Изменения климатической и спектральной структуры ландшафтных зон России

В. В. Виноградова, Т. Б. Титкова

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

На основе анализа климатических параметров метеорологических станций (июльской, январской температуры, суммы активной температуры, осадков) и спутниковых данных (нормализованного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), альбедо поверхности *Al*, радиационной температуры поверхности T_s) выполнена оценка изменения климатической и спектральной структуры ландшафтных зон и подзон России в результате климатических сдвигов конца XX – начала XXI в. Установлено, что климатические параметры в 2000–2022 гг. в большинстве ландшафтных зон России сместились к верхней границе или за пределы диапазонов базового периода (1961–1990). В тундровых, лесотундровых и лесных ландшафтах европейской территории России (ЕТР) отмечается массовый переход климатических параметров природных зон к значениям, характерным для более южных ландшафтов. В лесных зонах Сибири и Дальнего Востока фиксируется сближение термических параметров соседних подзон, что создаёт фундаментальные предпосылки для трансформации климатических условий. Показано, что диапазоны и связи NDVI, *Al* и T_s представляют собой устойчивый индикатор зональной принадлежности. Реакция ландшафтов на климатические изменения неоднородна и варьирует от классического «зелёного охлаждения» (ЕТР, Чукотка) до увеличения фитомассы при смене темнохвойных пород светлохвойными и мелколиственными с более высоким альбедо (Дальний Восток). Положительная динамика NDVI сама по себе не является однозначным индикатором улучшения экологических условий, поскольку её интерпретация требует учёта *Al* и T_s, а также пирогенного и антропогенного факторов. В бореальных зонах скорость реакции спектральной структуры ландшафтов ниже скорости климатических изменений. В арктических экосистемах, где даже небольшое потепление вызывает значительный отклик растительности, эта скорость сопоставима или выше; то же характерно для территорий южнее лесостепи, где велико антропогенное воздействие на фоне термического стресса и уменьшения влажности.

Ключевые слова: ландшафтные зоны и подзоны, изменения климата, температура, осадки, увлажнение, NDVI, радиационная температура, альбедо поверхности

Одобрена к печати: 02.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-282-299

Введение

Современные представления о климате ландшафтов России базируются на классических работах В. В. Докучаева (1899), Л. С. Берга (1936), А. Г. Исаченко (1991), выполненных в условиях относительно стабильного климата XX в. Однако наблюдаемые в последние десятилетия климатические сдвиги (рост температуры, перераспределение осадков, учащение экстремальных явлений) вызывают сомнения в неизменности климатической структуры природных зон (Мохов, 2022; https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-impacts-adaptation-and-vulnerability/161F238F406D530891AAAE1FC76651BD).

Глобальное потепление трансформирует состав, структуру и функционирование растительного покрова, что влияет на такие свойства земной поверхности, как вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), альбедо поверхности *Al* и радиационная температура T_s (Титкова и др., 2020). Растительность демонстрирует высокую чувствительность к аномалиям приземной температуры и осадков (Замолодчиков, 2011). Изменения климатических условий в вегетационный период смещают пики поглощения

хлорофилла, что сказывается на динамике отражательных свойств поверхности. Наиболее быстро реагируют травянистые сообщества и подрост деревьев (Величко и др., 2002; Тишков и др., 2020).

Исследование взаимосвязи климатических параметров и оптических свойств поверхности позволяет оценить механизмы влияния климата на экосистемы в пространственном и временном масштабе. Инерционность реакции подстилающей поверхности на климатические изменения определяется плотностью растительного покрова (Wu et al., 2016). Экстремальные погодные явления усиливают это воздействие по сравнению с постепенными изменениями (Bouwer, 2019).

Если температурный режим приближается к границам допустимого диапазона биома, могут происходить качественные изменения ландшафта. Экосистема теряет целостность, внедряются новые виды, что ведёт к смене биомов, которые обладают другими оптическими свойствами (Анисимов и др., 2011). Такой переход оказывается критическим и необратимым в краткосрочной перспективе из-за эффекта гистерезиса (Gonzalez et al., 2010).

Актуальность исследования обусловлена необходимостью пересмотра климатической нормы параметров, характерных для ландшафтных зон России. Требуется выяснить, какие изменения климатической структуры носят необратимый характер, а где сохраняется устойчивость (буферность) климатических систем. Использование спутниковых данных (MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)) позволяет перейти к анализу спектральной структуры ландшафтов с применением NDVI, *Al*, T_s, которые реагируют на климатические изменения. Спектральная структура выступает как ранний индикатор трансформации природных зон в результате климатических сдвигов, часто опережая видимые изменения, что создаёт основу для оперативного мониторинга экосистем. Существующие работы изучают либо климатические изменения (Попова, 2018; Семенов и др., 2012), либо спектральные и оптические характеристики поверхности ((Елисеев, Мохов, 2011; Шинкаренко, 2021) и др.). Крайне мало исследований, рассматривающих одновременно климатическую и спектральную структуру как взаимосвязанные компоненты.

Цель работы — оценка изменения климатической и спектральной структуры ландшафтных зон и подзон России в результате климатических сдвигов конца XX – начала XXI в.

Материалы и методы

Исследования проводились на всей территории России по ландшафтным зонам и подзонам от арктических до полупустынь, исключая высокогорные ландшафты (https://nationalatlas.ru/tom2/398–399.html). Рассматривались климатические параметры и их стандартное отклонение по 510 метеостанциям (http://meteo.ru/) за периоды 1961–1990 и 2000–2022 гг. в рамках квазиоднородных природных экосистем (Доклад..., 2023).

Анализировались климатические характеристики, ранее использовавшиеся в работе (Базилевич и др., 1986) для оценки связи экосистем с климатическими условиями, а именно: среднегодовая температура $T_{год}$, температура самого холодного месяца января $T_{январь}$ и самого тёплого месяца июля $T_{июль}$, сумма активных температур выше 10 °C $\Sigma T_{10°}$, сумма годовых осадков ΣPr, коэффициент увлажнения $K_{увл}$. Коэффициент увлажнения, представляющий собой отношение годового количества осадков к годовой величине испаряемости, является показателем соотношения тепла и влаги и выступает одним из основных факторов, определяющих преобладающий тип растительности на данной территории. Был использован коэффициент увлажнения Иванова – Мезенцева (Иванов, 1954; Мезенцев, 1973). Метод подробно описан в работе (Виноградова, Титкова, 2024).

Диапазоны изменений климатических параметров ландшафтных зон европейской части России были уточнены, а для азиатской части определены на основе средних значений рассматриваемых климатических параметров и их стандартного отклонения за период 1961–1990 гг. как среднее значение климатического параметра плюс/минус стандартное отклонение (*табл. 1*).

Таблица 1. Диапазоны климатических характеристик природных равнинных экосистем России по квазиоднородным климатическим регионам для ландшафтных зон/подзон России для базового периода (1961–1990)

Параметры/ландшафтные зоны, подзоны		Средняя температура самого тёплого месяца (°С)	Сумма активной температуры больше 10 °С	Годовая сумма осадков (мм)	Коэффициент увлажнения	Среднегодовая температура (°С)	Средняя температура самого холодного месяца (°С)	Абсолютная минимальная температура (°С)	Число станций
Тундра	ЕТР, ЗС до 90° в. д.	6,2...13,3	162–687	267–483	0,73–1,17	–10,4...–0,3	–26,5...–10,6	–51,3...–34,6	19
	Восточная Сибирь >90° в. д.	3,9...10,8	12–459	135–399	0,37–1,15	–14,7...–8,2	–54,7...–19,9	–55,5...–44,2	16
Лесотундра	ЕТР, ЗС до 90 °	10,1...15,1	451–876	395–521	0,91–1,18	–7,4...–1,4	–25,1...–13,8	–54,8...–42,5	13
	Восточная Сибирь >90°	10,5...13,0	532–742	237–674	0,57–1,52	–13,9...–0,9	–37,1...–14,0	–61,4...–40,5	8
Стланиковая тундра	Восточная Сибирь >90°	9,3...13,3	302–875	285–496	0,74–1,3	–10,7...–2,9	–29,3...–12,3	–57,7...–37,9	9
Северотаёжные леса	ЕТР, ЗС до 90°	14,1...16,7	936–1284	450–580	0,88–1,07	–4,7...1,0	–23,8...–12,8	–56,5...–40,6	24
	Восточная Сибирь >90°	14,1...16,2	786–1117	241–424	0,49–0,85	–13,4...–9,4	–41,7...–34,8	–62,2...–58,7	8
Среднетаёжные леса	ЕТР, ЗС до 90°	16,5...17,9	1356–1684	500–636	0,82–1,04	–2,1...2,6	–21,5...–12,3	–53,5...–42,2	29
	Восточная Сибирь >90°	13,5...18,0	1108–1556	255–724	0,45–1,26	–9,4...0,2	–37,8...–15,9	–62,5...–36,3	42
Южнотаёжные леса	ЕТР, ЗС до 90°	16,9...18,4	1598–1975	474–674	0,71–1,03	0,7...4,2	–17,3...–10,0	–50,1...–41,9	38
	Восточная Сибирь >90°	15,3...19,8	1292–2067	349–663	0,55–1,02	–3,9...0,7	–28,6...–18,2	–53,5...–39,9	51
Хвойно-широколиственные леса подтаёжные	ЕТР, ЗС до 90°	17,2...19,0	1764–2149	458–634	0,65–0,91	0,5...4,4	–19,2...–10,7	–49,4...–35,3	22
Широколиственные леса	ЕТР, ЗС до 90°	18,1...19,6	1899–2344	386–584	0,54–0,78	1,2...4,7	–17,4...–10,7	–50,1...–39,0	25
	Восточная Сибирь >90°	18,2...21,6	2255–2626	549–736	0,66–0,96	1,3...5,1	–22,8...–11,7	–44,3...–29,1	10
Лесостепи	ЕТР, ЗС до 90°	17,8...19,7	1870–2582	409–621	0,54–0,84	1,6...5,8	–16,5...–9,3	–47,1...–36,7	20
	Восточная Сибирь >90°	17,8...19,0	1790–1942	272–455	0,39–0,68	–2,8...–2,2	–27,0...–26,4	–47,9...–42,4	2
Степи	Настоящие	20,0...23,7	2437–3598	314–626	0,36–0,68	3,8...10,9	–14,1...–1,9	–42,9...–24,9	48
	Сухие	22,5...25,4	2921–3720	218–372	0,21–0,41	5,9...10,7	–12,2...–4,1	–38,9...–29,0	9
Полупустыни		24,7...25,3	3369–3779	190–270	0,18–0,28	8,3...10,3	–9,0...–4,9	–33,8...–28,5	2
Горные ландшафты-15	ЕТР, ЗС до 90°	11,5...21,2	639–3159	268–1398	0,36–2,32	–1,9...10,9	–17,4...0,9	–42,6...–20,7	16
	Восточная Сибирь >90°	12,5...17,6	716–1724	132–820	0,14–1,60	–9,4...0,0	–33,7...–17,9	–55,2...–41,0	18

