

---

---

ТЕОРИЯ И СОЦИАЛЬНЫЕ  
ФУНКЦИИ ГЕОГРАФИИ

---

---

УДК 551.5

ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ, ОПУСТЫНИВАНИЕ/ДЕГРАДАЦИЯ  
И ЗАСУХИ В АРИДНЫХ РЕГИОНАХ

© 2019 г. А. Н. Золотокрылин<sup>1</sup>

*Институт географии РАН, Москва, Россия*

*e-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru*

Поступила в редакцию 26.04.2018 г.; после доработки 26.08.2018 г.; принята в печать 21.09.2018 г.

Рассмотрены приложения концепции климатического опустынивания, включающие подход к раздельной оценке аридизации и деградации аридных земель и подход к идентификации “островов” опустынивания по спутниковым данным. Установлено, что вклад антропогенной деградации земель в опустынивание подтверждается значимым линейным трендом междугодовых колебаний спутниковых показателей пастбищной дигрессии во всех исследуемых аридных районах России и Монголии в период 2000–2016 гг. Усиление аридизации характерно только для части аридных районов. По причине чрезмерной пастбищной дигрессии здесь образуются “острова” антропогенного опустынивания, время жизни которых определяется влиянием человека и флуктуациями осадков. Дополнительным фактором кратковременного уменьшения жизни “островов” в Монголии служит катастрофический падеж скота в результате природных бедствий (засухи, дзута). “Остров” опустынивания природного происхождения обнаружен в заповедной части пустыни Сонора, где сезоны дождей и засух определяют распространение аридизации. Особое внимание уделено анализу трендов климатических характеристик. Повышение температуры воздуха произошло во всех сравниваемых районах исследования, отрицательные тренды осадков доминировали в степной зоне России в периоды 1936–1960 и 1991–2016 гг., когда температура поверхности Северной Атлантики была выше нормы. Напротив, положительные тренды осадков, ослабляющие аридизацию, наблюдались в период 1961–1990 гг.

**Ключевые слова:** климатическое опустынивание, аридизация, деградация, остров опустынивания, засуха, индекс аридности, альbedo, осадки, MODIS.

**DOI:** 10.31857/S2587-5566201913-13

**Введение.** Концепция климатической составляющей современного опустынивания на примере ключевых аридных регионов в Евразии и Северной Африке в полном виде была опубликована в нашей монографии [3]. В ней представлено понимание природы климатического опустынивания и выявлены его особенности в период усиления глобального потепления в конце XX в. Изменения климата рассматриваются как главная причина цикличности опустынивания и, следовательно, его обратимости в историческое время.

*Климатическое опустынивание* в точном обозначении этого понятия означает взаимодействие климата (аридизации) и деградации земель с обратными связями в системе аридные территории–атмосфера. Под аридизацией климата понимается уменьшение атмосферного увлажнения, увеличение повторяемости и интенсив-

ности засух, усиление радиационного регулирования температуры поверхности с последующим влиянием на атмосферный пограничный слой. Гипотетически аридизация поддерживается мезомасштабной термической положительной обратной связью альbedo–осадки. Под *деградацией земель* понимают процесс ухудшения и разрушения земельного и почвенного покрова в результате негативного воздействия человеческой деятельности и природных факторов (эрозия и т.д.).

Концепция климатического опустынивания была разработана в период формирования понятия опустынивания как глобальной экологической и социально-экономической проблемы в конце XX в. В это время антропогенное воздействие объявлялось главной причиной и одновременно – механизмом опустынивания [12]. Такое понимание опустынивания ориентирова-

<sup>1</sup> Редакция журнала “Известия РАН. Серия географическая” поздравляет А.Н. Золотокрылина – крупного ученого и многолетнего автора журнала с юбилеем. Желаем здоровья, творческого долголетия и ждем новых статей!

ло исследователей на решение определенного класса проблем, но уменьшило на некоторое время внимание к проблемам, выходящим за его рамки. К одной из них относится проблема обратимости опустынивания, вызванная изменениями климата. Применительно к современности – продолжающемуся глобальному потеплению и роста его экстремальности – многократно возрастает значение внутривековых флуктуаций климата в способности быстрого восстановления деградированных аридных экосистем.

Общепризнанная в настоящее время деградационная парадигма опустынивания, поддерживаемая United Nations Convention to Combat Desertification [25], представляет уже интегрированное понимание явлений опустынивания, деградации земель, засух, взаимодействующих с климатом. В то же время сохраняется трактовка опустынивания в виде нарастающего процесса. При этом не учитывается должным образом влияние флуктуирующего климата на возможное замедление опустынивания и демутацию растительного покрова. Следует подчеркнуть, что проблема обратимости опустынивания нашла свое отражение в альтернативной парадигме опустынивания, предложенной в работе “Dryland opportunities. A new paradigm for people, ecosystems and development” [22].

Основной особенностью современного климата является усиление глобального потепления, начиная со второй половины 1970-х годов. Потепление выражено наиболее сильно на территории России, включая аридные территории [2]. Последствия его воздействия на опустынивание и засухи неоднозначны в разных аридных регионах и нуждаются в осмыслении и объяснении. Например, многолетние положительные аномалии сезонных осадков, наблюдавшиеся в Сахели между 1982 и 2006 гг. [20], Северо-Западном Прикаспии в 1990-х годах [4], Северном Прикаспии [16] вызвали процессы “озеленения” Сахальско-Суданской зоны и демутации растительного покрова полупустынь Прикаспия. Восстановление растительности на Черноземельских и Кизлярских пастбищах происходит на фоне реализации научно-обоснованного комплекса мероприятий по прекращению процессов опустынивания в рамках экологического проекта “Генеральная схема по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ” [14].

Концепция стимулировала развитие подходов к дифференциации аридных территорий по степени их атмосферного увлажнения, распространения опустынивания/деградации, включая засухи (desertification, land degradation and drought, DLDD) в условиях потепления [10]. В концепции обобщен опыт применения для глобальных оценок опустынивания спутниковых дан-

ных (продукты The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) о спектральных свойствах поверхности аридных территорий [8]. В рамках концепции были разработаны новые методики идентификации “островов” опустынивания [5] и оценки аномалий увлажнения (спутниковый индекс климатических экстремумов увлажнения, SCEI) по спутниковым данным [6].

*Цель статьи* состоит в синтезе данных многолетних исследований, реализованных в соответствии с концепцией климатического опустынивания в лаборатории климатологии Института географии РАН. Исследования выполнены в рамках реализации тем государственных заданий лаборатории и нескольких проектов Программы фундаментальных исследований Отделения наук о Земле в 2006–2014 гг. Основное внимание уделено результатам сравнительного анализа влияния потепления на распространение опустынивания/деградации, засух в аридных регионах России, Монголии и Мексики. В статье впервые оцениваются возможности и ограничения выделения антропогенной составляющей деградации растительности аридных пастбищ с помощью спутниковых спектральных параметров (альбедо и вегетационного индекса) в зависимости от сценариев изменения поголовья скота.

