

## Устойчивость ландшафтов Калмыкии и Дагестана к долговременным изменениям климата

В. В. Виноградова<sup>1,2</sup>, Т. Б. Титкова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт географии РАН, Москва, 119017, Россия*  
*E-mail: vvvinog@yandex.ru, titkova@igras.ru*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»*  
*Москва, 109028, Россия*

Все сценарии изменения климата прогнозируют дальнейший рост глобальной приземной температуры, по меньшей мере, до середины текущего столетия. Современные и будущие климатические изменения могут привести к изменениям в составе, структуре и функционировании растительных сообществ, где тепло и влага являются лимитирующими факторами существования растительности. Оценка резилиентности ландшафтов Калмыкии и Дагестана к долговременным изменениям климата проводилась с использованием климатических характеристик: температуры, осадков и индекса сухости, а также комплексного индекса воздействия изменения климата на природные экосистемы. Реакция подстилающей поверхности (её температуры и растительного покрова) на изменения климата оценивалась с применением спутникового мониторинга. Использовались данные реанализа ERA5-Land (*англ.* ECMWF ReAnalysis 5-Land) и MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Оценка резилиентности Прикаспийских пустынно-степных биомов к долговременным изменениям климата показала, что равнинные биомы Дагестана и Калмыкии достаточно устойчивы к климатическим изменениям начала XXI в., но усиление изменения климата в 2011–2020 гг. приводит к снижению устойчивости предгорных и низкогорных биомов Дагестана под воздействием роста температуры и уменьшения осадков, что подтверждается колебаниями температуры поверхности и вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), отражающими реакцию подстилающей поверхности.

**Ключевые слова:** резилиентность, ландшафт, климатические изменения, индекс воздействия изменения климата на природные экосистемы, нормализованный вегетационный индекс, NDVI, температура поверхности, биом

Одобрена к печати: 28.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-188-199

### Введение

Как показано в докладе IPCC (*англ.* Intergovernmental Panel on Climate Change) об изменении климата, наблюдаемое изменение климата способствовало усилению сельскохозяйственных и экологических засух (IPCC..., 2021). Согласно всем рассмотренным сценариям выбросов глобальная приземная температура будет продолжать расти, по меньшей мере, до середины столетия и повысится на 1,5–2 °C в течение XXI в., если не произойдёт резкого сокращения выбросов CO<sub>2</sub> и других парниковых газов. В публикации (IPCC..., 2021) также указывается, что каждые дополнительные 0,5 °C глобального потепления вызывают увеличение интенсивности и частоты экстремально жарких событий, включая волны жары и сильных осадков, а также сельскохозяйственных и экологических засух. Сельскохозяйственная и экологическая засухи возникают в результате совокупного недостатка осадков и избыточной эвапотранспирации в течение вегетационного периода, что негативно сказывается на производстве сельскохозяйственных культур и функционировании экосистем в целом. На территории России прогнозируется повышение вероятности сильных засух на юге европейской территории России (ЕТР) в середине века (Богданович и др., 2021), что воспрепятствует распространению степной растительности в будущем. По данным модельных прогнозов, к середине XXI в. климатические условия уже не будут соответствовать господствующему типу растительности для большинства биомов (Жильцова, Анисимов, 2015).

Современные и будущие перемены климата могут вызывать изменения в составе, структуре и функционировании растительных экосистем, особенно в тех областях, где тепло и влага являются лимитирующими факторами существования растительности. В частности, это относится к засушливым ландшафтам Калмыкии и равнинной части Дагестана, а также к его горным ландшафтам.

Резилиентность территории с учётом климатических факторов часто понимается как устойчивость экосистем, претерпевающих изменения под воздействием меняющегося климата. Важным направлением исследования резилиентности является проблема воздействия долговременных климатических изменений на растительность. Создаваемые ими вызовы затрагивают все стороны резилиентности: способность восстанавливаться после краткосрочных экстремальных климатических негативных событий; способность адаптации к длительным и медленным климатическим изменениям и разработка новых стратегий восстановления и адаптации, основанных на современных технологиях и материалах, подготовке населения, способного к реализации стратегии резилиентности.

Существует достаточно много индексов и показателей резилиентности ландшафтов и отдельных видов растений к изменениям климата, катастрофическим событиям или антропогенному воздействию. Оценивается устойчивость как ландшафта в целом, так и отдельных видов к текущим климатическим изменениям или к воздействию конкретного фактора.

В частности, в работе (Анисимов и др., 2011) для оценки критического уровня изменения климата, приводящего к существенным модификациям ключевых элементов природной среды, используется тезис, что зональность растительности определяется главным образом соотношением теплообеспеченности и увлажнения. Считается, что существенными являются изменения гистерезисного типа, при которых траектории климатообусловленного развития элементов системы в прямом и обратном направлении не совпадают (Анисимов и др., 2011; Anisimov et al., 2017). Этот подход использовался в работах (Анисимов и др., 2011; Жильцова, Анисимов, 2015; Титкова, Виноградова, 2015; Anisimov et al., 2017). В частности, было показано, что уровень воздействия изменения климата на растительность тундр, главным образом в Западной Сибири, следует считать критическим, поскольку из-за гистерезиса для возврата в прежнее состояние недостаточно вернуть климатические характеристики к их исходным значениям (Титкова, Виноградова, 2015).

Похожий набор показателей использовался в работе (Парфенова, Чебакова, 2023) для моделирования возможной трансформации горной растительности, основных лесообразующих пород и продуктивности насаждений в горах Южной Сибири в меняющемся климате. В построенной модели климатические характеристики детерминируют границы между высотно-поясными комплексами растительности.

В работе (Дмитриев и др., 2020) для оценки устойчивости ландшафтов используется большой набор параметров, всесторонне описывающих состояние ландшафта. В число этих показателей входит индекс биологической эффективности климата (ТК) — интегральный критерий тепло- и влагообеспеченности ландшафта, от которого зависит устойчивость ландшафта. В другой публикации (Goberville et al., 2015) в качестве предикторов модели устойчивости различных биомов карликовой берёзы и каштана в условиях климатических изменений используются годовой диапазон температуры, среднегодовая температура и осадки в самом засушливом и самом холодном квартале и осадки самого тёплого квартала. Пространственная резилиентность лесных ландшафтов в условиях изменения климата при восстановлении от ветровалов рассматривается в работе (Lucash et al., 2017) на основе моделирования лесных сообществ. Для оценки устойчивости количественно определялась степень, в которой биомасса и видовой состав на сильно нарушенных участках вернулись в состояние, существовавшее до нарушения для разных сценариев изменения климата. В качестве меры устойчивости ландшафта для каждого сценария использовалось евклидово расстояние между начальным и конечным периодом времени (Lucash et al., 2017).