Таблица 2. Климатические параметры (2000–2022) и характеристики поверхности (июль, 2000–2025 гг.) со стандартным отклонением по квазиоднородным климатическим регионам для ландшафтных зон/подзон России

Регион	Ландшафтная зона/ подзона	Число станций	$T_{июль}$, °C	$T_{год}$, °C	$T_{январь}$, °C	$\Sigma T_{10°}$, °C	ΣPr, мм	$K_{увл}$	NDVI, июль	*Al*, июль	T_s, °C, июль
Арктика	Арктические пустыни	6	2,6±3,1	–10,3±3,8	–21,2±6,1	36±73	186±39	0,59±0,10	0,14±0,23	0,25±0,11	4,5±3,7
Европейская Арктика	Тундра	10	12,3±1,7	–0,1±2,4	–10,6±5,4	667±303	427±97	1,00±0,33	0,67±0,16	0,18±0,01	20,8±2,2
	Лесотундра	6	13,0±1,8	–0,1±0,8	–11,8±2,1	868±358	427±104	0,92±0,32	0,71±0,07	0,17±0,01	20,5±1,2
	Северная тайга	15	16,0±1,2	1,3±1,4	–12,0±3,3	1123±408	565±95	0,98±0,22	0,76±0,05	0,16±0,02	20,4±1,4
Арктика Западной Сибири	Тундра	7	9,4±4,3	–8,3±1,8	–23,1±2,3	344±309	301±126	0,80±0,28	0,58±0,13	0,20±0,06	18,1±3,0
	Лесотундра	7	14,1±2,6	–5,0±2,0	–22,3±4,2	1074±450	481±139	0,94±0,31	0,64±0,11	0,17±0,02	21,1±2,3
	Северная тайга	9	16,7±0,6	–3,2±2,0	–23,1±3,5	1283±199	545±103	0,98±0,22	0,72±0,09	0,16±0,01	21,5±1,2
Сибирская Арктика	Тундра	12	7,4±4,1	–10,1–3,4	–26,6±9,6	412±385	182±111	0,48±0,31	0,50±0,12	0,23±0,06	14,3±3,5
	Лесотундра	3	13,3±0,9	–11,7–1,1	–33,9±3,6	808±557	272±29	0,59±0,07	0,61±0,08	0,18±0,04	19,6±1,3
	Северная тайга	8	16,0±0,7	–10,2–2,2	–37,2±3,9	1122±191	318±84	0,60±0,13	0,76±0,06	0,16±0,15	22,1±1,5
	Горная тайга	5	15,7±0,7	–11,6–1,4	–39,7±4,0	718±572	213±44	0,50±0,20	0,63±0,14	0,16±0,04	23,3±1,7
Дальневосточная Арктика	Тундра	7	7,8±3,7	–7,1±2,6	–21,3±4,0	559±177	243±151	0,57±0,32	0,50±0,14	0,22±0,06	20,7±2,4
	Стланиковая тундра	8	13,1±1,8	–5,7±3,2	–23,2±8,1	706±478	290±109	0,68±0,28	0,61±0,12	0,15±0,04	22,4±1,2
Северо-запад ЕТР	Средняя тайга	13	16,7±5,0	3,5±1,8	–8,6±4,1	1575±619	560±232	0,89±0,39	0,71±0,29	0,15±0,01	19,9±2,0
	Южная тайга	26	18,8±0,6	5,4±1,2	–7,4±1,5	2148±420	666±53	0,92±0,18	0,81±0,06	0,12±0,06	21,8±0,9
Северо-восток ЕТР	Средняя тайга	7	17,9±0,4	1,4±1,1	–14,8±2,6	1767±532	643±93	0,99±0,17	0,84±0,04	0,15±0,02	21,0±0,9
	Южная тайга	7	18,4±1,0	2,7±1,1	–12,8±1,5	2020±116	625±118	0,88±0,18	0,85±0,03	0,13±0,02	21,3±1,0
Юго-запад ЕТР	Подтаёжная	9	19,3–0,8	5,9±0,7	–7,1±1,5	2373±150	675±61	0,87±0,09	0,78±0,06	0,10±0,06	24,1±1,8
	Широколиственная	10	19,9±0,3	6,3±0,8	–7,3±1,6	2523±120	602±65	0,74±0,08	0,74±0,02	0,15±0,02	25,4±0,7
	Лесостепь	12	20,6±0,6	6,8±0,9	–7,1±1,3	2503±600	521±60	0,74±0,24	0,70±0,04	0,10±0,07	27,5±1,9
Юго-восток ЕТР	Подтаёжная	5	19,0±1,1	3,5±0,7	–11,9±0,8	2274±159	559±70	0,73±0,07	0,72±0,05	0,13±0,01	25,8±1,4
	Широколиственная	4	20,1±1,2	4,5±1,1	–11,3±1,4	2309±214	539±36	0,70±0,06	0,71±0,05	0,14±0,01	27,9±0,9
	Лесостепь	5	19,5±1,7	3,8±1,6	–12,6±1,3	2456±337	521±60	0,66±0,16	0,690,03	0,14±0,02	28,7±1,7
Степная часть ЗС	Лесостепь	2	19,5±0,3	3,0±0,4	–16,2±0,5	2152±407	372±19	0,51±0,08	0,72±0,05	0,15±0,03	26,2±1,6
	Степь	8	19,9±0,9	3,2±0,6	–16,4±1,5	2268±516	428±151	0,57±0,18	0,53±0,10	0,15±0,05	31,6±3,0
Север лесной зоны ЗС	Средняя тайга	10	17,8±0,4	–0,9±1,2	–20,9–1,8	1738±190	582±53	0,89±0,12	0,76±0,05	0,13±0,01	22,3±1,2

