97. № 3. P. 415–429.
- Myers-Smith I.H., Hik D.S.* Climate warming as a driver of tundra shrubline advance / R. Aerts (Ed.) // *J. of Ecology*. 2018. Vol. 106. P. 547–560.
- Pastick N.J., Jorgenson M.T., Goetz S.J., Jones B.M., Wylie B.K., Minsley B.J., Genet H., Knight J.F., Swanson D.K., Jorgenson J.C.* Spatiotemporal remote sensing of ecosystem change and causation across Alaska // *Glob. Change Biol.* 2019. Vol. 25. P. 1171–1189.
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Bazhina E.V., Soja A.J., Groisman P.Ya.* Droughts are not the likely primary cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* forest dieback in the South Siberian Mountains // *Forests*. 2022. Vol. 13. Art. 1378.
<https://doi.org/10.3390/f13091378>
- Vinogradova V., Titkova T., Zolotokrylin A.* How climate change is affecting the transitional natural zones of the Northern and Arctic regions of Russia // *Polar Sci.* 2021. Vol. 29. P. 100652.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100652>
- WMO, 2021: State of the Global Climate 2020. WMO, 2021. № 1264. 56 p.
https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10618

Climatic Prerequisites for Changes of Zonal and Subzonal Landscape Boundaries in European Russia and Western Siberia

V. V. Vinogradova^{a, b, *} and T. B. Titkova^{a, **}

^a*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

^b*HSE University, Moscow, Russia*

**e-mail: vvvinog@yandex.ru*

***e-mail: titkova@igras.ru*

Global warming is manifesting itself in varying degrees of intensity in the changing landscapes of the Russian plains. Productivity, biomass and boundaries of vegetation vary according to the dynamics of heat supply and humidification. A shift in landscape zone boundaries may be a consequence of global warming in the last two decades. This work evaluates changes in the climatic characteristics of natural landscapes in the Russian plains. The studies were conducted in the European part of Russia and Western Siberia, from arctic to semi-desert landscapes. Data from 265 weather stations on the territory of Russia were used for the period 2000–2022, as well as the normalised vegetation index NDVI for the summer period (quantitative indicator of photosynthetic active biomass). The following climatic parameters were taken into account: mean annual temperature, temperature in January and July, sum of temperatures above 10°C, annual precipitation, humidification coefficient and their means and standard deviations and trends for the period 2000–2022. It was found that a positive trend of the sum of active temperatures and a negative trend of precipitation are observed in the forest tundra zone. The humidification coefficient is decreasing. Climatic conditions are changing at several sites, such as tundra, forest tundra, northern and middle taiga, and now correspond to more southern landscape zones. This creates favourable conditions for changes in vegetation and is reflected in the increase in NDVI, which may lead to a shift in the boundaries of landscape zones to higher latitudes. In southern Russia, an increase in the sum of active temperatures and drainage of the territory is observed, which is reflected in a decrease in NDVI and can lead to an expansion of steppe, dry steppe and semi-desert zones. The response of vegetation cover to climate change is confirmed by changes in the normalised vegetation index.

Keywords: landscape zones and subzones, climate changes, heat supply, temperature, sum of active temperatures, precipitation, humidification, Normalized Difference Vegetation Index NDVI