Цель настоящей работы — оценка резилиентности (устойчивости) степных и горных ландшафтов Калмыкии и Дагестана к долговременным изменениям климата на основе характеристик температуры, осадков и индекса сухости, а также комплексного индекса воздей-

ствия изменения климата на природные экосистемы и их проявления в параметрах поверхности (температуре поверхности и растительном покрове) с использованием спутникового мониторинга.

## Материалы и методы

Исследование устойчивости аридных и горных ландшафтов Дагестана и Калмыкии проводилось на основании данных температуры на высоте 2 м и осадков реанализа ERA5-Land (*англ.* ECMWF ReAnalysis 5-Land) (<https://publications.copernicus.org>). Реанализ создан Европейским центром среднесрочных прогнозов ECMWF (*англ.* European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) (<https://climate.copernicus.eu/>) с разрешением  $0,1 \times 0,1^\circ$ . Он объединяет модельные данные с результатами наблюдений в глобально полный и непротиворечивый архив данных с использованием физических законов. В качестве входных параметров для смоделированных приземных полей используются температура и влажность воздуха с учётом орографии. Применение данных ERA5 обусловлено высокой точностью описания температурного режима (Muñoz-Sabater et al., 2021). На территории России реанализ завышает температуру воздуха в пределах  $0,1^\circ\text{C}$  для европейской части России. Дефицит влажности воздуха в степной и сухостепной зоне может преувеличиваться до 6 % (Григорьев и др., 2020). По оценкам исследования (Медведев, Степаненко, 2020), ERA-5 даёт ошибку осадков близкую к случайной. По другим данным, в среднем по территории России ERA5 завышает количество осадков летом до 14 % (Григорьев и др., 2022).

Уровень устойчивости ландшафта к меняющемуся климату оценивался с использованием индекса воздействия изменения климата на природные экосистемы (Анисимов и др., 2011). Для расчёта этого индекса применялась функция изменения средних значений следующих климатических параметров: сумма температуры выше  $5^\circ\text{C}$ , характеризует температурный режим вегетационного периода; сумма температуры ниже  $0^\circ\text{C}$ , характеризует зимние условия; индекс сухости, равный отношению суммы температуры выше  $5^\circ\text{C}$  к годовому количеству осадков:

$$K = \sum_1^3 \frac{(I_i - \bar{I}_i)^2}{\bar{I}_i^2},$$

где  $\bar{I}_i$  — параметры за базовый период 1961–1990 гг.;  $I_i$  — параметры за рассматриваемые периоды. Чем больше индекс, тем больше вероятность влияния изменения климата на биом. Все параметры рассчитывались по данным реанализа ERA5-Land для территории Калмыкии и Дагестана. Современные тенденции климатических изменений были получены при сравнении базового периода (1961–1990) и двух десятилетий современного периода: 2000–2010 и 2011–2020 гг. Дополнительно оценивались изменения и линейные тренды входящих в индекс климатических параметров.

Реакция растительности и подстилающей поверхности на долговременные климатические изменения рассматривалась на основе анализа стандартных продуктов спутникового мониторинга MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с пространственным разрешением  $0,05 \times 0,05^\circ$ : температуры поверхности ( $T_s$ ) и вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index). Анализировались среднемесячные значения этих параметров за весну (апрель – май) и лето (июнь – август) для периодов 2000–2020, 2000–2010 и 2011–2020 гг.

Температура поверхности ( $T_s$ ) рассчитывалась по модели MOD11C2 версии 061 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c2v061/>). Значения в стандартном продукте MOD11C3 получены усреднением величин из соответствующего месяца ежедневных файлов MOD11C1.

Реакция растительного покрова на долговременные климатические изменения оценивалась при помощи вегетационного индекса NDVI, который представляет собой нормированную разность альбедо подстилающей поверхности в видимой и ближней инфракрасной области спектра и является индикатором фотосинтетической активности растительности.

Анализировались данные NDVI MODIS, модель MOD13C2 версии 061 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v061/>). Ежемесячный продукт принимает все значения MOD13A2, которые перекрывают месяц и доступны с 2000 г. по настоящее время. Глобальные данные представляют собой безоблачные пространственные композиты. Для определения NDVI используется контраст характеристик двух каналов из набора мультиспектральных растровых данных: поглощения пигментом хлорофилла в красном канале и высокой отражательной способности растительного покрова в инфракрасном канале.

В качестве меры интенсивности изменения компонент индекса воздействия изменения климата на природные экосистемы, температуры поверхности и вегетационного индекса NDVI использовался коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость изменений за рассматриваемые интервалы времени. Обработка массивов проводилась в пакетном анализе MatLab. Для оценки статистической значимости тренда использовался её 95%-й уровень по критерию Стьюдента.

## Результаты и обсуждение

### Климатические изменения

Равнинные биомы Калмыкии и Дагестана представлены Прикаспийскими опустыненными степями и остепнёнными пустынями, в горах отмечается высотная поясность (от аридных редколесий и шибляка, дубовых лесов и полидоминантных широколиственных лесов до нивального пояса) (Карта..., 2018). Прикаспийские пустынно-степные биомы характеризуются невысоким биоразнообразием сосудистых растений — около 400 видов для опустыненных степей и 200–300 видов для остепнённых пустынь. Биоразнообразие горных биомов Дагестана значительно выше — 600–800 видов (Карта..., 2018). На этих территориях уровень критического воздействия изменения климата, приводящего к существенной перестройке ландшафтов, в первую очередь определяется характером увлажнения, а также теплообеспеченностью и их соотношением. Анализ изменения теплообеспеченности для современного (2000–2020) периода показывает значимый рост суммы температуры выше +5 °С, т. е. суммы температуры за вегетационный период, по сравнению со среднемноголетними условиями 1961–1990 гг., на 300–500 °С (рис. 1а, см. с. 192). Наибольшее увеличение, более 500 °С, отмечается на юге Прикаспийской низменности, в районах опустыненных степей и остепнённых пустынь Калмыкии и Дагестана. Наименьшие, но значимые изменения суммы температуры выше +5 °С характерны для большей части Калмыкии (порядка 300 °С) и горных районов Дагестана (200–300 °С). На всей территории в современном климате (2000–2020) наблюдаются положительные тренды суммы температуры выше +5 °С, их максимальные значения (150–180 °С/10 лет) отмечаются в предгорных районах и на побережье Дагестана, а также на севере Калмыкии. Тренды значимы на большей части территории, за исключением горных районов Дагестана и юга Калмыкии (рис. 2а, см. с. 192).