**Территория исследований, данные, новые подходы.** Аридные территории России, Монголии и Северо-Западной части Мексики были выбраны в качестве объектов исследования. На равнинах России они представлены степными, сухостепными, полупустынными и отчасти пустынными ландшафтами. Главный фокус исследования – полупустынные и сухостепные пастбища Северо-Западного Прикаспия (45°–47.5° с.ш., 40°–46° в.д.), а также экосистемы Приволжской степи Саратовской области (50°–52° с.ш., 44°–49° в.д.).

Исследования на территории Монголии охватили ее обширную часть южнее 48° с.ш. в пределах 98°–110° в.д. Использованы результаты полевых наблюдений на трех модельных полигонах, проведенных в составе Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и МАН в разные годы. Полигон I расположен в подзоне сухих степей и включает территорию сомона Дэлгэрцогт Среднегобийского аймака. Растительность Северной Гоби изучена на полигоне II, который включает пустынные степи и остепненные пустыни на территории сомона Булган Южногобийского аймака. Полигон III характеризует сообщества Заалтайской Гоби, который расположен на территории сомона Шинэ-Джинст Баян-Хонгорского аймака и простирается от остепненных пустынь на севере до крайне аридных пустынь на юге.

Последний объект исследования — пустыня Сонора в Северо-Западной части Мексики (штат Сонора), ограниченная  $31.5^{\circ}$ – $32.5^{\circ}$  с.ш. и  $114^{\circ}$ – $115^{\circ}$  з.д. На территории расположен Биосферный заповедник Эль-Пинакате и Гран-Десиерто-де-Алтар (объект Всемирного наследия ЮНЕСКО). Каменистая пустыня — основная часть ландшафта заповедника. Она представляет собой застывшее вулканическое плато, сформированное черными и красными лавовыми потоками с очень высокой концентрацией кратеров мааров. Плато окружено обширными зонами подвижных дюн. Флора заповедника очень разнообразна. Самый узнаваемый вид — кактус сагуаро (*Cereus giganteus*), крупнейший из всех кактусов. Более 160 видов зависят в своем росте от других растений — таких как азотфиксирующие пустынное железное дерево, мескиты и паломарды, которые дают другим растениям тень и питательные вещества, необходимые для выживания в столь суровых аридных условиях.

Тенденции изменений климата, индекса аридизации, а также спектральных характеристик поверхности были выявлены в заданных аридных районах. Среднесуточные значения температуры и суточные суммы осадков (данные архива ВНИИГМИ-МЦД: <http://www.meteo.ru>) описывали климат аридных районов России за период 1936–2016 гг. Архивы монгольских метеостанций Мандалгоби, Булган, Шинэ-Джинст, Эйхин-Гол (среднемесячные температуры и месячные суммы осадков до 2016 г., но отличающиеся датами начала наблюдений), также использованы в качестве климатических источников. Копии архивов находятся в распоряжении Совместной Российско-Монгольской комплексной биологической экспедиции РАН и МАН. Условия атмосферного увлажнения мексиканской территории пустыни Соноры оценивались на основании архива месячных сумм осадков (1955–2016 гг.), созданного в мексиканском Центре биологических исследований в штате Сонора (Centro de Investigaciones Biologicas del Noroeste, Guaymas, Sonora 85454, Mexico).

Аридизация диагностировалась по снижению индекса аридности (отношение годовой суммы осадков к годовой потенциальной эвапотранспирации), вычисляемой по методу Торнтвейта [23]. Повышение индекса аридности рассматривалось как ослабление аридизации. Дополнительно фиксировались аномалии увлажнения территории с помощью трехмесячного стандартизованного индекса осадков (Standardized Precipitation Index, SPI) [1]. Деграляция растительного покрова природно-антропогенного происхождения оценивалась косвенно по скорости трендов спектральных характеристик экосистем: положительному коэффициенту линейного тренда альbedo и от-

рицательному коэффициенту тренда вегетационного индекса. Положительный тренд альbedo и отрицательный вегетационного индекса трактовались как усиление антропогенной составляющей деграляции.

Пространственно-временное изменение спектральных характеристик наземных экосистем в сравниваемых аридных регионах (альbedo, AI, температура поверхности, Ts, вегетационный индекс, NDVI) оценивалось по спутниковым данным MODIS за период 2000–2017 гг. Данные MODIS представлены средними значениями спектральных характеристик за 16 дней. Далее вычислялись средние характеристики в заданные интервалы времени соответственно для каждого региона исследования. Данные MODIS доступны по адресу: [https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis\\_products](https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_products). Горизонтальное разрешение  $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$  ( $5 \times 5$  км) — для всех параметров.

В качестве меры интенсивности климатических изменений за указанный интервал времени использовался коэффициент линейного тренда, характеризующий среднюю скорость изменений климатической переменной. Коэффициенты вычислялись для среднесуточных величин температуры и суточных сумм осадков, а также их месячных, сезонных и годовых значений. Дополнительно вычислялись коэффициенты трендов индекса аридности, SPI. Тренды спектральных характеристик поверхности были вычислены по данным MODIS для периода 2000–2017 гг.

Методика работы включает анализ изменения состояния аридных экосистем по результатам многолетних полевых исследований на ключевых участках в сухой и пустынной степях, остепненной и крайнеаридной пустынях Монголии в 1970–1990-е годы и начале 2000-х годов. Для детальной оценки состояния экосистем степей и пустынь в 2013 г. были проведены полевые исследования на ключевых участках, представляющих собой наиболее распространенные типы растительных сообществ [9]. Состояние экосистем оценивалось по фитоценотическим показателям, данным о видовом составе, роли видов в структуре сообществ, их жизненности, наличия видов-индикаторов пастбищной дигрессии. Антропогенная нагрузка на пастбища оценивалась по изменению годового поголовья скота на уровне сомонов, аймаков (областей) и в целом на территории Монголии.

“Острова” опустынивания изучались на аридных пастбищах Северо-Западного Прикаспия, Центральной Монголии и заповедной территории мексиканской части пустыни Сонора. Под “островами” понимаются наиболее дегралированные в результате перевыпаса участки

аридных пастбищ с горизонтальными размерами (~50–100 км) в России и Монголии. Напротив, “острова” опустынивания на заповедной территории в Соноре имеют природное происхождение и усиливаются ежегодно в периоды регулярных засух весной и осенью. Во всех “островах” доминирует радиационное регулирование температуры поверхности, индикатором которого служит отрицательная корреляция альбедо и температуры [5].