Окончание табл. 2

Регион	Ландшафтная зона/ подзона	Число станций	$T_{июль}$, °C	$T_{год}$, °C	$T_{январь}$, °C	$\Sigma T_{10°}$, °C	ΣPr, мм	$K_{увл}$	NDVI, июль	*Al*, июль	T_s, °C, июль
Юг лесной зоны ЗС	Южная тайга	10	18,4±0,5	1,7±1,2	−16,9±2,6	1924±201	524±33	0,76±0,08	0,81±0,05	0,12±0,02	22,1±1,1
	Подтаёжная	8	18,2±0,6	1,5±0,9	−17,8±1,6	1981±131	522±58	0,74±0,08	0,80±0,07	0,13±0,01	22,7±1,1
Юг ЕТР	Степь	31	23,1±1,6	8,8±2,6	−5,6±4,4	3129±726	456±129	0,50±0,17	0,46±0,13	0,20±0,39	35,6±3,6
	Сухая степь	9	25,2±1,5	9,6±2,4	−5,7±3,7	3426±541	311±86	0,31±0,07	0,35±0,06	0,01±0,01	41,9±2,9
	Полупустыня	2	26,4±0,1	10,8±0,9	−4,6±1,7	3887±250	245±44	0,23±0,05	0,24±0,01	0,01±0,01	44,3±0,5
	Горные ландшафты	11	19,1±4,8	8,6±4,2	−1,8±3,9	3310±1177	954±526	1,09±0,79	0,70±0,37	0,20±0,29	20,1±6,5
Восточная Сибирь, центр	Средняя тайга	26	18,1±1,1	−6,4±1,8	−32,2±4,8	1494±256	376±132	0,62±0,19	0,78±0,06	0,160,15	22,8±1,1
	Горная тайга	13	14,3±2,6	−6,4±4,0	−26,8±11,4	822±496	359±140	0,80±0,34	0,74±0,06	0,26±0,33	23,8±1,3
Предбайкалье	Южная тайга	21	18,3±0,4	−0,7±1,8	−21,7±3,3	1691±423	402±61	0,63±0,12	0,80±0,11	0,17±0,06	21,2±1,3
	Горная тайга	9	18,2±1,5	0,1±1,2	−20,4±3,2	1781±338	359±120	0,55±0,34	0,64±0,17	0,23±0,24	23,0±6,1
Забайкалье	Южная тайга	3	18,6±1,1	−2,3±1,0	−24,8±3,1	1603±196	445±83	0,71±0,09	0,71±0,11	0,15±0,01	22,6±1,1
	Горная тайга	24	17,8±1,4	−3,4±2,4	−27,4±4,1	1538±417	385±111	0,64±0,21	0,80±0,05	0,17±0,01	21,8±1,9
Алтай, Саяны	Южная тайга	6	18,4±0,4	1,3±0,8	−18,0±1,9	2048±69	456±58	0,64±0,09	0,83±0,02	0,13±0,06	21,0±3,8
	Горные ландшафты	7	16,4±2,8	−0,6±2,3	−20,1±3,4	1921±480	704±443	1,00±0,60	0,40±0,17	0,18±0,02	27,8±6,7
Дальний Восток	Лесотундра	4	11,8±0,9	−0,1±1,3	−12,0±2,2	1096±467	517±210	0,99±0,37	0,57±0,15	0,12±0,02	18,0±2,5
	Средняя тайга	11	17,5±2,3	−5,6±3,6	−30,6±9,1	1759±289	437±192	0,66±0,17	0,78±0,05	0,14±0,03	23,3±1,4
	Южная тайга	15	17,5±2,7	−2,2±1,3	−24,4±3,7	1613±382	573±96	0,50±0,28	0,83±0,03	0,15±0,02	23,3±1,5
	Горная тайга	25	13,6±2,4	−1,8±3,6	−17,3±9,7	1051±441	641±234	1,26±0,47	0,84±0,04	0,21±0,02	21,6±1,8
Дальний Восток, юг	Средняя тайга	9	14,4±2,1	3,7±1,9	−8,9±3,8	1583±491	898±245	1,45±0,35	0,72±0,09	0,16±0,02	24,4±1,3
	Южная тайга	14	19,5±2,5	1,7±1,9	−19,5±6,0	2344±584	694±131	0,93±0,32	0,82±0,04	0,17±0,02	23,6±1,7
	Широколиственная	10	20,7±1,6	4,2±1,7	−16,0±5,1	2275±484	694±111	0,92±0,14	0,75±0,02	0,12±0,07	27,1±0,6

Климатические характеристики современного периода (2000–2022) сравнивались с базовым климатом (1961–1990). Считалось, что если более половины климатических параметров соответствуют другой ландшафтной зоне, то по климатическим условиям данную метеостанцию можно отнести к соседней ландшафтной зоне или подзоне по климатическим параметрам.

В рамках крупных квазиоднородных климатических регионов были получены средние значения и стандартные отклонения климатических параметров за 2000–2022 гг. (*табл. 2*), которые затем сравнивались с диапазоном изменения этих параметров для среднемноголетних условий (1961–1990) (*табл. 1*) в ландшафтных зонах и подзонах (https://nationalatlas.ru/tom2/398-399.html). Также были рассчитаны тренды обозначенных климатических характеристик методом линейной регрессии по методу наименьших квадратов за период 2000–2022 гг. Значимость трендов определялась по критерию Стьюдента с вероятностью 0,95.

Влияние климатической трансформации на свойства поверхности оценивалось по изменениям NDVI, а также *Al* и T_s в среднем за июль 2000–2025 гг. Оценка этих характеристик в середине тёплого сезона позволяет корректно зафиксировать отклик подстилающей поверхности в фазу активной вегетации растительности от тундры до полупустыни, когда межширотные различия в поступлении солнечной радиации и условия увлажнения проявляются наиболее контрастно.

Индекс NDVI, характеризующий состояние и количество растительности, рассчитывался на основе данных продукта MOD13C2, представляющего собой среднемесячные значения с пространственным разрешением CMG (*англ.* Climate Modeling Grid) 0,05×0,05° (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v061/). Глобальные данные MOD13C2 — пространственные композиты с минимальным влиянием облачности.

Величина *Al* преимущественно зависит от влажности, цвета и шероховатости поверхности, на которые, в свою очередь, воздействуют климатические изменения. Использовалось коротковолновое интегральное *Al*, полученное из продукта MCD43C1, где оно рассчитывалось на основе модели двунаправленного распределения отражения BRDF (*англ.* Bidirectional Reflectance Distribution Function) для видимого (0,58–0,68 мкм) и ближнего инфракрасного (0,73–1,0 мкм) диапазонов солнечного спектра. Параметры BRDF-модели вычисляются ежедневно с использованием 16-дневных накопленных данных спектрорадиометров MODIS спутников Terra и Aqua в формате CMG с разрешением 0,05×0,05°. Для анализа применялись данные, соответствующие 16 дням середины летних месяцев.

Температура T_s определяется по тепловому излучению поверхности в инфракрасном диапазоне спектра (5–100 мкм). Для анализа T_s использовался продукт MOD11C3 (https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c3v061/), который содержит глобальные данные среднемесячной температуры поверхности и коэффициента излучения с пространственным разрешением 0,05×0,05°. Значения T_s в этом продукте представляют собой результат месячного осреднения соответствующих ежедневных данных из продуктов MOD11C1.

Результаты и обсуждение

Средние климатические характеристики ландшафтов в современном климате

Структура растительных сообществ ландшафтных зон в значительной степени связана с климатическими условиями. Проведено сравнение средних за период климатических параметров в современных условиях 2000–2022 гг. с климатическими характеристиками ландшафтов в условиях базового климата 1961–1990 гг. (*табл. 1*), которое показало, что при современном потеплении средняя за 2000–2022 гг. *температура июля* в тундре находится на верхней границе интервала июльских температур, определённых до начала потепления, а на европейской территории России (ЕТР), в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке может превышать эту границу на 0,7 °С. В лесотундре Восточной Сибири и на Дальнем Востоке июльская

температура незначительно выходит за пределы ранее установленного диапазона, а на ЕТР и в Западной Сибири (ЗС) находится у его верхней границы. В северной тайге температура близка к верхней границе этого диапазона. В средней тайге она почти достигла верхней границы, а в центральной части Восточной Сибири незначительно превысила её. В подтаёжной зоне на юго-западе ЕТР июльская температура превосходит диапазон, установленный для среднемноголетних значений (*табл. 1*), а в других частях этой зоны и в зоне широколиственных лесов среднеиюльская температура находится в пределах этого диапазона. В лесостепи на юго-западе ЕТР превышение верхней границы диапазона достигает 0,9 °С. В степной зоне юга ЕТР и Западной Сибири эта температура находится в определённых ранее пределах, а в полупустынной зоне юга России она превышает верхнюю границу ранее установленного диапазона на 1,1 °С (*табл. 2*).

Сумма активной температуры в тундре и лесотундре приближается к верхней границе диапазона, а в лесотундре Западной и Восточной Сибири соответствует северотаёжной зоне. На Дальнем Востоке суммы активных температур в тундровой зоне более характерны для стланиковой тундры (*табл. 1*, *2*). В зоне северной тайги они соответствуют верхней границе ранее определённого диапазона, а в Восточной Сибири немного превышают его. На севере ЕТР в средней и южной тайге суммы активных температур превосходят ранее определённые значения, за исключением средней тайги на северо-западе ЕТР. На юге Дальнего Востока в зоне средней тайги они соответствуют южнотаёжной зоне, а в зоне южной тайги — широколиственной зоне. В подтаёжной зоне и зоне широколиственных лесов этот параметр превышен на юго-западе европейской территории, а в остальных регионах он остаётся в пределах ранее установленных значений. В лесостепной и степной зонах суммы активных температур в основном соответствуют ранее определённому диапазону значений, а в полупустыне на юге ЕТР превышают эти значения.