Одновременно с ростом суммы активной температуры во всём регионе происходит сокращение суммы отрицательной температуры (см. рис. 1б). По сравнению со среднемноголетними условиями наибольшее значимое понижение отмечается на севере Калмыкии, на 150 °С, и на 200 °С — в предгорьях Дагестана. Меньше всего сумма отрицательной температуры уменьшается на побережье Каспийского моря, но здесь она и так была невелика. Тренды суммы отрицательной температуры за 2000–2020 гг. на всей территории не превышают 100 °С/10 лет с максимумом в предгорьях. Тренды значимы в горах Дагестана (см. рис. 2б).

Изменение количества осадков в засушливых районах имеет особое значение для устойчивости ландшафтов. В начале XXI в. практически на всей рассматриваемой территории наблюдается уменьшение среднегодовых осадков по сравнению со среднемноголетними значениями, но значимые изменения только в предгорьях (см. рис. 1в). Наибольшее понижение — на 40–60 мм — отмечается в опустыненных степях Дагестана. В Калмыкии сумма годовых осадков сокращается на 20–40 мм с максимумом уменьшения на севере республики. Для

обеих республик характерны значимые отрицательные тренды осадков, максимальные значения которых отмечаются на западе Калмыкии (40–50 мм/10 лет) и в предгорных районах Дагестана (до 60 мм/10 лет), минимальные значения в низовьях реки Терек — до 20 мм/10 лет (см. рис. 2в).

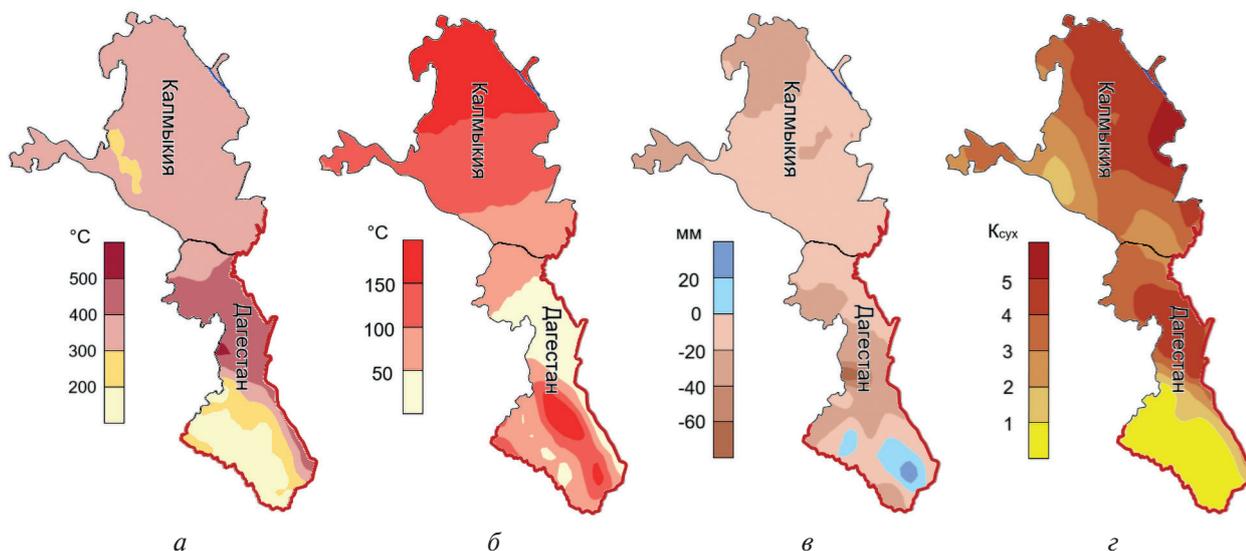


Рис. 1. Изменение в 2000–2020 гг. по сравнению с 1961–1990 гг.: а — суммы температуры выше +5 °С (в °С); б — суммы отрицательной температуры (в °С); в — среднегодовых осадков (в мм); з — индекса сухости

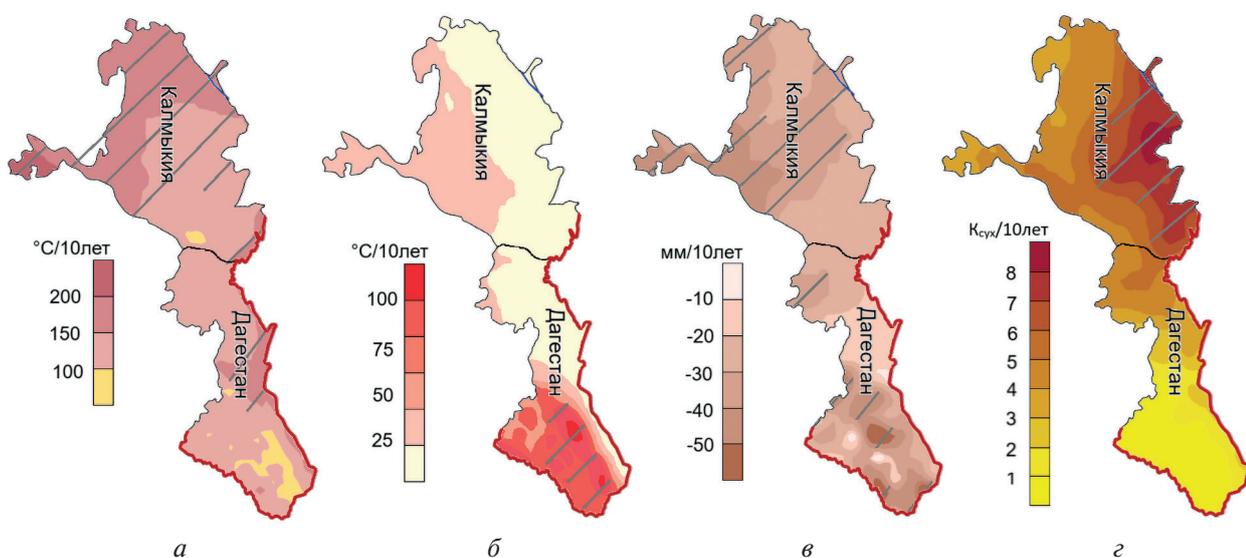


Рис. 2. Тренды за 2000–2020 гг.; а — суммы температуры выше +5 °С (в °С/10 лет); б — суммы отрицательных температур (в °С/10 лет); в — среднегодовых осадков (в мм/10 лет); з — индекса сухости (/10 лет). Значимые тренды показаны штриховкой