Особенность этих “островов” состоит в том, что над ними возможно уменьшение осадков в результате формирования мезомасштабной термической положительной обратной связи альбедо–осадки. “Острова” опустынивания идентифицировались по статистически значимому отрицательному коэффициенту корреляции между альбедо и температурой поверхности на исследуемой территории. Пространственная корреляция между альбедо и температурой поверхности рассчитывалась в ячейках  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ . Антропогенная нагрузка на пастбища Монголии оценивалась по изменению годового поголовья скота.

В основе методики идентификации “островов” опустынивания лежит известная гипотеза мезомасштабного альбедного механизма опустынивания Оттермана [23]. Согласно этой гипотезе аридные пастбища с сильно деградированным растительным покровом, например в результате перевыпаса, имеют более высокое альбедо и поэтому более низкую дневную температуру поверхности по сравнению с менее деградированными участками. Многочисленные синхронные наземные и спутниковые измерения альбедо и температуры поверхности аридных экосистем в разных регионах подтверждают это положение гипотезы Оттермана [3], в которой отмечается, что снижение осадков над деградированными пастбищами может быть связано с уменьшением подъема воздуха из-за повышения альбедо и понижения температуры подстилающей поверхности. Таким образом, для мезомасштабного термического механизма опустынивания характерна обратная зависимость между альбедо и температурой подстилающей поверхности, определяемая как радиационное регулирование температуры.

Объясняя возможный эффект уменьшения осадков при повышении альбедо, Оттерман опирался на теорию мезомасштабной конвекции в условиях адвекции влажного воздуха, в которой учитывается термика и гравитационно-волновые возмущения среднего потока [20]. Согласно этой теории, над более прогретыми территориями (“термические горы”) воздух имеет тенденцию к подъему и образованию облаков и осадков. Напротив, “термическая депрессия” формируется над холодными территориями, которая отличается ослабленной конвекцией,

уменьшением образования облачности и осадков. По оценкам авторов теории [20], при разности температур поверхности  $5^\circ\text{C}$  эквивалентная высота “термических гор” составляет 900 м для острова тепла длиной 30 км вдоль направления ветра и может выпасть дополнительное количество осадков порядка 100 мм/год.

Данная гипотеза может быть основанием для разработки подхода к получению новой информации об “островном” механизме опустынивания в условиях меняющегося климата вследствие антропогенной деградации аридных земель (пастбищная дигрессия). Но образование “островов” опустынивания возможно и при отсутствии антропогенной деградации, например, в результате сезонных атмосферно-почвенных процессов, вызывающих засуху. Формирование такого “острова” на примере заповедной части пустыни Сонора рассмотрено ниже.

**Результаты и их обсуждение. Тренды температуры и осадков.** Положительные тренды среднегодовой температуры на аридной части равнин России возросли в период 1991–2016 гг. и охватили всю территорию по сравнению с периодами 1936–1960 и 1961–1990 гг. Максимальная скорость потепления отмечалась преимущественно в западных степных районах Ростовской области и составила  $0.8^\circ\text{C}/10$  лет. По мере продвижения в восточном направлении скорость потепления уменьшалась до  $0.2^\circ\text{C}/10$  лет, особенно на юге Западной Сибири, а на юге алтайской степи отмечалось похолодание ( $-0.2^\circ\text{C}/10$  лет).

Значимые положительные тренды годовых сумм осадков наблюдались в ограниченной части аридных земель в период 1936–2016 гг. Например, максимальная скорость увеличения осадков (около 20 мм/10 лет) отмечалась в Заволжской Низкосыртовой степи. На остальной части территории изменения осадков были не значимы. Годовые осадки значимо уменьшились в сухих степях европейской части аридных земель (в Среднерусской и Заволжской Высокосыртовой провинциях) в период 1991–2016 гг. Сокращение летних осадков в Среднерусской степи усилило здесь аридизацию. Напротив, в этих же степных провинциях доминировали положительные тренды годовых и летних осадков в период 1961–1990 гг. Анализ трендов годовых осадков в рекомендованные Всемирной Метеорологической Организацией климатические интервалы времени свидетельствует о доминировании на аридной территории, особенно Европейской России, отрицательных трендов в периоды 1936–1960 и 1991–2016 гг. (“теплая” Северная Атлантика) и положительных в 1961–1990 гг. (“холодная”). Этот факт говорит о возможном регулировании Атлантической

Мультидекадной Осцилляцией (АМО) аридизации на засушливых землях Европейской части России. Он также объясняет рост повторяемости засух в Приволжских и Заволжских степях в период 1991–2016 гг., с одной стороны, и говорит в пользу вывода об отсутствии долговременного положительного тренда повторяемости засух на аридных землях, вызванного потеплением [7].

Потепление продолжается на территории Центральной Монголии: линейные тренды среднегодовой (среднелетней) температуры положительны и значимы. Но в последние 10 лет среднегодовая температура стала понижаться на территории. Вопрос об устойчивости похолодания остается открытым. Статистически значимые тренды не обнаружены в рядах годовых и летних сумм осадков. Исключение представляет станция в сухой степи, показывающая снижение летних осадков и усиление аридизации (отрицательный тренд индекса аридности статистически достоверен при уровне значимости 0.01). На остальных полигонах тренды индекса аридности статистически недостоверны и имеют разные знаки.

Скорость повышения среднегодовой температуры в пустыне Сонора в период 1980–2017 гг. по данным метеостанции Ажо (32.37° с.ш.; 112.86° з.д.) составляет 0.5 °C/10 лет. Наибольшее потепление наблюдалось осенью и зимой и было незначимым в сезон муссонных дождей (июль–сентябрь).

Годовые суммы осадков колеблются на исследуемой территории Соноры от 50 до 200 мм. Часть из них (60–70%) выпадает преимущественно с июля по сентябрь (летний атлантический муссон). Остальные осадки (30–40%) связаны с тихоокеанскими экстратропическими штормами в ноябре–феврале. Очень высокая изменчивость годовых осадков препятствует достоверному определению их трендов.

Таким образом, в последние три десятилетия потепление продолжалось во всех трех заданных территориях. Усиление аридизации в результате уменьшения осадков и роста повторяемости засух наблюдалось преимущественно в степях Юго-Востока европейской России и Монголии. Нет оснований говорить об усилении аридизации в пустыне Сонора.