REFERENCES

- Anisimov O., Kokorev V., Zhiltcova Y. Arctic Ecosystems and their Services under Changing Climate: Predictive-Modeling Assessment. *Geogr. Rev.*, 2017, vol. 107, no. 1, pp. 108–124.
<https://doi.org/10.1111/j.1931-0846.2016.12199.x>
- Arctic Report Cards 2019*. Richter-Mange J., Druckenmiller M.L., Jeffries M., Eds. 2019. Available at: <https://arctic.noaa.gov/Report-Card/Report-Card-2019> (accessed: 29.05.2024).
- Bazhina E.V., Storozhev E.V., Storozhev V.P., Tret'yakova I.N. Drying of fir and cedar forests of Kuznetsk Alatau under conditions of technogenic pollution. *Lesoved.*, 2013, no. 2, pp. 15–21. (In Russ.).
- Bazilevich N.I., Grebenshchikov O.S., Tishkov A.A. *Geograficheskie zakonomernosti struktury i funkcionirovaniya ekosistem* [Geographic Patterns of Ecosystem Structure and Functioning]. Isakov Yu.A., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1986. 297 p.
- Belonovskaya E.A., Tishkov A.A., Vaisfel'd M.A., Glazov P.M., Krenke A.N., Morozova O.V., Pokrovskaya I.V., Tsarevskaya N.G., Tertitskii G.M. “Greening” of the Russian Arctic and current trends in changes in its biota. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2016, no. 3, pp. 28–39. (In Russ.).
- Brazhnik K., Hanley C., Shugart H.H. Simulating changes in fires and ecology of the 21st century Eurasian boreal forests of Siberia. *Forests*, 2017, vol. 8, no. 2, art. 49.
<https://doi.org/10.3390/f8020049>
- Chebakova N.M., Bazhina E.V., Parfenova E.I., Senashova B.A. In Search of an X Factor: A Review of Publications on the Issue of Dark-needled Forest Decline/Dieback in Northern Eurasia. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2022, vol. 47, pp. 405–417.
<https://doi.org/10.3103/S1068373922050090>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2016 god* [Report on Climate Features on the Territory of Russian Federation in 2016]. Moscow: Rosgidromet, 2018. 74 p.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2022 god* [Report on Climate Features on the Territory of Russian Federation in 2022]. Moscow: Rosgidromet, 2023. 104 p.
- Fedorov N.I., Martynenko V.B., Zhigunova S.N., Mikhailenko O.I., Shendel' G.V., Naumova L.G. Changes in the Distribution of Broadleaf Tree Species in the Central Part of the Southern Urals since the 1970s. *Russ. J. Ecol.*, 2021, vol. 52, pp. 118–125.
<https://doi.org/10.1134/S1067413621020053>
- Frolova N.L., Kireeva M.B., Kharlamov M.A., Samsonov T.E., Entin A.L., Lurie I.K., Mapping the current state and transformation of the water regime of rivers in the European territory of Russia. *Geodeziya Cartogr.*, 2020, no. 7, pp. 14–26. (In Russ.).
- Grebenyuk G.N., Kuznetsova V.P. Modern climate dynamics and phenological variability of northern territories. *Vestn. Nizhnevart. Gos. Univ.*, 2014, no. 3, pp. 223–225. (In Russ.).
- IPCC. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Pörtner H.-O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Lösschke S., Möller V., Okem A., Rama B., Eds. CUP, 2022.
- Ivanov N.N. Determination of evaporation values. *Izv. Vsesoyuzn. Geogr. Obshch.*, 1954, vol. 86, no. 2, pp. 189–196. (In Russ.).
- Jia G.J., Epstein H.E., Walker D.A. Greening of arctic Alaska, 1981–2001. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, no. 20, art. 2067.
<https://doi.org/10.1029/2003GL018268>
- Kharuk V.I., Im S.T., Petrov I.A., Golyukov A.S., Ranson K.J., Yagunov M.N. Climate-induced mortality of Siberian pine and fir in the Lake Baikal Watershed, Siberia. *For. Ecol. Manag.*, 2017, vol. 384, pp. 191–199.
- Kravtsova V.I., Loshkareva A.R. Dynamics of vegetation in the tundra-taiga ecotone on the Kola Peninsula depending on climate fluctuations. *Russ. J. Ecol.*, 2013, vol. 4, pp. 303–311.
<https://doi.org/10.1134/S1067413613040085>
- Kullman L., Oberg L. Post Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: A landscape ecological perspective. *J. Ecol.*, 2009, vol. 97, no. 3, pp. 415–429.
- Landshaftnaya karta SSSR. Masshtab 1:4000000* [Landscape Map of the USSR. Scale 1:4000000]. Isachenko A.G., Ed. Moscow, 1988.
- Medvedkov A.A. Climatogenic dynamics of Siberian taiga landscapes in the Middle Yenisei basin. *Geogr. Prir. Resur.*, 2018, no. 4, pp. 122–129. (In Russ.).
- Metody otsenki posledstviya izmeneniya klimata dlya fizicheskikh i biologicheskikh sistem* [Methods for Assessing Climate Change Impacts on Physical and Biological Systems]. Semenov S.M., Ed. Moscow: Rosgidromet, 2012. 512 p.
- Mezentsev V.S. *Vodnyi balans* [Water Balance]. Novosibirsk, 1973. 229 p.
- Myers-Smith I.H., Hik D.S. Climate warming as a driver of tundra shrubline advance. *J. Ecol.*, 2018, vol. 106, pp. 547–560.
- Natsional'nyi Atlas Rossii. Landshafty. T. 2. Masshtab 1:30000000* [National Atlas of Russia. Landscapes. Vol. 2. Scale 1:30000000]. 2007. Available at: <https://national-atlas.ru/tom2/331.html> (accessed: 30.05.2024).
- Pastick N.J., Jorgenson M.T., Goetz S.J., Jones B.M., Wylie B.K., Minsley B.J., Genet H., Knight J.F., Swanson D.K., Jorgenson J.C. Spatiotemporal remote sensing of ecosystem change and causation across Alaska. *Glob. Change Biol.*, 2019, vol. 25, pp. 1171–1189.
- Rauner Yu.L. *Teplivoi balans rastitel'nogo pokrova* [Heat Balance of Vegetation Cover]. Leningrad: Rosgidromet, 1972. 210 p.
- Ryabchikov A.M. *Struktura i dinamika geosfery, ee estestvennoe razvitiye i izmeneniye chelovekom* [The Structure and Dynamics of the Geosphere, Its Natural Development and Changes by Man]. Moscow: Mysl' Publ., 1972. 223 p.