В Калмыкии и Дагестане индекс сухости, равный отношению суммы температуры выше +5 °С к годовому количеству осадков и характеризующий гидротермические условия территории, значительно увеличивается в современном климате по сравнению со среднемноголетними условиями. Наибольшее повышение отмечается в самых засушливых ландшафтах Калмыкии, а наименьшее — в горах Дагестана (см. рис. 1з). В целом прирост индекса увеличивается с юга-запада на северо-восток. Максимальные значимые тренды индекса сухости наблюдаются на северо-востоке Калмыкии (см. рис. 2з).

### Устойчивость ландшафтов

Как было показано, зональность растительности во многом определяется теплообеспеченностью в вегетационный период, суровостью зим и условиями увлажнения. Индекс воздействия изменения климата на природные экосистемы (Анисимов и др., 2011) включает все эти компоненты. Он был рассчитан для периода 2000–2020 гг. и для двух входящих в него десятилетий 2000–2010 гг. и 2011–2020 гг. Считается, что чем выше индекс, тем более неустойчиво растительное сообщество к климатическим изменениям. Полученные результаты показывают, что растительные сообщества засушливых ландшафтов равнинной части Дагестана и Калмыкии достаточно устойчивы к изменениям климата, наблюдавшимся на этих территориях в начале XXI в., а именно к росту как зимней, так и летней температуры и уменьшению осадков (рис. 3а, б), что, по-видимому, связано с невысоким биоразнообразием этих биомов и хорошей адаптацией растительности к засушливым условиям. А. Б. Биарсланов с соавторами (2023) отмечают, что на севере Дагестана в 2022 г. наблюдалось восстановление растительности в очагах опустынивания, образовавшихся в результате засухи и пыльных бурь 2020–2021 гг. Восстановление растительного покрова было связано с благоприятными гидротермическими условиями второй половины 2021 г. и снижением поголовья скота (Шинкаренко и др., 2022). Изучая два периода 2000–2010 и 2011–2020 гг., можно отметить, что в первое десятилетие практически все рассматриваемые ландшафты устойчивы к изменениям климата. Во второе десятилетие климатические изменения усиливаются, и в предгорных и низкогорных районах Дагестана индекс воздействия изменения климата на природные экосистемы увеличивается под воздействием роста температуры и уменьшения осадков. В то же время биомы опустыненных степей и остепнённых пустынь Калмыкии и Дагестана, а также горные биомы по-прежнему остаются довольно устойчивыми к климатическим изменениям, но требуют продолжения мониторинга состояния растительности и регулирования пастбищных нагрузок (Шинкаренко и др., 2022). В работе (Титкова, Золотокрылин, 2022) подчёркивается, что в Калмыкии площадь земель с различной интенсивностью опустынивания сильно изменяется год от года, что также показывает возможность восстановления растительности при благоприятных условиях.

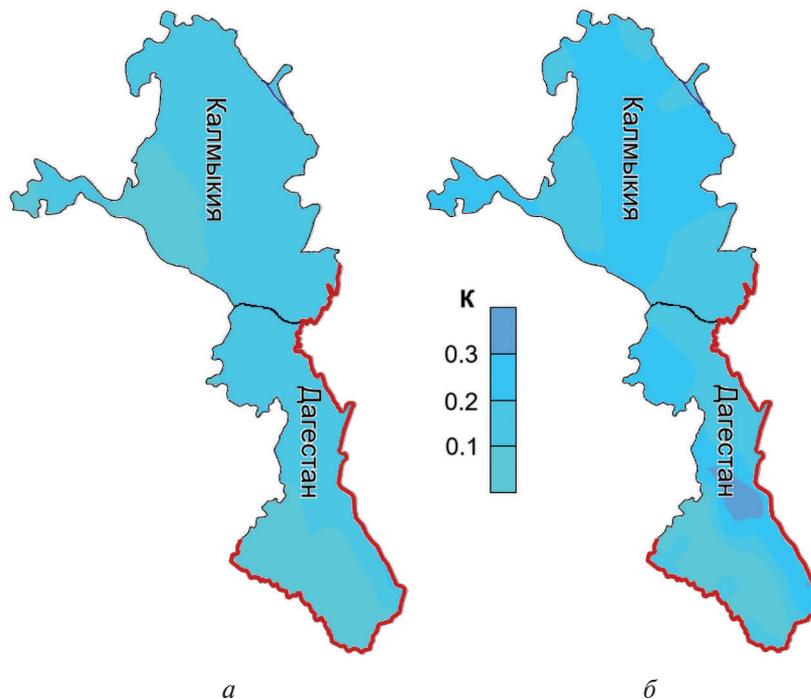


Рис. 3. Индекс воздействия изменения климата на природные ландшафты (K) для периодов: а — 2000–2010 гг.; б — 2011–2020 гг.

### Реакция подстилающей поверхности

Температура поверхности может значительно варьировать при разреженной растительности, сохраняя резилентность засушливых ландшафтов равнинной части Дагестана и Калмыкии к изменениям климата (рис. 4). Так, значительный рост весенней и летней  $T_s$  на севере Калмыкии в первое десятилетие XXI в. (см. рис. 4а, I, II) компенсируется её снижением во втором десятилетии. Уменьшение весенней  $T_s$  в районах опустыненных степей южной Калмыкии и северного Дагестана в первое десятилетие XXI в. сменяется ростом во второе десятилетие. Менее значимое повышение летней  $T_s$  в этих районах в начале столетия усиливается во второе десятилетие. А незначимое уменьшение температуры поверхности в 2000–2010 гг. в горных районах Дагестана сменяется ростом весенней и летней  $T_s$  в 2011–2020 гг. (см. рис. 4б, I, II). Но в целом за 2000–2020 гг. на большей части территории отмечается небольшой рост  $T_s$ , особенно весной, но который пока не приводит к снижению устойчивости ландшафтов.