**Деградация растительного покрова.** Принимая во внимание изложенную выше информацию о климате, обсудим тренды NDVI и альbedo на примере аридных территорий России и мексиканской Соноры в период 2000–2017 гг. (рис. 1). Их линейные тренды можно трактовать как долгосрочную тенденцию потери естественного растительного покрова: антропогенную дигрессию в России и природную в заповедной части Соноры. Перевыпас скота –

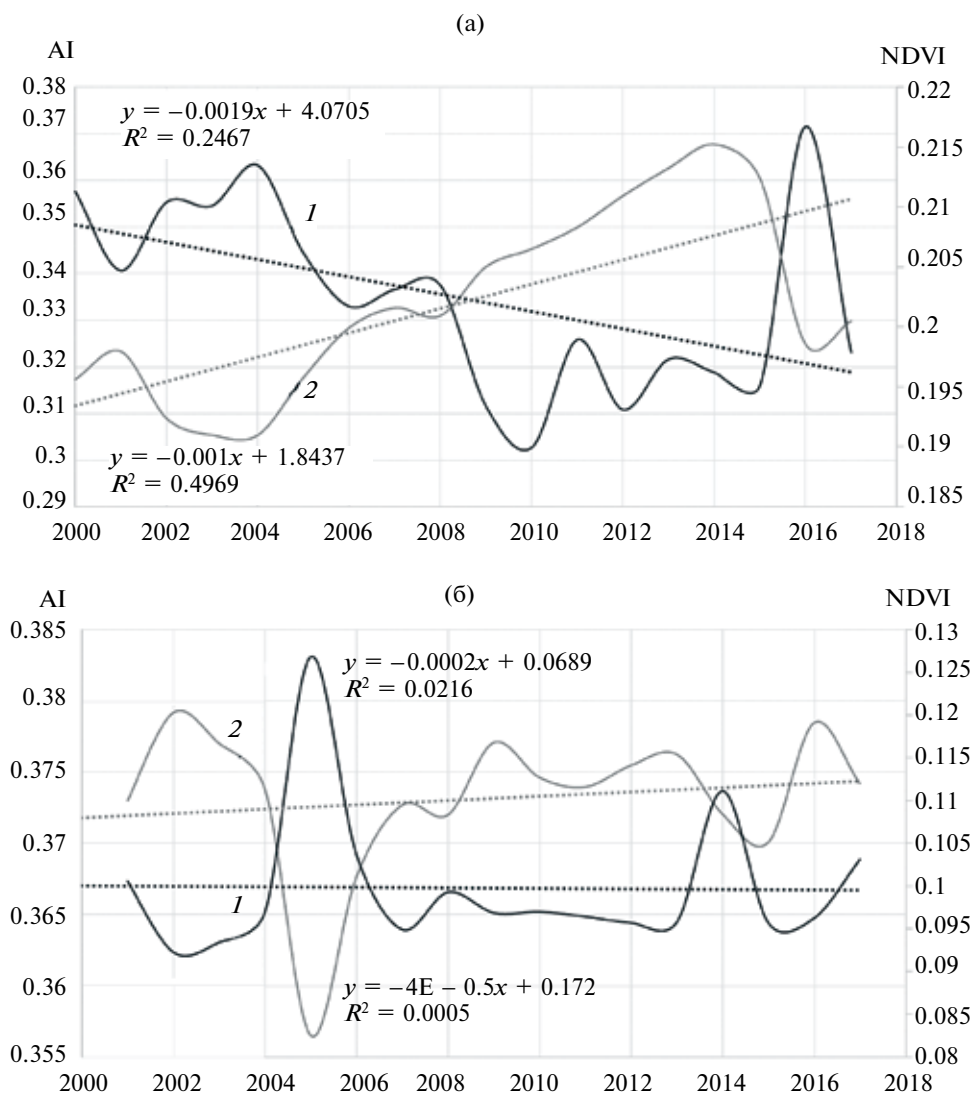
одна из основных причин деградации растительности пастбищ. Как известно, поголовье было минимальным в силу социально-экономических причин в Юго-восточной части Европейской России в конце XX в. После 2000 г. оно начало медленно возрастать, что вновь привело к дигрессии растительности и опустыниванию [15].

NDVI и альbedo имеют очень высокую чувствительность к изменчивости климата (см. рис. 1а). Об этом свидетельствуют их годовые флуктуации во влажный 2016 г. или NDVI в засуху 2010 г. Значимые отрицательный тренд NDVI и положительный альbedo свидетельствуют о деградации растительного покрова в условиях роста поголовья. В то же время значимые линейные тренды NDVI и альbedo отсутствуют на пашне.

Осредненную картину изменений NDVI и альbedo подтверждают данные некоторых публикаций. Так, обнаруженные локальные очаги падения NDVI на левом и правом берегу Нижней Волги сопряжены с массивами трансформированной перевыпасом растительности [13]. Оценки дигрессии сухостепных и пустынных пастбищ и возрастания темпов локального опустынивания приведены в статье [15]. Несмотря на успешные результаты фитомелиорации на Черноземельских и Кизлярских пастбищах, усиление антропогенной нагрузки на них в последнее годы зафиксировано с помощью спутниковых данных [14]. Здесь образовался новый “остров” антропогенного опустынивания к северо-западу от заповедника “Черные земли” [8].

Как и следовало ожидать, линейные тренды NDVI и альbedo не значимы на заповедной части пустыни Сонора (см. рис. 1б). Изменения этих параметров связаны с погодичными флуктуациями осадков. Например, во влажный 2005 г. отмечено максимальное NDVI и минимальное альbedo.

Сложность трактовки линейных трендов спектральных параметров пастбищ возрастает в случаях катастрофического падежа скота от бескормицы в результате природных бедствий (засуха, дзут). Подобные ситуации неоднократно наблюдались в Монголии [18]. Тогда формальная трактовка линейных трендов спектральных параметров, представленных на рис. 2а, может быть ошибочна. Для правильной трактовки необходимо учитывать скачкообразное изменение плотности поголовья скота (рис. 2б). Как видно из рисунка, плотность поголовья была минимальной в 2000 г. и 2010-х годах. Поголовье восстанавливалось в течение 5–7 лет. Если не принимать во внимание резкое повышение альbedo в засуху в 2001 г., то



**Рис. 1.** Междугодовой ход осредненных спектральных параметров MODIS в период 2000–2017 гг.: вегетационного индекса NDVI (1) и альbedo AI (2) на аридных территориях (а) России (44°–52° с.ш., 35°–65° в.д.; в среднем за 7 апреля–30 сентября), (б) Мексики (31.7°–32° с.ш., 113.6°–114.6° з.д.; в среднем за 30 апреля–17 июня).