- Saigin I.A., Bartalev S.A., Stytsenko F.V. Method for detecting long-term decline of dark coniferous forests in Russia based on satellite data. In *Materialy 17-i Vserossiiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* [Proc. of the 17th All-Russian Open Conf. "Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space"]. Moscow: IKI RAS, 2019. (In Russ.).
- Sergienko V.G. Dynamics of the boundaries of forest growth zones in Russia under climate change conditions. *Tr. S.-Peterb. NII Lesn. Khoz.*, 2015, no. 1, pp. 5–19. (In Russ.).
- Sergienko V.G., Konstantinov A.V. Forecast of influence of climate change on ecosystems and natural diversity species of Russian flora and fauna biotic complexes. *Tr. S.-Peterb. NII Lesn. Khoz.*, 2016, no. 2, pp. 29–44. (In Russ.).
- Shpolyanskaya N., Osadchay G., Malkova G. Modern climate change and permafrost reaction (on the example of western Siberia and the European north of Russia). *Geogr. Sreda Zhivye Sistemy*, 2022, no. 1, pp. 6–30. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30>
- Solov'ev A.N. Climatogenic dynamics of seasonal activity of the biota of the East of the Russian Plain in the 20th century. *Izv. Akad. Nauk, Ser. Geogr.*, 2007, no. 4, pp. 54–65. (In Russ.).
- Tchebakova N.M., Parfenova E.I., Bazhina E.V., Soja A.J., Groisman P.Ya. Droughts Are Not the Likely Primary Cause for *Abies sibirica* and *Pinus sibirica* Forest Dieback in the South Siberian Mountains. *Forests*, 2022, vol. 13, art. 1378.
<https://doi.org/10.3390/f13091378>
- Tishkov A.A., Belonovskaya E.A., Glazov P.M., Krenke A.N., Titova S.V., Tsarevskaya N.G., Shmatova A.G. Anthropogenic transformation of Arctic ecosystems in Russia: Approaches, methods, assessments. *Arktika Ekol. Ekon.*, 2019, vol. 36, no. 4, pp. 38–51. (In Russ.).
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. Response of vegetation to changing climatic conditions in boreal and subarctic landscapes at the beginning of the 21st century. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 3, pp. 75–86. (In Russ.).
- Titkova T.B., Vinogradova V.V. Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2019, vol. 16, no. 5, pp. 310–323. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323>
- Titkova T.B., Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V. Spectral portrait of lowland landscapes of Russia. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2020, vol. 17, no. 3, pp. 117–126. (In Russ.).
<https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126>
- Tretii otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [The Third Assessment Report Hydromet about Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2022. 676 p.
- Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., Drozdov D.S., et al. Permafrost degradation: results of the long term geocryological monitoring in the western sector of Russian Arctic. *Kriosf. Zemli*, 2020, vol. 24, no. 2, pp. 15–30. (In Russ.).
[https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-\(15-30\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2020-(15-30))
- Vinogradova V.V., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Dynamics of moisture and heat fluxes in transitional landscape zones from satellite and meteorological data in the beginning of the XXI century. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 162–172. (In Russ.).
- Vinogradova V., Titkova T., Zolotokrylin A. How climate change is affecting the transitional natural zones of the Northern and Arctic regions of Russia. *Polar Sci.*, 2021, vol. 29, p. 100652.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100652>
- Voronin V.I., Sofronov A.P., Morozova T.I., Oskolkov V.A., Sukhovol'skii V.G., Kovalev A.V. Landscape occurrence of bacterial diseases in dark coniferous forests of the Khamar-Daban ridge (Southern Baikal region). *Geogr. Priir. Resur.*, 2019, no. 4, pp. 56–65. (In Russ.).
[https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4\(56-65\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2019-4(56-65))
- 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.
- Vysotskaya A.A., Medvedkov A.A. Climate-driven "greening" of the kurum landscape in the valley of the lower reaches or the Podkamennaya Tunguska river. *InterKarto. InterGIS*, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 305–313. (In Russ.).
- WMO. *State of the Global Climate 2020, No. 1264*. WMO, 2021. 56 p.
- Zamolodchikov D.G. Evaluation of changes climatogenic diversity of tree species according to the forest fund. *Uspekhi. Sovrem. Biol.*, 2011, vol. 131, no. 4, pp. 382–392. (In Russ.).
- Zelikson E.M., Borisova O.K., Velichko A.A. Vegetation cover. In *Klimaty i landshafty Severnoi Evrazii v usloviyakh global'nogo potepeniya: retrospektivnyi analiz i stsenarii* [Climates and Landscapes of Northern Eurasia under Conditions of Global Warming: Retrospective Analysis and Scenarios]. Moscow: GEOS Publ., 2010, pp. 110–119. (In Russ.).
- Zhil'tsova E.L., Anisimov O.A. Vegetation dynamics in Northern Eurasia: analysis of modern observations and forecast for the 21st century. *Arktika XXI Vek, Ser. Estest. Nauki*, 2015, vol. 3, no. 2, pp. 48–59. (In Russ.).
- Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova E.A., Vinogradova V.V. Trends of moisture indexes and biophysical parameters of European Russia drylands for the period of 2000–2014. *Sovrem. Probl. Distant. Zondir. Zemli Kosmosa*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 155–161. (In Russ.).