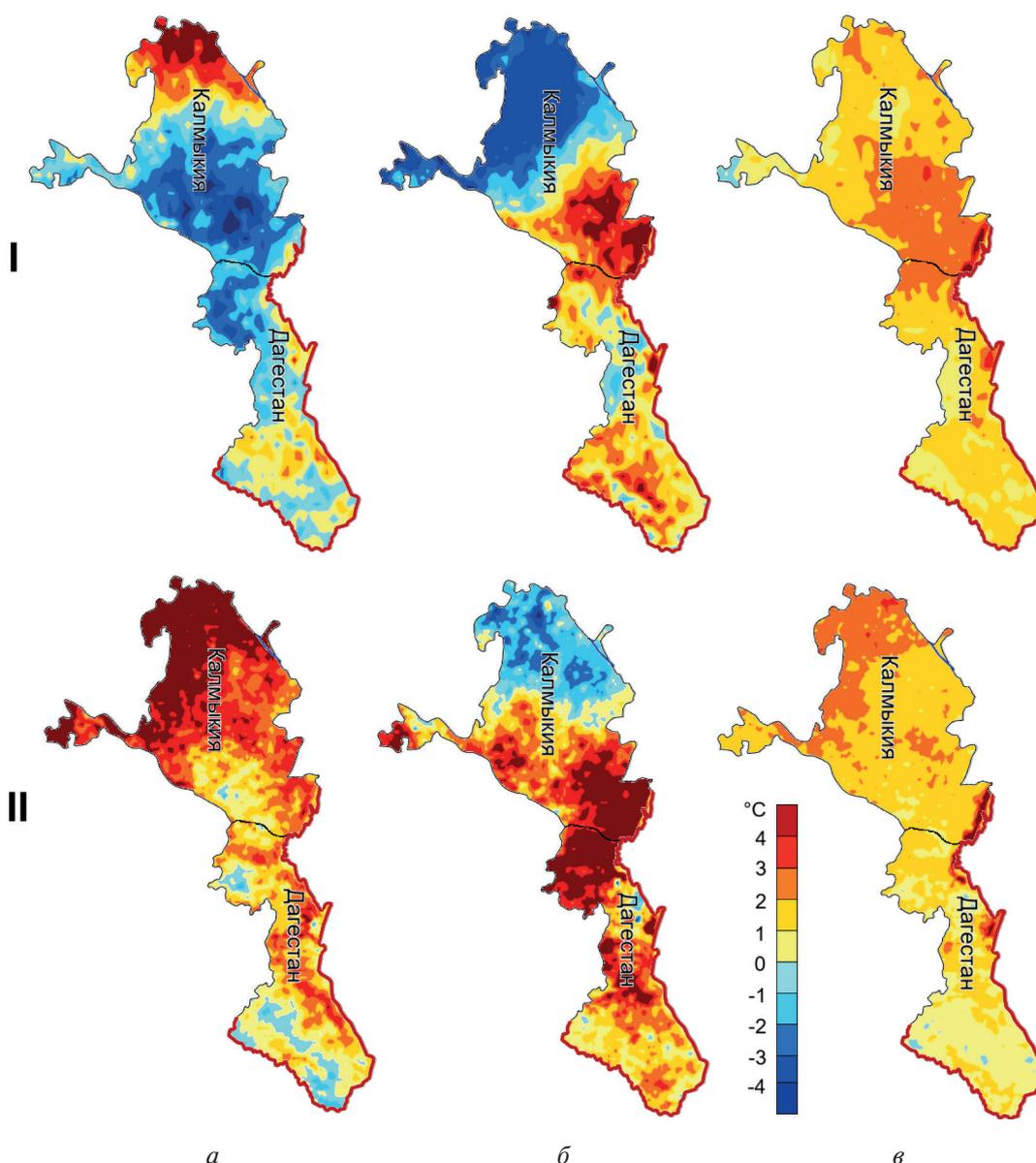


Рис. 4. Тренды температуры поверхности (в  $^{\circ}\text{C}/10$  лет) за весенний (апрель–май) (I) и летний (июнь–август) (II) периоды: а — 2001–2010 гг.; б — 2011–2020 гг.; в — 2000–2020 гг. Тренды значимы при значениях температуры по модулю больше  $1^{\circ}\text{C}$