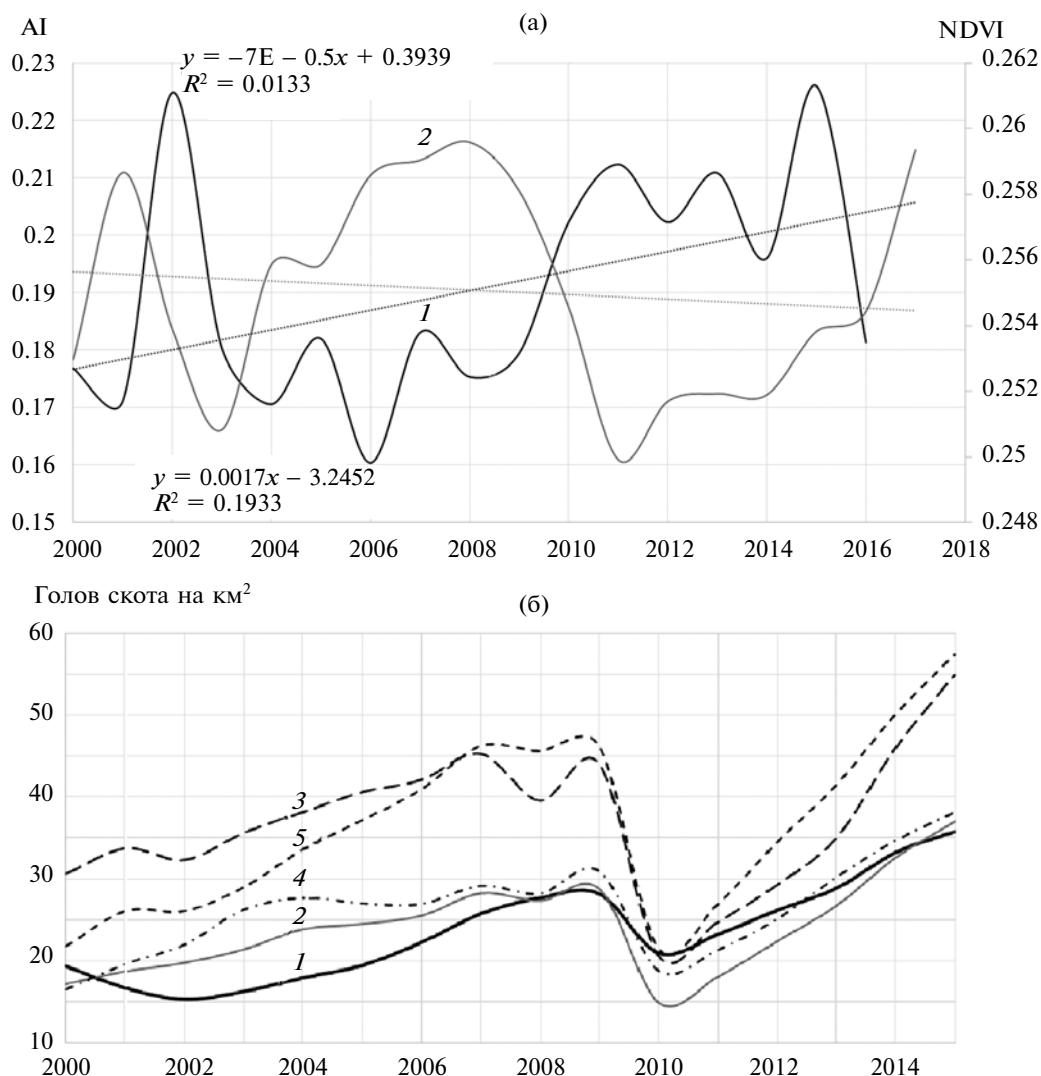
оно нарастало по мере увеличения поголовья до 2008–2009 гг. (см. рис. 2а). Затем, после 2011 г., альbedo вновь стало увеличиваться в результате восстановления поголовья. Из-за очень высокой чувствительности NDVI к изменениям осадков ее связь с интенсивностью перевыпаса не такая очевидная, как для альbedo (тренд NDVI положительный).

Таким образом, в ситуациях с резкими изменениями поголовья, вызванными природными бедствиями, положительный линейный тренд альbedo увереннее отображает деградацию растительности, чем NDVI.

**Засухи.** Период интенсификации современного глобального потепления характеризуется не увеличением частоты засух в аридных районах России, а увеличением их интенсивности и ох-

вата территории [7, 17]. Полезен для понимания анализ территориальных изменений частоты SPI-засухи в период 1991–2013 гг., по сравнению с периодом 1961–1990 гг. Частота засухи возросла значительно на засушливых землях Южного Предуралья и Южного Урала, а также севернее лесостепной зоны (Орловская, Тульская и Московская области). Повышение частоты атмосферной засухи на территории Среднего Поволжья оказалось не значимым. Важно заметить, что в целом на Прикаспийской низменности частота засух в период 1991–2013 гг. снизилась, причем значительно на территории Западного Казахстана.

Междугодовой ход метеорологического показателя увлажнения SPI вблизи метеостанций Монголии за интервал 1950–2012 гг. свидетельствует об иссушении климата на всех по-



**Рис. 2.** (а) Междугодовой ход осредненных спектральных параметров MODIS в период 2000–2017 гг.: вегетационного индекса NDVI (1) и альbedo AI (2) в Центральной Монголии (42°–48° с.ш., 98°–110° в.д.; в среднем за 10 июня–28 августа) (б) Плотность поголовья скота на 1 км<sup>2</sup> в Монголии и ее разных районах, где: 1 – Монголия, 2 – Аймаг Дундговь, 3 – Дэлгэрцогт, 4 – Гурвансайхам, 5 – Эрдэнэдалай.

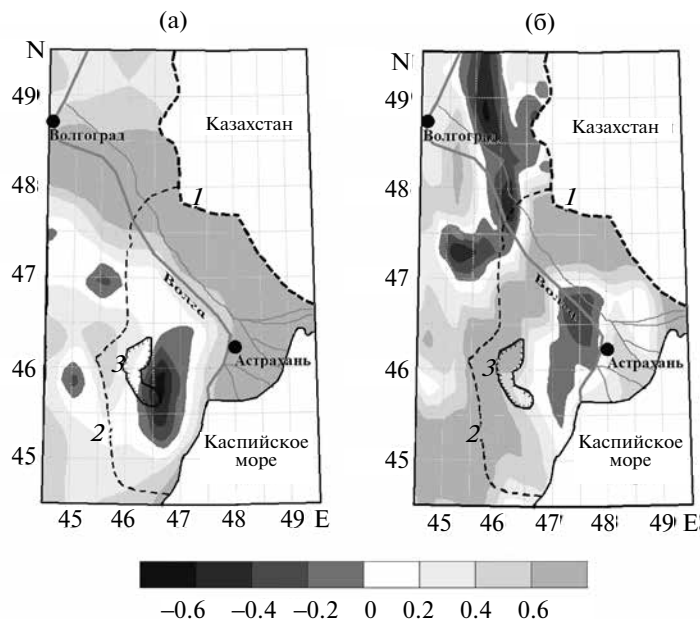
лигонах (линейные тренды SPI отрицательны и достоверны при уровне значимости 0.01) (рисунок не приводится). Интенсивные засухи отмечались на всех полигонах в периоды 1982–1990 и 2004–2009 гг. Повышенная частота засух отмечалась после 1981 г.