Средние значения *зимней* (*январской*) *температуры* в современном климате превышают границы диапазона 1961–1990 гг. на севере и северо-западе ЕТР в лесотундровых и таёжных ландшафтах и в лесотундре, в южной тайге на Алтае и в лесотундре и средней тайге на Дальнем Востоке. В подтаёжной и зоне широколиственных лесов температура января превышена только на юго-западе ЕТР. В лесостепных и степных ландшафтах эта температура соответствует норме, кроме юго-запада ЕТР. В степной зоне Западной Сибири температура января немного ниже установленных значений. В полупустынной зоне на юге ЕТР температура января оказывается выше нормы (*табл. 1*, *2*).

Годовая сумма осадков (среднее значение за 2000–2022 гг.) для северных ландшафтов тундры и лесотундры ЕТР находится на уровне нижней границы ранее установленного диапазона (*табл. 1*, *2*). На большей части таёжной, подтаёжной, лесостепной, степной зон и зоны широколиственных лесов количество осадков соответствует ранее определённым значениям. В зоне средней тайги на северо-востоке ЕТР и в подтаёжной зоне и зоне широколиственных лесов на юго-западе ЕТР сумма годовых осадков превышает ранее установленные значения. Такие же тенденции наблюдаются в таёжной зоне юга Дальнего Востока.

Среднегодовая температура (среднее значение за 2000–2022 гг.) на севере и северо-западе ЕТР и на Дальнем Востоке в тундровой, лесотундровой и таёжной зонах превышает верхнюю границу ранее установленного диапазона (1961–1990) (*табл. 1*, *2*). Те же тенденции отмечаются в подтаёжной, широколиственной и лесостепной зонах на юго-западе ЕТР. В полупустынной зоне на юге европейской части среднегодовая температура оказывается также превышена. В остальных регионах она приближается к верхней границе ранее определённого диапазона. Только в степной зоне Западной Сибири среднегодовая температура оказывается ниже ранее установленных значений.

Коэффициент увлажнения в большинстве ландшафтных зон находится в пределах ранее определённого диапазона, смещаясь в сторону его нижней границы за счёт роста температуры, особенно в стланиковой тундре на Дальнем Востоке и в лесостепной зоне Западной Сибири, где условия увлажнения приближаются к степной зоне. Засушливость нарастает во всех ландшафтных зонах/подзонах в направлении с запада на восток. На основании коэффициента увлажнения Иванова – Мезенцева, от средней тайги до широколиственных лесов

условия увлажнение близки к оптимальным, а в лесостепной, степной и полупустынных зонах увлажнение недостаточно. В зоне средней тайги на юге Дальнего Востока отмечается рост $K_{увл}$ за счёт увеличения осадков (*табл. 1*, *2*).

Тренды климатических показателей в современном климате

На большей части России тренды июльской, январской и среднегодовой температуры, а также суммы активных температур выше +10 °С за 2000–2022 гг. положительны (*табл. 3*). Однако на севере и в центре ЕТР (от северотаёжной до широколиственной зоны), а также в дальневосточной тундре наблюдаются отрицательные тренды июльской температуры, как уже отмечалось в работе (Титкова, Виноградова, 2019).

В Европейской и Западно-Сибирской Арктике (тундра, лесотундра) положительные тренды температуры сопровождаются отрицательными трендами осадков, что уменьшает переувлажнение и благоприятно влияет на растительность. В лесной зоне Западной Сибири тренды температуры положительны, а осадков отрицательны, что снижает коэффициент увлажнения. В Восточной Сибири и на Дальнем Востоке тренды всех температур положительны, с максимумом в январе в зоне южной тайги и лесотундре Дальнего Востока. Повышенные тренды температуры июля отмечены на Дальнем Востоке в южной и средней тайге и широколиственных лесах. В зонах средней и южной тайги Восточной Сибири рост температуры сопровождается уменьшением осадков, ухудшая условия увлажнения. На Дальнем Востоке тренды осадков положительны, что вызывает риск переувлажнения. В Сибирской и Дальневосточной Арктике, а также в центральной части Восточной Сибири тренды суммы активных температур положительны. Наибольший рост наблюдается в тундровой, лесотундровой и северотаёжной зонах (*табл. 3*).

Таблица 3. Тренды за 10 лет климатических параметров (2000–2022) и характеристик поверхности (июль, 2000–2025 гг.) по квазиоднородным климатическим регионам для ландшафтных зон/подзон России

Регион	Ландшафтная зона/подзона	$T_{июль}$, °С	$T_{год}$, °С	$T_{январь}$, °С	$\Sigma T_{10°}$, °С	ΣPr, мм	NDVI	*Al*	T_s, °С
Арктика	Арктические пустыни	–0,32	**1,74**	**4,08**	40,15	–10,04	0,01	–0,050	**0,54**
Европейская Арктика	Тундра	0,47	0,13	–0,40	64,63	–28,64	–0,01	0,010	**1,10**
	Лесотундра	0,37	0,27	–0,04	66,19	–19,51	0,01	0,003	–0,17
	Северная тайга	–0,01	0,50	0,23	58,07	27,42	0,00	0,002	–0,34
Арктика Западной Сибири	Тундра	**0,90**	**0,90**	**1,93**	26,87	–3,35	0,01	0,001	**0,91**
	Лесотундра	**0,77**	**1,50**	**2,06**	20,86	50,02	0,01	0,003	**0,86**
	Северная тайга	**0,53**	**1,11**	**1,04**	11,12	3,49	0,00	0,002	**0,58**
Сибирская Арктика	Тундра	0,22	**0,78**	**1,06**	56,22	–8,74	**0,02**	0,002	**0,77**
	Лесотундра	0,06	**0,82**	**1,01**	**140,50**	–25,77	0,02	0,002	**0,91**
	Северная тайга	–0,14	**1,5**	**0,7**	**107,63**	–20,64	0,01	–0,020	0,41
	Горная тайга	–0,86	**0,92**	**1,19**	6,38	–8,55	**0,02**	–0,170	**0,61**
Дальневосточная Арктика	Тундра	–0,22	–0,12	**1,32**	10,51	–44,50	**0,02**	–0,330	0,17
	Стланиковая тундра	–0,10	**0,63**	**2,18**	48,36	31,26	**0,02**	–0,030	0,15
Северо-запад ЕТР	Средняя тайга	–0,19	0,33	0,33	15,65	28,93	0,01	–0,080	–0,68
	Южная тайга	–0,65	0,35	0,21	–15,34	19,85	**0,03**	0,002	–0,36

Окончание табл. 3

Регион	Ландшафтная зона/подзона	$T_{июль}$, °C	$T_{год}$, °C	$T_{январь}$, °C	$\Sigma T_{10°}$, °C	ΣPr, мм	NDVI	*Al*	T_s, °C
Северо-восток ЕТР	Средняя тайга	–0,20	0,38	–0,17	76,62	25,55	0,01	0,002	–0,75
	Южная тайга	–0,65	–0,07	–0,72	27,15	–24,96	0,00	0,001	–0,81
Юго-запад ЕТР	Подтаёжная	–0,56	0,30	0,05	24,58	5,27	0,01	0,001	–0,06
	Широколиственная	–0,44	0,23	0,03	–15,81	–26,23	0,01	0,002	–0,03
	Лесостепь	–0,19	0,48	0,04	**110,97**	–12,63	**0,02**	0,001	0,13
Юго-восток ЕТР	Подтаёжная	–0,25	–0,12	–0,46	–56,92	–19,82	**0,02**	0,002	–0,63
	Широколиственная	–0,06	0,29	–0,47	64,97	–4,72	**0,02**	0,001	–0,65
	Лесостепь	0,24	0,49	–0,73	56,83	–14,93	0,01	0,001	–0,07
Северная лесная зона ЗС	Средняя тайга	0,46	**0,55**	**0,83**	5,56	–12,59	**0,02**	0,002	0,47
Южная часть лесной зоны ЗС	Южная тайга	0,29	0,33	0,15	–26,37	–17,87	**0,02**	0,002	0,40
	Подтаёжная	0,43	0,30	0,42	1,65	–9,57	0,01	0,002	0,35
Степная часть ЗС	Лесостепь	0,45	0,17	–0,65	42,73	–24,30	0,01	0,001	0,32
	Степь	**0,56**	–0,003	–0,24	8,36	–9,56	0,01	0,001	0,45
Юг ЕТР	Степь	–0,16	0,30	–0,02	**113,32**	–22,93	–0,01	–0,010	0,48
	Сухая степь	0,46	–1,00	–0,17	**160,22**	–22,35	–0,01	–0,010	0,49
	Полупустыня	**0,64**	0,31	0,15	**118,57**	–27,45	–0,01	–0,010	0,39
	Горные ландшафты	0,32	0,48	0,60	**120,52**	–63,56	0,01	0,002	0,35
Восточная Сибирь, центр	Средняя тайга	0,27	**1,03**	**0,90**	54,61	–8,24	0,01	0,030	0,58
	Горная тайга	–0,29	–0,15	**1,74**	0,32	–14,77	0,02	0,180	0,14
Предбайкалье	Южная тайга	0,02	0,30	**1,31**	–102,49	–33,93	0,00	0,030	1,16
	Горная тайга	0,11	0,60	**1,24**	–33,84	–23,98	0,01	–0,010	0,67
Забайкалье	Южная тайга	**0,57**	0,60	**0,70**	–80,95	20,86	0,00	0,003	1,09
	Горная тайга	0,04	0,26	**1,06**	–12,85	2,92	0,04	0,003	**–0,51**
Алтай, Саяны	Южная тайга	0,08	0,47	**0,83**	–17,48	–15,57	0,02	0,002	0,34
	Горные ландшафты	–0,07	0,29	**0,55**	–76,62	–50,78	0,02	0,001	0,53
Дальний Восток	Лесотундра	0,17	0,39	**0,90**	71,94	26,88	0,01	0,260	0,24
	Средняя тайга	**0,56**	**0,86**	**0,60**	27,44	3,67	**0,02**	0,002	0,25
	Южная тайга	**0,91**	0,42	–0,02	–15,29	14,54	**0,02**	0,002	0,23
	Горная тайга	**0,58**	**0,57**	**0,76**	56,16	24,31	0,01	–0,030	**–0,47**
Дальний Восток, юг	Средняя тайга	**0,68**	0,35	0,04	43,60	–8,33	**0,02**	0,001	0,27
	Южная тайга	**0,77**	0,47	0,15	19,81	65,35	**0,02**	0,002	**–0,66**
	Широколиственная	**0,83**	0,42	**0,52**	37,72	50,23	**0,02**	–0,050	–0,39