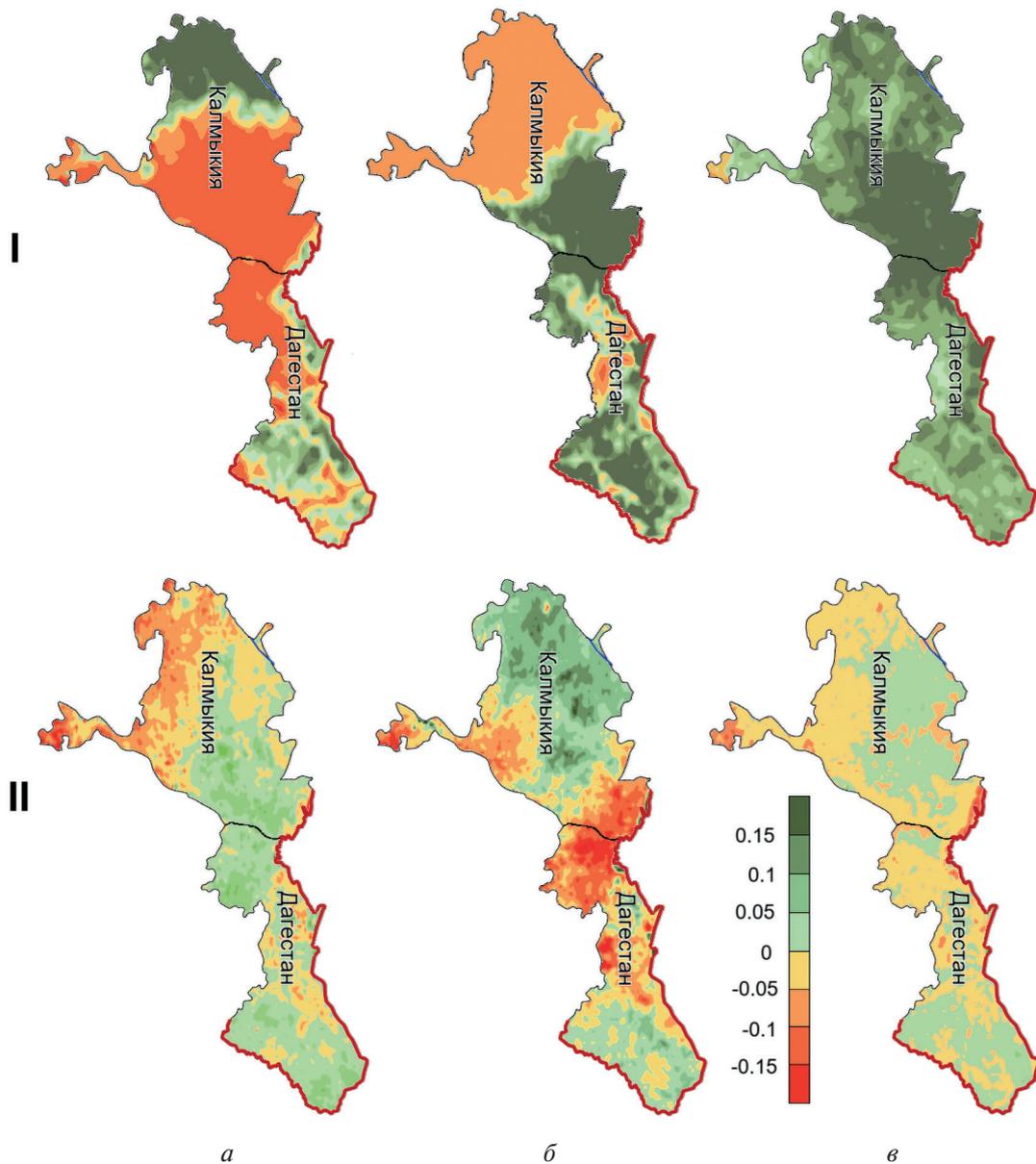


Рис. 5. Тренды NDVI (/10 лет) за весенний (апрель–май) (I) и летний (среднее за июнь–август) (II) периоды: *a* — 2001–2010 гг.; *б* — 2011–2020 гг.; *в* — 2000–2020 гг. Тренды значимы при значениях NDVI по модулю больше 0,05

Устойчивость пустынных, степных и луговых растительных сообществ проявляется в их способности изменять скорость нарастания и величину продуктивности надземной фитомассы при меняющихся условиях внешней среды. Так, максимальная продуктивность растительности во влажные годы вдвое выше, чем в засушливые. Видовое разнообразие растительности изменяется по годам: во влажные годы количество видов увеличивается вдвое по сравнению с засушливыми за счёт развития влаголюбивых видов (Джапова и др., 1991). Реакция растительности на долговременные климатические изменения оценивалась по изменению NDVI и  $T_s$  в весенний и летний период (рис. 4, 5).

В 2001–2010 гг. значимое уменьшение NDVI в весенний период в южной половине Калмыкии и на севере Дагестана (см. рис. 5а, I), а также в западной части Калмыкии в летний период (см. рис. 5а, II) связано с усыханием растительного покрова в результате роста температуры воздуха и уменьшением осадков и сопровождается увеличением температуры поверхности. Во второе десятилетие отмечается понижение вегетационного индекса на севере Калмыкии весной и его рост летом.

Весной на юге Калмыкии и севере Дагестана в первое десятилетие наблюдается сокращение фитомассы, которое сменяется её ростом (возрастание NDVI) во второе десятилетие (см. рис. 5а, б, I). В тех же районах летом отмечается увеличение NDVI в первое десятилетие и его значительное уменьшение во второе (см. рис. 5а, б, II). Летом незначительное изменение фитомассы в опустыненных степных, предгорных и низкогорных биомах Дагестана в 2001–2010 гг. заменяется её значительным сокращением в последующее десятилетие (2011–2020), особенно в опустыненных степных и низкогорных районах. Деградация растительности в этих ландшафтах сопровождается ростом температуры поверхности в летний период. Весной в этих районах отмечаются положительные тренды NDVI. Положительные весенние тренды NDVI за период 2011–2020 гг. тоже могут свидетельствовать о способности ландшафтов Калмыкии и Дагестана к восстановлению (см. рис. 5в, I). Наибольшую реакцию растительного покрова на климатические изменения можно ожидать в предгорных и низкогорных районах Дагестана, которые показывают меньшую резилиентность к росту засушливости.

Разнонаправленные изменения характеристик подстилающей поверхности  $T_s$  и NDVI с начала века в опустыненных степных и остепнённых пустынных ландшафтах Калмыкии и Дагестана, возможно, способствовали достаточной устойчивости этих ландшафтов к наблюдаемым изменениям климата, основанной на особенностях видового состава, характерного для этих биомов. Но увеличение антропогенной нагрузки (в данном случае перевыпаса) в опустыненных степных и остепнённых пустынных ландшафтах Калмыкии и Дагестана увеличивает вероятность деградации ландшафтов (Трофимов, 2024) и, как следствие, нарушения устойчивости этих ландшафтов к текущим климатическим изменениям.

## Выводы

1. В начале XXI в. на всей территории Калмыкии и Дагестана отмечались значимые положительные тренды суммы температуры выше  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  и незначительное сокращение суммы отрицательной температуры, на большей части территории наблюдалось уменьшение среднегодовых осадков, что привело к увеличению индекса сухости, особенно в самых засушливых ландшафтах Калмыкии.
2. Оценка резилиентности Прикаспийских пустынно-степных биомов к долговременным изменениям климата с использованием индекса воздействия изменения климата на природные экосистемы показала, что равнинные биомы опустыненных степей и остепненных пустынь Калмыкии и Дагестана достаточно устойчивы к климатическим изменениям начала XXI в. вследствие невысокого биоразнообразия и хорошей адаптации видов к засухам. В то же время значительная антропогенная нагрузка на эти ландшафты (например, перевыпас) может привести к ослаблению этой устойчивости.
3. В первое десятилетие текущего столетия (2001–2010) практически все рассматриваемые ландшафты можно считать устойчивыми к флуктуациям климата, но усиление климатических изменений в 2011–2020 гг. приводит к снижению устойчивости предгорных и низкогорных биомов Дагестана под воздействием роста температуры и уменьшения осадков. В то же время опустыненные степи и остепнённые пустыни Калмыкии и Дагестана, а также высокогорные ландшафты остаются устойчивыми к потеплению климата.
4. Температура поверхности и вегетационный индекс могут значительно варьировать при разреженной пустынно-степной растительности в зависимости от климатических условий, отражая устойчивость засушливых ландшафтов к изменениям климата.