Долговременные засухи на территории Соноры редки. Последняя наблюдалась в 2010-х, а предыдущая – в 1950-х годах [19].

**“Острова” опустынивания.** В большинстве случаев образование “островов” опустынивания объясняется чрезмерной антропогенной нагрузкой на аридные пастбища (перевыпас), как это происходит в России и Монголии. Но также возможна природная причина их образования в результате регулярного воздействия сезонных засух, например, на заповедных аридных территориях пустыни Сонора. Ниже анализиру-

ется динамика “островов” в Северо-Западном Прикаспии и в Биосферном заповеднике пустыни Сонора. Динамика “островов” аридных пастбищ Монголии подробно рассмотрена в двух работах [9, 10].

Географическое положение “островов” опустынивания сравнивается в Северо-Западном Прикаспии в периоды 1985–1991 и 2011–2017 гг. (рис.3а). Яркое выраженный “остров” антропогенного происхождения существовал вблизи биосферного заповедника “Черные Земли” в первый период. Также зарождающиеся “острова” наблюдались западнее и северо-западнее от него. Фитомелиоративные мероприятия в 1990-х годах, совпавшие с влажной флуктуацией климата, и снижение антропогенной нагрузки на пастбища изменили ситуацию вблизи заповедника в последующие годы [14]. Новое



**Рис. 3.** “Острова” опустынивания (темные оттенки красок) на территории Северо-Западного Прикаспия: а – период 1985–1991 гг.; б – период 2011–2017 гг. Интенсивность опустынивания (шкала) возрастает с увеличением отрицательного коэффициента корреляции между альбедо и температурой поверхности. Цифрами обозначены: 1 – государственная граница Российской Федерации; 2 – граница северной пустыни; 3 – биосферный заповедник “Черные земли”.

усиление перевыпаса в первом десятилетии XXI в. вызвало образование новых “островов” на пастбищах на Левобережье и Правобережье р. Волги [8, 13]. Предпосылки образования “островов” возникли также на пустынных пастбищах Калмыкии и Астраханской области (см. рис. 3б).

“Остров” опустынивания на заповедной территории пустыни Соноры прослеживается в течение всего года, меняя свои очертания и интенсивность. Он достигает максимального размера (70 км по широте и 50 км по долготе). Его площадь и интенсивность, характеризуемая ростом отрицательного коэффициента корреляции между альбедо и температурой поверхности, возрастают в весеннюю засуху и уменьшаются в сезон летнего муссона (июль–сентябрь) и зимних дождей (декабрь–февраль) (рис. 4а). Радиационный тип регулирования температуры поверхности, когда альбедо растет (падает), температура падает (растет) доминирует внутри “острова”. Степень “зелености”, определяемая по NDVI MODIS, внутри “острова” почти не отличается от значений на окружающей территории и составляет 0.09–0.10. Весной среднененные альбедо и температура поверхности центральной части “острова” составляют соответственно 0.43 и 47.1 °С, в то время как вне “острова” 0.36 и 49.7 °С. Изменения спектральных параметров в “острове” по отношению к окружающей территории статистически достоверны, хотя значительная часть “острова” расположена на вулканическом плато с меняю-

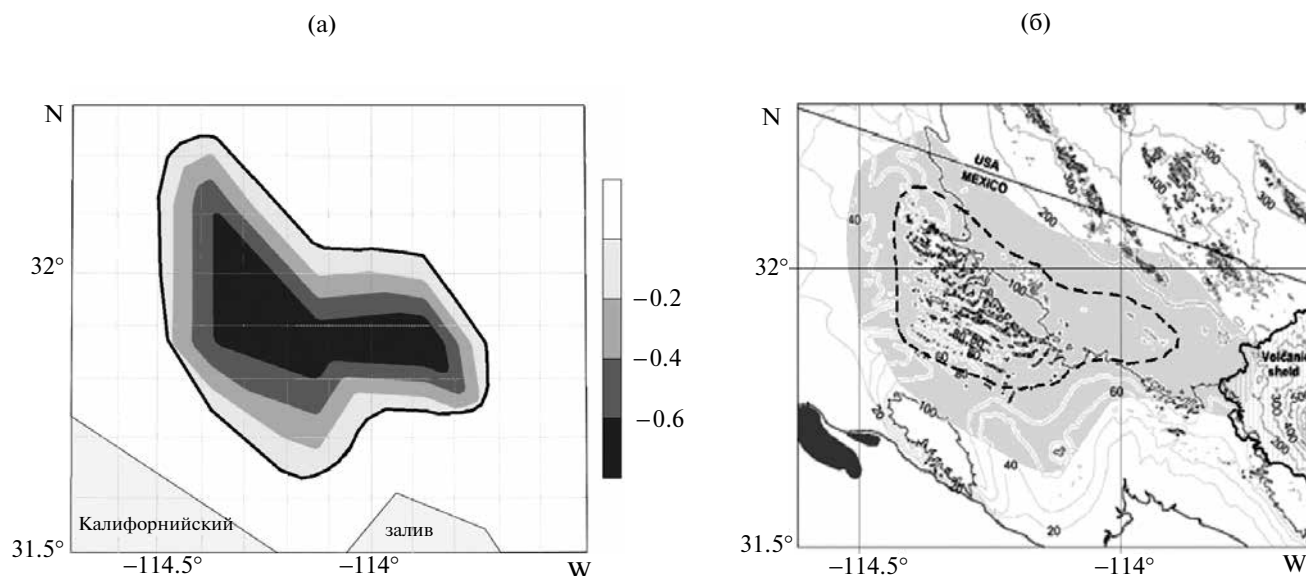
щимся рельефом высотой более 100 м, а меньшая часть представляет пологие участки высотой менее 100 м (см. рис. 4б).

**Заключение.** Продолжающееся глобальное потепление в исследуемых аридных районах России и Монголии не проявляется в повсеместном усилении аридизации по причине разнонаправленности трендов годовых осадков и внутривековых смен их знака. Доминирующие положительные тренды годовых осадков в период 1961–1990 гг. вызвали ослабление аридизации и демутиацию растительного покрова в конце этого периода в аридных районах России. Тренды осадков вновь стали преимущественно отрицательными в начале XXI в. Установлено, что положительные тренды осадков наблюдаются преимущественно в холодную фазу температуры поверхности Северной Атлантики.

Антропогенная деградация аридных земель, оцениваемая по спутниковым данным с 2000 г., возрастает в целом на аридных пастбищах России и Монголии. По причине чрезмерной пастбищной дигрессии здесь образуются антропогенные “острова” опустынивания, время жизни которых определяется деятельностью человека и флуктуациями влажности климата. Дополнительным фактором кратковременного уменьшения жизни “островов” в Монголии служит катастрофический падеж скота.