Примечание: Отрицательные тренды обозначены голубым цветом, положительные — жёлтым. Значимые тренды выделены полужирным и более ярким цветом.

В лесостепной и степной зоне ЕТР и Западной Сибири наблюдаются отрицательные тренды осадков, которые увеличиваются в восточном направлении. Здесь отмечаются положительные тренды среднегодовой, июльской температуры и суммы активной температуры,

но на юго-востоке ЕТР и в Западной Сибири тренды январской температуры отрицательные. Для степной и сухостепной зон на юге ЕТР и Западной Сибири характерны отрицательные тренды осадков и температуры января и значительный положительный тренд суммы активных температур (*табл. 3*). На юге ЕТР, в полупустынных ландшафтах положительные тренды температуры и суммы активных температур сопровождаются отрицательными трендами осадков, что приводит к дальнейшему иссушению этих ландшафтов (*табл. 3*).

Пределы устойчивости и уязвимость климатической структуры ландшафтных зон

Современные изменения климатических условий могут привести к изменениям границ ландшафтных зон. Как показано на *рис. 1* изменения наблюдаются на значительной части территории России и почти для половины метеостанций (*табл. 4*).

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

Ландшафтная зона/подзона	1961–1990 гг.	2000–2022 гг.	Число станций, где климатические параметры соответствуют другой ландшафтной зоне/подзоне
Арктическая (1)	6	4	Для 2 метеостанций климатические условия соответствуют тундре
Тундра (2)	35	12	Для 11 метеостанций климатические условия соответствуют лесотундре, для 4 — стланиковой тундре, для 3 — северной тайге
Стланиковая тундра (3)	9	13	Для 2 метеостанций климатические условия соответствуют тундре, для 3 — горной тайге
Лесотундра (4)	21	23	Для 7 метеостанций климатические условия соответствуют северной тайге, для 1 — тундре и южной тайге, для 2 — стланиковой тундре
Северная тайга (5)	32	24	Для 13 метеостанций климатические условия соответствуют средней тайге, для 1 — тундре, лесотундре и южной тайге
Средняя тайга (6)	71	55	Для 32 метеостанций климатические условия соответствуют южной тайге и по 1 — подтаёжной, широколиственной, лесостепной и степной зонам
Южная тайга (7)	89	80	Для 37 метеостанций климатические условия соответствуют подтаёжной зоне и по 5 — широколиственной и лесостепной
Горная тайга (8)	75	52	Для 7 метеостанций климатические условия соответствуют подтаёжной зоне, для 9 — средней тайге, для 2 — южной тайге, для 4 — лесотундре, для 5 — горным ландшафтам
Подтаёжная/ хвойно-широколиственные леса (9)	22	56	Для 8 метеостанций климатические условия соответствуют широколиственной зоне, для 5 — лесостепи, а для 3 — степи
Широколиственная (10)	35	31	Для 8 метеостанций климатические условия соответствуют лесостепи, для 7 — степи, а по 1 — подтаёжной и южнотаёжной зоне
Лесостепь (11)	22	34	Для 10 метеостанций климатические условия соответствуют степи, а для 1 — широколиственным лесам
Степь (12)	48	65	Для 6 метеостанций климатические условия соответствуют сухой степи, а для 3 — лесостепи
Сухая степь (13)	9	12	Для 1 метеостанции климатические условия соответствуют полупустыне, а для 2 — степи
Полупустыня (14)	2	3	–
Горные ландшафты (15)	34	34	Для 3 метеостанции климатические условия соответствуют южной тайге и по 1 — лесостепи и степи
Сумма	510	510	223

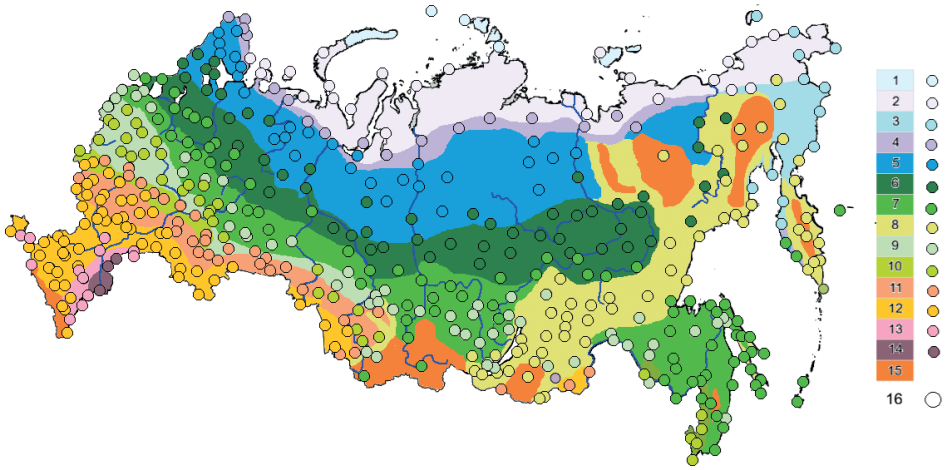


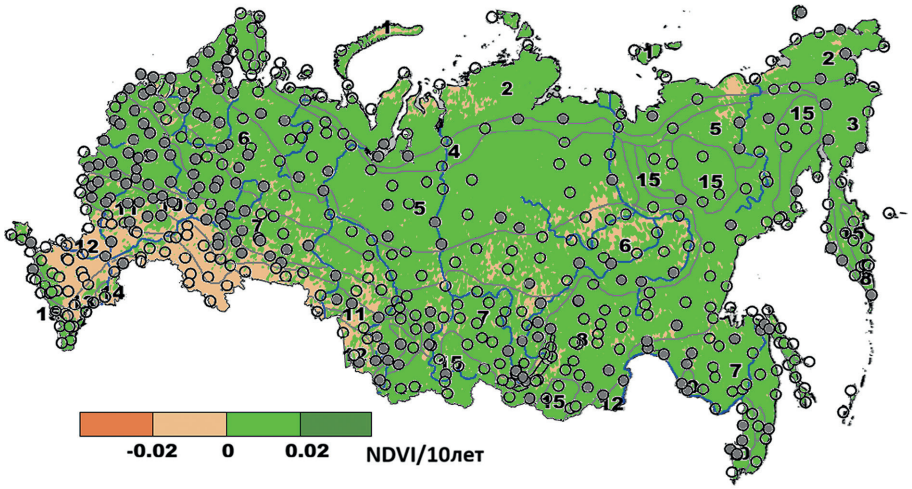
Рис. 1. Уровень климатической изменчивости природных зон России. Цвет метеостанции отражает климатические параметры в 2000–2022 гг., характерные для климатических характеристик природной зоны в 1961–1990 гг. Ландшафты: 1 — арктические пустыни, 2 — тундра, 3 — стланиковая тундра, 4 — лесотундра, 5 — северная тайга, 6 — средняя тайга, 7 — южная тайга, 8 — горная тайга, 9 — подтаёжная зона, 10 — широколиственно-лесная зона, 11 — лесостепь, 12 — степь, 13 — сухая степь, 14 — полупустыня, 15 — высокогорные ландшафты (https://nationalatlas.ru/tom2/398-399.html)

В современных климатических условиях на двух метеостанциях арктической пустыни климатические условия соответствуют зоне тундры. Для 11 метеостанций тундровой зоны (https://nationalatlas.ru/tom2/398–399.html) условия уже соответствуют лесотундровой зоне, для 4 метеостанций — стланиковой тундре и для 3 — северной тайге (*табл. 4*). Такие метеостанции расположены в основном вдоль южной границы тундровой зоны. В связи с ростом температуры климатические условия на 7 метеостанциях, размещённых вдоль границы лесотундры и северной тайги уже соответствуют параметрам северной тайги (*табл. 4*). В свою очередь на 13 метеостанциях, расположенных в зоне северной тайги, современные климатические условия характерны для средней тайги, а для значительной части среднетаёжной зоны (32 метеостанции) климатические условия соответствуют южнотаёжной зоне (*табл. 4*). Большинство таких метеостанции находятся на европейской территории и в Центральной Сибири. 37 метеостанций, расположенных в зоне южной тайги, по климатическим характеристикам уже могут быть отнесены к подтаёжной зоне и 5 метеостанций — к зоне широколиственных лесов и лесостепной зоне. Большинство таких метеостанций размещено на ЕТР, в Прибайкалье и на юге Дальнего Востока. В современном климате для 8 метеостанций, расположенных в зоне широколиственных лесов, климатические условия соответствуют лесостепной зоне, а для 7 метеостанций — степной зоне, что отражает тенденцию уменьшения осадков (*табл. 4*).