Работа подготовлена в рамках госзадания АААА-А19-1021051403088-5 (FMWS-2024-0001) и гранта, предоставленного Министерством науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2022-325).

## 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. Биарсланов А. Б., Шинкаренко С. С., Гаджиев И. Р. Картографирование и анализ сезонной динамики площадей опустынивания на севере Дагестана по ежемесячным композитам Sentinel-2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 1. С. 160–175. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-160-175.
3. Богданович А. Ю., Павлова В. Н., Ранькова Э. Я., Семенов С. М. Влияние изменений засушливости в России в XXI веке на пригодность территорий для возделывания зерновых культур // Фундам. и приклад. климатология. 2021. Т. 7. № 1. С. 20–35. DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-20-35.
4. Григорьев В. Ю., Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Степаненко В. М. Оценка точности данных реанализа ERA-5 // Тр. 9-й Международ. научно-практич. конф. «Морские исслед. и образование (MARESEDU-2020)»: сб. ст. М., 2020. С. 47–50.
5. Григорьев В. Ю., Фролова Н. Л., Киреева М. Б., Степаненко В. М. Пространственно-временная изменчивость ошибки воспроизведения осадков реанализом ERA5 на территории России // Изв. РАН. Сер. геогр. 2022. Т. 86. № 3. С. 435–446. DOI: 10.31857/s2587556622030062.
6. Джапова Р. Р., Санкуева З. М., Трофимов И. А. Сезонная и погодичная динамика видового состава, урожайности и запасов корма белопопынных пастбищ северо-западного Прикаспия // Растительные ресурсы. 1991. Т. 27. № 4. С. 1–10.
7. Дмитриев В. В., Огурицов А. Н., Седова С. А. и др. Интегральная оценка устойчивости наземных ландшафтов от балльных оценок к композитным индексам на основе территориальных детерминант // Успехи современ. естествознания. 2020. № 2. С. 45–53. DOI: 10.17513/use.37330.
8. 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.
9. Карта «Биомы России». М 1:7 500 000. М.: МГУ, 2018.
10. Медведев А. И., Степаненко В. М. Влияние внешних параметров на величину речного стока в модели деятельного слоя суши ИВМ–МГУ (на примере р. Северная Двина) // Избранные тр. Международ. конф. и школы молодых ученых по измерениям, моделированию и информ. системам для изучения окружающей среды Enviromis 2020: сб. ст. Томск. 2020. С. 144–148.
11. Парфенова Е. И., Чебакова Н. М. Потенциальное распределение лесов в горах Южной Сибири и Северной Монголии в связи с прогнозируемыми климатическими изменениями к середине века // Изв. РАН, Сер. геогр. 2023. Т. 87. № 7. С. 1019–1031. DOI: 10.31857/S2587556623070129.
12. Туткова Т. Б., Виноградова В. В. Отклик растительности на изменение климатических условий в бореальных и субарктических ландшафтах в начале XXI века // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 3. С. 75–86.
13. Туткова Т. Б., Золотокрылин А. Н. Мониторинг подверженных опустыниванию земель республики Калмыкия // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 2. С. 130–141. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141.
14. Трофимов И. А. Степные агроэкосистемы на пределе возможностей // Материалы 10-го Международ. симп. (Международ. степного форума) «Степи Северной Евразии»: сб. ст. Оренбург, 2024. С. 1338–1342. DOI: 10.24412/cl-37200-2024-1338-1342.
15. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Дорошенко В. В. Спутниковый мониторинг процессов опустынивания на юге европейской России в 2019–2022 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 319–327. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327.
16. Anisimov O., Kokorev V., Zhiltcova Y. Arctic ecosystems and their services under changing climate: Predictive-modeling assessment // Geographical Review. 2017. V. 107. No. 1. P. 108–124. DOI: 10.1111/j.1931-0846.2016.12199.x.
17. Copernicus Publications. <https://publications.copernicus.org/>.
18. Goberville E., Beaugrand G., Hautekèete N.-C. et al. Uncertainties in the projection of species distributions related to general circulation models // Ecology and Evolution. 2015. V. 5. No. 5. P. 1100–1116. DOI: 10.1002/ece3.1411.
19. IPCC, 2021: Summary for policymakers // Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. Cambridge, UK; NY, USA: Cambridge University Press, 2021. P. 3–32. DOI: 10.1017/9781009157896.001.
20. Lucash M. S., Scheller R. M., Gustafson E. J., Sturtevant B. R. Spatial resilience of forested landscapes under climate change and management // Landscape Ecology. 2017. V. 32. P. 953–969. DOI: 10.1007/s10980-017-0501-3.

21. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications // *Earth System Science Data*. 2021. V. 13. No. 9. P. 4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.

## Resilience of the landscapes of Kalmykia and Dagestan to long-term climate changes

V. V. Vinogradova<sup>1,2</sup>, T. B. Titkova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Institute of Geography RAS, Moscow 119017, Russia*  
E-mail: vvvinog@yandex.ru, titkova@igras.ru

<sup>2</sup> *National Research University Higher School of Economics, Moscow 109028, Russia*

All climate change scenarios predict a further increase in global surface temperature, at least until the middle of the current century. Current and future climate changes may lead to alterations in the composition, structure, and functioning of plant communities, where heat and moisture are limiting factors for vegetation survival. The landscapes resilience assessment to long-term climate changes was conducted for Kalmykia and Dagestan using climate characteristics: temperature, precipitation, aridity index, and a complex index indicating the impact of climate change on natural ecosystems. The estimate of underlying surface's (including temperature and vegetation cover) response to climate changes is based on satellite monitoring data from the ERA5-Land (ECMWF ReAnalysis 5-Land) reanalysis and MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). An assessment of the Caspian desert-steppe zone biomes resilience to long-term climate change demonstrates that the lowland biomes of Dagestan and Kalmykia are enough sustainable to climate change at the beginning of the 21<sup>st</sup> century. However, the intensification of climate changes in 2011–2020 leads to a decrease in the resilience of the foothill and low-mountain biomes of Dagestan under the influence of rising temperatures and decreasing precipitation, as confirmed by changes in surface temperature and the vegetation index NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), reflecting the response of the underlying surface.