Аридизация в пустыне Сонора регулируется сезонностью атмосферного увлажнения. Многолетнее изменение аридизации незначи-





**Рис. 4.** (а) Поле отрицательной корреляции между альбедо и температурой поверхности на территории Биосферного заповедника Эль-Пинакате и Гран-Десиерто-де-Алтар в период 30 марта–17 июня 2000–2017 гг. и “остров” опустынивания (коэффициент корреляции менее  $-0.5$ ); (б) Карта рельефа: изогипсы, м. Серым тоном выделено поле отрицательной корреляции, прерывистой линией – “остров” опустынивания.

тельно, за исключением нескольких кратковременных периодов с повышенной повторяемостью засух. “Остров” опустынивания природного происхождения обнаружен в заповедной части пустыни.

Нет основания говорить о нарастающем опустынивании исследуемых аридных земель в период интенсификации глобального потепления после 1980-х годов. Возможные многолетние положительные аномалии осадков способны ослабить аридизацию и создать условия для восстановления растительности, как это наблюдалось в России в конце 1980-х годов.

**Финансирование.** Статья подготовлена в рамках темы Госзадания 0148-2014-0015 “Исследования механизмов изменений климата и их последствий для окружающей среды и социально-экономических процессов в России” (№ 01201352488) и Госконтракта № НИ-10-23/66 “Экспертно-аналитические работы, связанные с подготовкой аналитических материалов по проблемам деградации земель в Российской Федерации”.

**Funding.** This article is prepared within Scientific Research Plan of the Institute of Geography, RAS (project no. 01201352488) “Study of Climate Change Mechanisms and Their Consequences for the Environment and Socioeconomic Processes in Russia” and state contract no. NI-10-23/66 “Expert and Analytical Work Related to the Preparation of Analytical Materials on the Problems of Land Degradation in the Russian Federation”.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хайес М., Вуд Д. Руководство для пользователей стандартизованного индекса осадков ВМО. 2012. № 1090. Женева. 26 с.
2. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. 1000 с.
3. Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание / отв. ред. А.Н. Кренке. М.: Наука, 2003. 246 с.
4. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В. Соотношение между климатическим и антропогенным факторами восстановления растительного покрова юго-востока Европейской России // Аридные экосистемы. 2007. Т. 14. № 33–34. С. 7–16.
5. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Новый подход к мониторингу очагов опустынивания // Аридные экосистемы. 2011. Т. 1. № 3. С. 125–130.
6. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. Спутниковый индекс климатических экстремумов засушливых земель // Аридные экосистемы. 2012. Т. 2. № 4. С. 203–208.
7. Золотокрылин А.Н., Виноградова В.В., Мещерская А.В., Страшная А.И., Черенкова Е.А. Засухи и опустынивание. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 551–587.
8. Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А., Виноградова В.В. Динамика летнего увлажнения и биофизических параметров аридных пастбищ Европейской части России в 2000–2014 гг. // Аридные экосистемы. 2016. Т. 22. № 1 (66). С. 5–10.

9. Золотокрылин А.Н., Гунин П.Д., Титкова Т.Б., Бажа С.Н., Данжалова Е.В., Казанцева Т.И. Диагностика динамики опустынивания аридных пастбищ Монголии по наблюдениям на ключевых участках и MODIS-данным // Аридные экосистемы. 2016. Т. 6. № 3. С. 149–157.
10. Золотокрылин А.Н., Черенкова Е.А., Титкова Т.Б. Биоклиматическая субгумидная зона на равнинах России: засухи, опустынивание, деградация // Аридные экосистемы. 2018. Т. 8. № 1. С. 7–12.
11. Золотокрылин А.Н., Бажа С.Н., Титкова Т.Б., Сыртыпова С.-Х.Д. Тренды поголовья скота и спектральных характеристик поверхности пастбищ (на примере Средне-Гобийского аймака Монголии) // Аридные экосистемы. 2018. Т. 8. № 3. С. 153–160.
12. Зонн И.С., Куст Г.С., Андреева О.В. Парадигма Опустынивания: 40 лет развития и глобальных действий // Аридные экосистемы. 2017. Т. 7. № 3. С. 131–141.
13. Кулик К.Н., Рулев А.С., Юферов В.Г. Геоинформационный анализ очагов опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. 2013. Т. 3. № 3. С. 184–190.
14. Кулик К.Н., Петров В.И., Рулев А.С., Кошелева О.Ю., Шинкаренко С.С. К 30-летию “Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Черных земель и Кизлярских пастбищ” // Аридные экосистемы. 2018. Т. 8. № 1. С. 1–6.
15. Петров К.М., Бананова В.А., Лазарева В.Г., Унагаев А.С. Региональные особенности глобального процесса опустынивания в Северо-Западном Прикаспии // Междисциплинарный научный и прикладной журнал “Биосфера”. 2016. Т. 8. № 1. С. 49–62.
16. Сапанов М.К. Экологические последствия потепления климата в Северном Прикаспии // Аридные экосистемы. 2018. Т. 8. № 1. С. 13–21.
17. Черенкова Е.А. Опасная атмосферная засуха на Европейской части России в условиях современного летнего потепления // Фундаментальная и прикладная климатология. 2017. № 2. С. 130–143.
18. Desertification Atlas of Mongolia. Ulaanbaatar, 2014. 133 p.
19. Brito-Castillo L., Douglas A.V., Leyva-Contreras A., Lluch-Belda D. The effect of large-scale circulation on precipitation and streamflow in the Gulf of California continental watershed // Int. J. of Clim. 2003. 23. P. 751–768. DOI: 10.1002/joc.913
20. Hermann S.M., Anyamba A., Tucker C.J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate // Global Env. Change. 2005. 5. P. 394–404.
21. Malkus J.S., Stern M.E. The flow of a stable atmosphere over a heated islands: Part I // J. Meteorol. 1953. V. 10. № 2. P. 30–41.
22. Mortimore M., Anderson S., Cotula L., Davies J., Fasser K., Hesse C., Morton J., Nyangena W., Skinner J., Wolfangel C. Dryland opportunities: A new paradigm for people, ecosystems and development. Switzerland: Gland, 2009. 86 p.
23. Otterman J. Baring high-albedo soils by overgrazing: Hypothesized desertification mechanism // Science. 1974. V. 186. № 4163. P. 531–533.
24. Thornthwaite C.W. The climates of North America // Geograph. Rev. 1931. 21(3). P. 633–655.
25. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany, 1994.