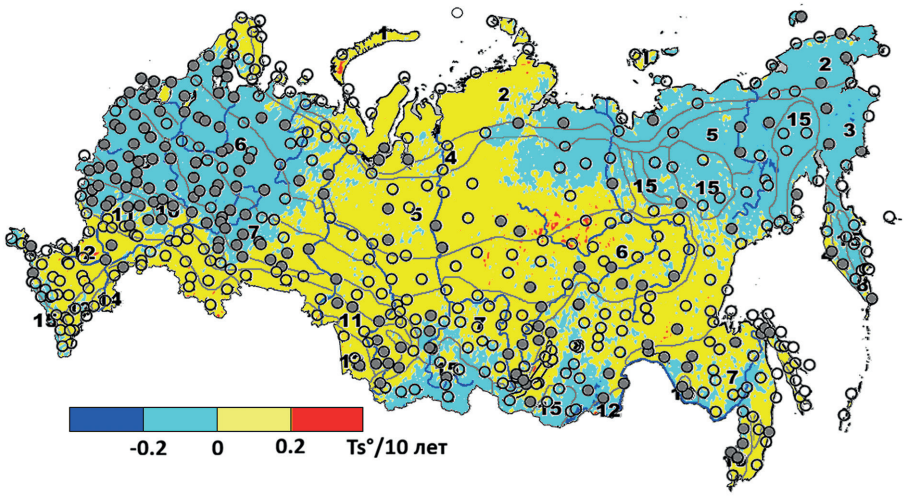
Для 10 метеостанций, находящихся в лесостепной зоне, климатические условия уже соответствуют степной зоне за счёт роста температуры и сокращения количества осадков. Повышение температуры и отрицательные тренды годовых осадков в степной зоне приводят к тому, что на 6 станциях климатические показатели соответствуют сухостепной зоне. Климатические условия для одной метеостанции, расположенной в сухостепной зоне, уже соответствуют условиям полупустыни, а для двух метеостанций — степи (*табл. 4*).

Реакция характеристик ландшафтов на изменение климатических условий

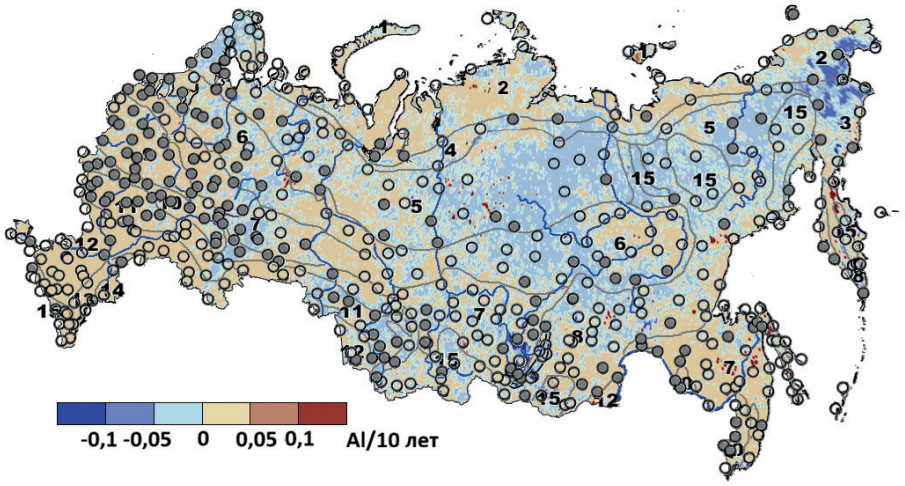
Анализ трендов NDVI, T_s и *Al* в природных зонах России со значительной трансформацией климата выявил неоднородную пространственную структуру изменений, обусловленную различиями в климатических трендах и, как следствие, неодинаковой реакцией характеристик подстилающей поверхности (*рис.* 2).



а



б



в

Рис. 2. Тренд за 10 лет, июль, 2000–2025 гг.: *а* — вегетационного индекса NDVI, *б* — радиационной температуры T_s, *в* — альбедо поверхности *Al*. Закрашенными кружками показаны метеостанции с переходом климатических условий, характерных для более южных природных зон, в 2000–2022 гг. относительно 1961–1990 гг. Пустые кружки указывают расположение метеостанций, где климатические условия не изменились или изменились незначительно. Цифрами обозначены схематично выделенные ландшафты, см. *рис. 1* (https://nationalatlas.ru/tom2/398-399.html)

На ЕТР, в условиях значительной трансформации климата, на участках массового перехода климатических параметров к значениям, характерным для более южных природных зон (от средней тайги до лесостепи), в июле наблюдается рост NDVI на 0,02/10 лет и уменьшение T_s на 0,5 °C/10 лет, а также положительные тренды *Al* до 0,05/10 лет. Эти тренды свидетельствуют о нарастании биомассы и сомкнутости растительного покрова, что ведёт к снижению T_s вследствие увеличения тепло- и влагообеспеченности в вегетационный период. Рост *Al* при этом указывает на смену доминирующих типов растительности, в частности уменьшение доли темнохвойных пород и увеличение доли светлохвойных, мелколиственных и травянистых сообществ, а также повышение сомкнутости полога (Анисимов и др., 2011; Сергиенко, 2015).

На юге Западной Сибири, в лесостепной и степной зонах, на участках массового перехода климатических параметров к более южным значениям наблюдаются мозаичные изменения характеристик поверхности. Тренд индекса NDVI варьируется от –0,02 до +0,02/10 лет, альбедо — от –0,05 до +0,05/10 лет, а радиационная температура растёт на 0,5°/10 лет на фоне увеличения теплообеспеченности, что подтверждается в работе (Титкова, Золотокрылин, 2025). Мозаичность трендов также свидетельствует о значительном антропогенном влиянии в этом районе (Харитоненков, 2010; Шпедт и др., 2018).

На юге Средней Сибири, в лесной зоне Прибайкалья и Забайкалья, так же как на ЕТР, в районах значимой трансформации климатических параметров, характерных для более южных ландшафтов, отмечены рост NDVI на 0,02/10 лет, падение T_s на 0,5 °C/10 лет и мозаичное изменение *A*l в пределах ±0,05/10 лет. При этом в отдельных районах альбедо возрастает до +0,15/10 лет на фоне регионального роста частоты и интенсивности пожаров (Барталев и др., 2015; Елисеев, Мохов, 2011).

На территории Дальнего Востока, где южные (маньчжурские) виды деревьев, лианы и реликтовые растения произрастают бок о бок с сибирскими хвойными (Иванов, Ядрихинский, 2024), в зоне южной тайги на участках перехода климатических параметров к значениям, характерным для более южных природных зон, на фоне роста NDVI на 0,02/10 лет, также увеличиваются T_s на 0,5°/10 лет и *Al* на 0,05/10 лет. Физически это объясняется сменой темнохвойных пород светлохвойными и мелколиственными с более высоким альбедо, а также структурной перестройкой полога леса. Леса Дальнего Востока переживают масштабную трансформацию под влиянием климатических изменений и антропогенного воздействия. Из-за повышения температуры и сдвигов в водном балансе почв елово-пихтовые леса подвержены усыханию (Максимова и др., 2019). Масштабные заготовки древесины приводят к тому, что лес часто не успевает восстанавливаться и молодые посадки погибают. Также огонь ежегодно уничтожает от 1,5 до 1,8 млн га (Ковалев, Громыко, 2023). Таким образом, положительная динамика NDVI на Дальнем Востоке не эквивалентна улучшению экологических условий для охлаждения ландшафта, а отражает смену функционального типа растительности с альбедно-температурным эффектом, противоположным классическому «зелёному охлаждению».

На Чукотке, на участках перехода климатических параметров к более южным значениям, фиксируется рост NDVI, который сопровождается снижением T_s и *Al*. Это свидетельствует об увеличении фитомассы и криогенной трансформации ландшафтов при оттаивании многолетней мерзлоты.