**Keywords:** resilience, landscape, climate changes, climate change impact index on natural ecosystems, normalized difference vegetation index, NDVI, surface temperature, biome

Accepted: 28.10.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-6-188-199

## References

1. Anisimov O. A., Zhiltsova E. L., Reneva S. A., Assessment of critical levels of climate change impact on natural terrestrial ecosystems in Russia, *Meteorologiya i Gidrologiya*, 2011, No. 11, pp. 31–41 (in Russian).
2. Biarslanov A. B., Shinkarenko S. S., Gadzhiev I. R., Mapping and analysis of the seasonal dynamics of desertification areas in northern Dagestan using Sentinel-2 monthly composites, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 1, pp. 160–175 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-1-160-175.
3. Bogdanovich A. Yu., Pavlova V. N., Rankova E. Ya., Semenov S. M., The impact of changes in aridity in Russia in the 21<sup>st</sup> century on the suitability of territories for cereal cultivation, *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*, 2021, Vol. 7, No. 1, pp. 20–35 (in Russian), DOI: 10.21513/2410-8758-2021-1-20-35.
4. Grigoryev V. Yu., Frolova N. L., Kireeva M. B., Stepanenko V. M., Assessment of the accuracy of ERA-5 reanalysis data, *Trudy 9-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Morskie issledovaniya i obrazovanie (MARESEDU-2020)"* (Proc. 9<sup>th</sup> Intern. Scientific and Practical Conf. "Marine Research and Education (MARESEDU-2020)"), Moscow, 2020, pp. 47–50 (in Russian).
5. Grigoryev V. Yu., Frolova N. L., Kireeva M. B., Stepanenko V. M., Spatial and temporal variability of ERA5 precipitation accuracy over Russia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, Vol. 86, No. 3, pp. 435–446 (in Russian), DOI: 10.31857/s2587556622030062.

6. Dzhapova R. R., Sankueva Z. M., Trofimov I. A., Seasonal and annual dynamics of species composition, productivity, and fodder reserves of white wormwood pastures in the northwestern Caspian region, *Rastitel'nye resursy*, 1991, Vol. 27, No. 4, pp. 1–10 (in Russian).
7. Dmitriev V. V., Ogurtsov A. N., Sedova S. A. et al., Integral assessment of the resilience of terrestrial landscapes: from point-based assessments to composite indices based on territorial determinants, *Uspikhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2020, No. 2, pp. 45–53 (in Russian), DOI: 10.17513/use.37330.
8. Zhiltsova E. L., Anisimov O. A., Dynamics of vegetation in Northern Eurasia: analysis of current observations and forecast for the 21<sup>st</sup> century, *Arctica XXI vek. Estestvennye nauki*, 2015, No. 2(3), pp. 48–59 (in Russian).
9. *Karta "Biomy Rossii". M 1:7 500 000* (Map "Biomes of Russia". M 1:7,500,000), Moscow: MSU, 2018.
10. Medvedev A. I., Stepanenko V. M., The influence of external parameters on river runoff in the land surface model of IVM–MSU (using the example of the Northern Dvina River), *Izbrannye trudy Mezhdunarodnoi konferentsii i shkoly molodykh uchenykh po izmereniyam, modelirovaniyu i informatsionnym sistemam dlya izucheniya okruzhayushchei sredy Enviromis 2020* (Selected Proc. Intern. Conf. and School for Young Scientists on Measurements, Modeling, and Information Systems for Environmental Studies Enviromis 2020), Tomsk, 2020, pp. 144–148 (in Russian).
11. Parfenova E. I., Chebakova N. M., Potential distribution of forests in the mountains of Southern Siberia and Northern Mongolia in connection with predicted climate changes by mid-century, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2023, Vol. 87, No. 7, pp. 1019–1031, DOI: 10.31857/S2587556623070129.
12. Titkova T. B., Vinogradova V. V., The response of vegetation to climate change in boreal and subarctic landscapes at the beginning of XXI century, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 3, pp. 75–86 (in Russian).
13. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Monitoring of lands affected by desertification in the Republic of Kalmykia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 2, pp. 130–141 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141.
14. Trofimov I. A., Steppe agroecosystems at the limit of possibilities, *Materialy 10-go Mezhdunarodnogo simpoziuma (Mezhdunarodnogo stepnogo foruma) "Stepi severnoi Evrazii"* (Proc. 10<sup>th</sup> Intern. Symp. (Intern. Steppe Forum) "Steppes of Northern Eurasia"), Orenburg, 2024, pp. 1338–1342 (in Russian), DOI: 10.24412/cl-37200-2024-1338-1342.
15. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Doroshenko V. V., Satellite monitoring of desertification processes in southern European Russia in 2019–2022, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 319–327 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327.
16. Anisimov O., Kokorev V., Zhiltsova Y., Arctic ecosystems and their services under changing climate: Predictive-modeling assessment, *Geographical Review*, 2017, Vol. 107, No. 1, pp. 108–124, DOI: 10.1111/j.1931-0846.2016.12199.x.
17. Copernicus Publications, <https://publications.copernicus.org/>.
18. Goberville E., Beaugrand G., Hautekèete N.-C. et al., Uncertainties in the projection of species distributions related to general circulation models, *Ecology and Evolution*, 2015, Vol. 5, No. 5, pp. 1100–1116, DOI: 10.1002/ece3.1411.
19. IPCC, 2021: Summary for policymakers, In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Masson-Delmotte V., Zhai P., Pirani A. et al. (eds.), Cambridge, UK; NY, USA: Cambridge University Press, 2021, pp. 3–32, DOI: 10.1017/9781009157896.001.
20. Lucash M. S., Scheller R. M., Gustafson E. J., Sturtevant B. R., Spatial resilience of forested landscapes under climate change and management, *Landscape Ecology*, 2017, Vol. 32, pp. 953–969, DOI: 10.1007/s10980-017-0501-3.
21. Muñoz-Sabater J., Dutra E., Agustí-Panareda A. et al., ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications, *Earth System Science Data*, 2021, Vol. 13, No. 9, pp. 4349–4383, DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.