## REFERENCES

1. Hayes M., Wood D. *Standardized Precipitation Index User Guide. WMO-No. 1090*. Geneva, 2012. 26 p.
2. *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii*. [Second Roshydromet Assessment Report on Climate Changes and Its Consequences in Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014. 1000 p.
3. Zolotokrylin A.N. *Klimaticheskoe opustynivanie* [Climatic Desertification]. Moscow: Nauka Publ., 2003. 246 p.
4. Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V. Relation between climat I cand anthropogenic factors of re-vegetation in the south-east of European Russia. *Aridnye Ekosistemy*, 2007, vol. 14, no. 33–34, pp. 7–16. (In Russ.).
5. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. A new approach to the monitoring of desertification centers. *Aridnye Ekosistemy*, 2011, vol. 1, no. 3, pp. 125–130.
6. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B. Satellite climate extremes index of drylands. *Aridnye Ekosistemy*, 2012, vol. 2, no. 4, pp. 203–208.
7. Zolotokrylin A.N., Vinogradova V.V., Meshcherskaya A.V., Strashnaya A.I., Cherenkova Ye.A. Drought and Desertification. In *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* [Second Roshydromet Assessment Report on Climate Changes and Its Consequences in Russian Federation]. Moscow: Rosgidromet, 2014, pp. 551–587. (In Russ.).
8. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Cherenkova Ye.A., Vinogradova V.V. Dynamics of summer moistening and biophysical parameters of arid pastures in the European part of Russia in 2000–2014. *Aridnye Ekosistemy*, 2016, vol. 22, no. 1 (66), pp. 5–10.
9. Zolotokrylin A.N., Gunin P.D., Titkova T.B., Bazha S.N., Danzhalova E.V., Kazantseva T.I. Diagnosis of the desertification dynamics of arid pastures in Mongolia from observation in key areas and MODIS data. *Aridnye Ekosistemy*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 149–157.
10. Zolotokrylin A.N., Cherenkova E.A., Titkova T.B. Bioclimatic subhumid zone of Russian plains: droughts, desertification, and land degradation. *Aridnye Ekosistemy*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 7–12.
11. Zolotokrylin A.N., Bazha S.N., Titkova T.B., Syrtyпова S.H. Trends in livestock numbers and spectral properties of the pasture surface: case study of the Middle Gobi aimag of Mongolia. *Aridnye Ekosistemy*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 153–160.

12. Zonn I.S., Kust G.S., Andreeva O.V. Desertification paradigm: 40 years of development and global efforts. *Aridnye Ekosistemy*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 131–141.
13. Kulik K.N., Rulev A.S., Yuferev V.G. Geoinformation analysis of desertification hotspots in Astrakhan oblast. *Aridnye Ekosistemy*, 2013, vol. 3, no. 3, pp. 184–190.
14. Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Yu., Shinkarenko S.S. On the 30th Anniversary of the “General Plan to Combat Desertification of Black Lands and Kizlyar Pastures”. *Aridnye Ekosistemy*, 2018, vol. 8, no. 1, pp. 1–6.
15. Petrov K.M., Bananova V.A., Lazareva V.G., Unagaev A.S. Regional features of the global desertification process in the North-Western Caspian region. *Mezhdistsiplinnyi Nauchn. Prikladnoi Zhurnal “Biosfera”*, 2016, vol. 8, no. 1, pp. 49–62. (In Russ.).
16. Sapanov M.K. Environmental implications of climate warming for the Northern Caspian region. *Aridnye Ekosistemy*, 2018, vol. 24, no. 1 (74), pp. 13–21.
17. Cherenkova Ye.A. Dangerous atmospheric drought in the European part of Russia in the conditions of modern summer warming. *Fundamentalnaya i Prikladnaya Klimatologiya*, 2017, no. 2, pp. 130–143. (In Russ.).
18. Desertification Atlas of Mongolia. Ulaanbaatar, 2014. 133 p.
19. Brito-Castillo L., Douglas A.V., Leyva-Contreras A., Lluch-Belda D. The effect of large-scale circulation on precipitation and stream flow in the Gulf of California continental watershed. *Int. J. Climatol.*, 2003, no. 23, pp. 751–768.
20. Hermann S.M., Anyamba A., Tucker C.J. Recent trends in vegetation dynamics in the African Sahel and their relationship to climate. *Global Environ. Change*, 2005, no. 5, pp. 394–404.
21. Malkus J.S., Stern M.E. The flow of a stable atmosphere over heated islands: Pt I. *J. Meteorol.*, 1953, vol. 10, no. 2, pp. 30–41.
22. Mortimore M., Anderson S., Cotula L., Davies J., Fasser K., Hesse C., Morton J., Nyangena W., Skinner J., Wolfangel C. *Dryland opportunities: A new paradigm for people, ecosystems and development*. Switzerland: Gland, 2009. 86 p.
23. Otterman J. Baring high-albedo soils by over grazing: Hypothesis of the desertification mechanism. *Science*, 1974, vol. 186, no. 4163, pp. 531–533.
24. Thornthwaite C.W. The climates of North America. *Geograph. Rev.*, 1931, no. 21(3), pp. 633–655.
25. United Nations Convention to Combat Desertification (UNCCD). Bonn, Germany, 1994.

## Global Warming, Desertification/Degradation, and Droughts in Arid Regions

A. N. Zolotokrylin

*Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*  
e-mail: azolotokrylin1938@yandex.ru

Received April 26, 2018; revised August 26, 2018; accepted September 21, 2018

Applications of the concept of climatic desertification are considered. They include an approach to a separate assessment of aridization and degradation of arid lands and an approach to identifying “islands” of desertification from satellite data. It is established that the contribution of anthropogenic land degradation to desertification is confirmed by a significant linear trend of interannual fluctuations of satellite indicators of pasture digression in all the studied arid areas of Russia and Mongolia in the period 2000–2016. Significant trends in the intensification of aridization were characteristic only for a part of arid areas. Because of the excessive pastoral digression in arid areas, “islands” of desertification of anthropogenic origin are formed. The lifetime of such “islands” is determined by human influence and fluctuations in the humidity of the climate. An additional factor in the short-term decline in the life of the “islands” in Mongolia is the catastrophic death of livestock as a result of natural disasters (drought, zuta). The “island” of desertification, of natural origin, is found in the reserved part of the Sonora Desert, where rainy seasons and droughts determine the spread of aridization. Particular attention is paid to the analysis of trends in climatic characteristics. The increase in air temperature occurred in all the areas under study. Negative trends in annual and seasonal precipitation dominated the steppe zone of Russia during the periods 1936–1960 and 1991–2016, when the surface temperature of the North Atlantic was above normal. On the contrary, positive precipitation trends, weakening aridization, were observed in the period 1961–1990, corresponding to a temperature below the norm.

**Keywords:** climatic desertification, aridization, degradation, desertification island, drought, aridity index, albedo, precipitation, feedback, MODIS.