В итоге реакция растительности и подстилающей поверхности на климатические изменения в различных природных зонах России не является однонаправленной. Выделяются три основных типа ответа: классическое зелёное охлаждение (ЕТР, Чукотка), мозаичный антропогенно-климатический тип (юг Западной Сибири, юг Средней Сибири) и смена функционального типа растительности (Дальний Восток). Следовательно, положительная динамика NDVI сама по себе не может служить однозначным индикатором улучшения экологических условий или снижения радиационной температуры. Её интерпретация требует совместного анализа альбедо, радиационной температуры, а также учёта региональных особенностей климатических трендов, пирогенного и антропогенного воздействия.

Сам по себе факт нахождения в определённом диапазоне значений NDVI, *Al* и T_s уже можно считать устойчивым индикатором принадлежности к конкретной ландшафтной зоне.

Признак изменения ландшафта по спутниковым данным для каждой ландшафтной зоны представляет собой многомерный спектральный портрет, уникальный для каждой зоны диапазон и характер связей между NDVI, *Al* и T_s (Титкова и др., 2020). В зависимости от природной зоны скорость и направленность изменений характеристик поверхности различны. Соотношение скоростей климатических изменений и реакции оптических свойств ландшафтов может быть охарактеризовано как асинхронное и зонально-дифференцированное.

В арктических и субарктических регионах (тундра, лесотундра) скорость роста температуры значительно превышает среднемировые показатели (Третий..., 2022; https://www.cambridge.org/core/books/climate-change-2022-impacts-adaptation-and-vulnerability/161F238F406D530891AAAE1FC76651BD). В то же время реакция растительности (например, увеличение NDVI) в этих зонах оказывается соизмеримой или даже опережающей скорость климатических изменений, поскольку исчезают главные лимитирующие факторы развития биомассы, такие как низкая температура и короткий вегетационный период (Титкова, Золотокрылин, 2025). В таёжной зоне реакция растительности соответствует климатическим трендам, где увеличение сомкнутости полога при увеличении тепло-влагообеспеченности в тёплый период и влечёт за собой рост NDVI, охлаждение поверхности и уменьшение *Al* поверхности. В южной тайге Средней Сибири реакция подстилающей поверхности на общее потепление мозаична и замедляется из-за влияния пирогенного фактора, что приводит к мозаичным изменениям NDVI и росту *Al*. В южных зонах, в лесостепи и степи, реакция спутниковых характеристик поверхности на повышение температуры ослаблена антропогенным воздействием, а реакция ландшафтов направлена в сторону аридизации (снижение NDVI, рост *Al*), что соответствует усилению термического стресса. Таким образом, скорость реакции спектральной структуры ландшафтов в целом ниже скорости климатических изменений в бореальных ландшафтах, но может быть сопоставима или выше зонах с разреженной растительностью. В арктических экосистемах даже небольшое потепление вызывает значительное увеличение растительности. В суббореальной зоне, где велико антропогенное воздействие, потепление и уменьшение осадков вызывают деградацию поверхности и, как следствие, изменение её спектральных характеристик.

Заключение

На основании средних значений климатических характеристик и их стандартного отклонения за период 1961–1990 гг. уточнены диапазоны изменений климатических параметров ландшафтных зон европейской части России и установлены эти диапазоны для азиатской части России.

Современное изменение климата 2000–2022 гг. привело к смещению климатических параметров к верхней границе или за пределы диапазонов характерных значений для базового периода (1961–1990). Наиболее чувствительны тундровые, лесотундровые и лесные ландшафты ЕТР, Сибири и Дальнего Востока, где фиксируется сближение климатических параметров соседних подзон. Южные зоны (лесостепь, степь) более инертны, за исключением юго-запада ЕТР. Климатические условия, типичные для каждой зоны, всё чаще соответствуют климатическим режимам более южных ландшафтов. Это создаёт фундаментальные предпосылки для трансформации климатических условий природных зон, скорость и направленность которой определяются также антропогенной нагрузкой и инерционностью растительных сообществ.

Диапазоны и связи NDVI, *Al* и T_s представляют собой устойчивый индикатор зональной принадлежности. Реакция ландшафтов на климатические изменения в России не является однонаправленной. Выделяется классическое зелёное охлаждение (ЕТР, Чукотка), мозаичный антропогенно-климатический тип (юг Западной Сибири, юг Средней Сибири) и смена функционального типа растительности (Дальний Восток). Положительная динамика NDVI сама по себе не может служить однозначным индикатором улучшения экологических условий. Её интерпретация требует совместного анализа NDVI, *Al* и T_s, а также учёта пирогенного и антропогенного факторов. Скорость реакции спектральных свойств ландшафтов в целом

ниже скорости климатических изменений в бореальных ландшафтах, но может быть сопоставима с ней или выше при разреженном растительном покрове в арктических и субарктических экосистемах, а также в суббореальной зоне.

Исследование выполнено при поддержке гранта Минобрнауки РФ (Соглашение № 075-15-2024-554 от 24.04.2024).

Литература

1. *Анисимов О. А.*, *Жильцова Е. Л.*, *Ренева С. А.* Оценка критических уровней воздействия изменения климата на природные экосистемы суши на территории России // Метеорология и гидрология. 2011. № 11. С. 31–41.
2. *Базилевич Н. И.*, *Гребенщиков О. С.*, *Тишков А. А.* Географические закономерности структуры и функционирования экосистем / под ред. Ю. А. Исакова. М.: Наука, 1986. 297 с.
3. *Барталев С. А.*, *Стыценко Ф. В.*, *Егоров В. А.*, *Лупян Е. А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
4. *Берг Л. С.* Физико-географические (ландшафтные) зоны СССР. 2-е изд. Л.: Ленинградский гос. ун-т, 1936. 424 с.
5. *Величко А. А.*, *Борисова О. К.*, *Зеликсон Э. М.*, *Морозова Т. Д.* К оценке изменений в состоянии растительного и почвенного покровов Восточно-Европейской равнины в XXI веке вследствие антропогенного изменения климата // Проблемы эколог. мониторинга и моделирования экосистем. 2002. Т. 18. С. 208–220.
6. *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.
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. М.: Росгидромет, 2023. 104 с.
8. *Докучаев В. В.* К учению о зонах природы. Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны. СПб.: типография СПб. Градоначальства, 1899. 28 с.
9. *Елисеев А. В.*, *Мохов И. И.* Влияние учёта радиационного эффекта изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на воспроизведение климата XVI–XXI веков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 1. С. 18–34.
10. *Замолодчиков Д. Г.* Оценка климатогенных изменений разнообразия древесных пород по данным учета лесного фонда // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 382–392.
11. *Иванов Н. Н.* Об определении величин испаряемости // Изв. Всесоюзного геогр. об-ва. 1954. Т. 86. № 2. С. 189–196.
12. *Иванов П. П.*, *Ядрихинский И. В.* Сельскохозяйственные и лесные ландшафты Сибири и Дальнего Востока // Вестн. науки. 2024. Т. 1. № 4 (73). С. 636–642.
13. *Исаченко А. Г.* Ландшафтоведение и физико-географическое районирование. М.: Высшая школа, 1991. 370 с.
14. *Ковалев А. П.*, *Громыко О. С.* Освоение и состояние лесов Дальнего Востока // Природообустройство. 2023. № 1. С. 115–121. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-115-121.
15. *Максимова В. Ф.*, *Майорова Л. А.*, *Петропавловский Б. С.* Основные факторы среды, влияющие на усыхание пихтово-еловых лесов Дальнего Востока. // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2019. № 1. С. 61–66.
16. *Мезенцев В. С.* Водный баланс. Новосибирск: Наука, 1973. 229 с.
17. *Мохов И. И.* Изменения климата: причины, риски, последствия, проблемы адаптации и регулирования // Вестн. РАН. 2022. Т. 92. № 1. С. 3–14. DOI: 10.31857/S0869587322010066.
18. *Попова В. В.* Современные изменения климата на севере Евразии как проявление вариаций крупномасштабной атмосферной циркуляции // Фундам. и приклад. климатология. 2018. № 1. С. 84–111. DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-84-111.
19. *Семенов В. А.*, *Мохов И. И.*, *Латиф М.* Влияние температуры поверхности океана и границ морского льда на изменение регионального климата в Евразии за последние десятилетия // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2012. Т. 48. № 4. С. 403–421.
20. *Сергиенко В. Г.* Динамика границ лесорастительных зон России в условиях изменения климата // Тр. Санкт-Петербургского научно-исслед. ин-та лесного хоз-ва. 2015. № 1. С. 5–19.
21. *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.

22. *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. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323.
23. *Титкова Т. Б.*, *Золотокрылин А. Н.* Проявление летнего потепления в изменениях спектральных характеристик поверхности природных зон России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2025. Т. 22. № 3. С. 193–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-193-206.
24. *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. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126.
25. *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.
26. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации / под ред. В. М. Катцова. СПб.: Наукоемкие технологии, 2022. 676 с.
27. *Харитоненков М. А.* Генезис лесостепей Западно-Сибирской равнины в свете современных представлений теоретической экологии // Вестн. Тверского гос. ун-та. Сер.: биология и экология. 2010. № 20. С. 72–82.
28. *Шинкаренко С. С.* Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 192–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.
29. *Шпедт А. А.*, *Едимеичев Ю. Ф.*, *Трубников Ю. Н.* Агроэкологические аспекты проектирования адаптивно-ландшафтных систем земледелия в условиях Средней Сибири // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 5. С. 5–10. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10501.
30. *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 / eds. R. Mechler, L. M. Bouwer, T. Schinko et al. Cham: Springer, 2019. P. 63–82. DOI: 10.1007/978-3-319-72026-5_3.
31. *Gonzalez P.*, *Neilson R. P.*, *Lenihan J. M.*, *Drapek R. J.* Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change // Global Ecology and Biogeography. 2010. V. 19. P. 755–768. DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x.
32. *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. P. 627–647. DOI: 10.5194/esd-7-627-2016.

Changes in climatic and spectral structure of landscape zones in Russia

V. V. Vinogradova, T. B. Titkova

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

On the basis of analysis of climatic parameters of meteorological stations (July, January temperatures, sums of active temperatures, precipitation) and satellite data (Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), albedo *Al*, surface temperature T_s), an assessment was made of changes in the climatic and spectral structure of landscape zones and subzones of Russia as a result of climatic shifts at the end of the 20th – beginning of the 21st century. It has been established that climatic parameters in 2000–2022 in most landscape zones of Russia have shifted to the upper limit or beyond the ranges of the base period (1961–1990). In tundra, forest-tundra and forest landscapes of the European territory of Russia, there is a massive transition of climatic parameters of natural zones to values characteristic of more southern landscapes. In forest zones of Siberia and the Far East, a convergence of thermal parameters of neighboring subzones is recorded, which creates fundamental prerequisites for transformation of climatic conditions. It is shown that the ranges and relationships of NDVI, *Al* and

T_s represent a stable indicator of zonal affiliation. The response of landscapes to climate change is heterogeneous and varies from the classic "green cooling" (European Russia, Chukotka) to an increase in phytomass when dark coniferous species are replaced by light coniferous and small-leaved species with a higher *Al* (Far East). Positive dynamics of NDVI in itself is not an unambiguous indicator of improvement in environmental conditions, since its interpretation requires taking into account *Al* and T_s, as well as pyrogenic and anthropogenic factors. In boreal zones, the response rate of the spectral structure of landscapes is lower than the rate of climate change. In Arctic ecosystems, where even small warming causes significant vegetation response, this rate is comparable or higher; the same is typical of territories south of the forest-steppe where there is a high anthropogenic impact against the background of thermal stress and decreased humidity.

Keywords: landscape zones and subzones, climate change, temperature, precipitation, humidification, NDVI, radiation temperature, surface albedo

Accepted: 02.07.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-5-282-299

References

1. Anisimov O.A., Zhiltsova E.L., Reneva S.A., Estimation of critical levels of climate change influence on the natural terrestrial ecosystems on the territory of Russia, *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2011, No. 11, pp. 31–41 (in Russian).
2. Bazilevich N.I., Grebenshchikov O.S., Tishkov A.A., *Geograficheskie zakonomernosti struktury i funkcionirovaniya ehkosistem* (Geographical patterns of structure and functioning of ecosystems), Yu.A. Isakov (ed.), Moscow: Nauka, 1986, 297 p. (in Russian).
3. 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).
4. Berg L.S., *Fiziko-geograficheskie* (*landshaftnye*) *zony SSSR* (Physiographic (landscape) zones of the USSR), 2nd ed., Leningrad: Leningradskii gosudarstvennyi universitet, 1936, 424 p. (in Russian).
5. Velichko A.A., Borisova O.K., Zelikson E.M., Morozova T.D., Estimation of shifts in a state of vegetation and soil cover of the East European Plain in the 21st century under anthropogenic climate change, *Problems of Ecological Monitoring and Ecosystem Modelling*, 2002, V. 18, pp. 208–220 (in Russian).
6. 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.
7. *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. (in Russian).
8. Dokuchaev V.V., *K ucheniyu o zonakh prirody. Gorizontal'nye i vertikal'nye pochvennye zony* (To the doctrine of natural zones. Horizontal and vertical soil zones), Saint Petersburg: Tipografiya Sankt-Peterburgskogo Gradonachal'stva, 1899, 28 p. (in Russian).
9. Eliseev A.V., Mokhov I.I., Effect of including land-use driven radiative forcing of the surface albedo of land on climate response in the 16th–21st centuries, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2011, V. 47, No. 1, pp. 15–30, DOI: 10.1134/S0001433811010075.
10. Zamolodchikov D.G., Estimation of climate-related changes of tree species diversity based on results of forest resource inventory, *Uspekhi sovremennoi biologii*, 2011, V. 131, No. 4, pp. 382–392 (in Russian).
11. Ivanov N.N., On the determination of evaporation values, *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*, 1954, V. 86, No. 2, pp. 189–196 (in Russian).
12. Ivanov P.P., Yadrikhinsky I.V., Agricultural and forest landscapes of Siberia and the Far East, *Vestnik nauki*, 2024, V. 1, No. 4 (73), pp. 636–642 (in Russian).
13. Isachenko A.G., *Landshaftovedenie i fiziko-geograficheskoe raionirovanie* (Landscape science and physical-geographical zoning), Moscow: Vysshaya shkola, 1991, 370 p. (in Russian).
14. Kovalev A.P., Gromyko O.S., Development and condition of forests of the Far East, *Prirodoobustroistvo*, 2023, No. 1, pp. 115–121 (in Russian), DOI: 10.26897/1997-6011-2023-1-115-121.
15. Maksimova V.F., Mayorova L.A., Petropavlovsky B.S., Main environmental factors influencing the drying of the Far East fir-spruce forests, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5. Geografiya*, 2019, No. 1, pp. 61–66 (in Russian).
16. Mezentsev V.S., *Vodnyi balans* (Water balance), Novosibirsk: Nauka, 1973, 229 p. (in Russian).
17. Mokhov I.I., Climate change: Causes, risks, consequences, and problems of adaptation and regulation, *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 2022, V. 92, No. 1, pp. 1–11, DOI: 10.1134/S101933162201004X.

18. Popova V. V., Present-day changes in climate in the north of Eurasia as a manifestation of variation of the large-scale atmospheric circulation, *Fundamental and Applied Climatology*, 2018, No. 1, pp. 84–111 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2018-1-84-111
19. Semenov V. A., Mokhov I. I., Latif M., Influence of the ocean surface temperature and sea ice concentration on regional climate changes in Eurasia in recent decades, *Izvestiya*, *Atmospheric and Oceanic Physics*, 2012, V. 48, No. 4, pp. 355–372, DOI: 10.1134/S0001433812040135.
20. Sergienko V. G., The dynamics of the boundaries of forest vegetation zones in Russia under climate change, *Proc. Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2015, No. 1, pp. 5–19 (in Russian).
21. 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).
22. Titkova T. B., Vinogradova V. V., Climate changes in transitional natural areas of Russian northern regions and their display in landscape spectral characteristics, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 5, pp. 310–323 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-310-323.
23. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Summer warming effects on changes in spectral characteristics of natural zone surfaces in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2025, V. 22, No. 3, pp. 193–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-193-206.
24. 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.
25. Tishkov A. A., Belonovskaya E. A., Vaisfeld M. A. et al., Regional biogeographical effects of "fast" climate changes in the Russian Arctic in the 21st century, *Arctic: ecology and economy*, 2020, No. 2 (38), pp. 31–44 (in Russian), DOI: 10.25283/2223-4594-2020-2-31-44.
26. *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.), Saint Petersburg: Naukoemkie tekhnologii, 2022, 676 p. (in Russian).
27. Kharitonenkov M. A., Genesis of forest-steppes of West-Siberian Plain in a view of modern concepts of theoretical ecology, *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Biologiya i ehkologiya*, 2010, No. 20, pp. 72–82 (in Russian).
28. Shinkarenko S. S., Changes in spectral reflectance characteristics of the Northern Caspian zonal landscapes under pyrogenic influence, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 3, pp. 192–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.
29. Shpedt A. A., Edimeichev Yu. F., Trubnikov Yu. N., Agroecological aspects of the design of adaptive-landscape systems of agriculture under conditions of Central Siberia, *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2018, V. 32, No. 5, pp. 5–10 (in Russian), DOI: 10.24411/0235-2451-2018-10501.
30. 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*, R. Mechler, L. M. Bouwer, T. Schinko et al. (eds.), Cham: Springer, 2019, pp. 63–82, DOI: 10.1007/978-3-319-72026-5_3.
31. Gonzalez P., Neilson R. P., Lenihan J. M., Drapek R. J., Global patterns in the vulnerability of ecosystems to vegetation shifts due to climate change, *Global Ecology and Biogeography*, 2010, V. 19, pp. 755–768, DOI: 10.1111/j.1466-8238.2010.00558.x.
32. 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, pp. 627–647, DOI: 10.5194/esd-7-627-2016.