

Мониторинг подверженных опустыниванию земель Республики Калмыкия

Т. Б. Титкова, А. Н. Золотокрылин

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

Осуществлён мониторинг земель Республики Калмыкия с выраженными пустынными условиями в летний период с 2000 по 2021 г. Анализ проведён с использованием связи между спектральными значениями альбедо и температуры поверхности. Предложенный подход позволил оценить площади земель, подверженных сезонному опустыниванию, различному по протяжённости и интенсивности. Локализация подверженных опустыниванию районов из года в год может меняться, что свидетельствует о его обусловленности как климатическими, так и антропогенными факторами. Интенсивность опустынивания, обусловленного засухами, в Калмыкии имеет значительную тенденцию к росту, что показала катастрофическая засуха лета 2020 г., которая распространилась на огромные площади и привела к миллионным убыткам. Полученные результаты, подтверждаемые в том числе изменениями минимальных значений NDVI, доказывают уязвимость пастбищных угодий Калмыкии к современному изменению климата, что требует разработки и внедрения адаптационных мер.

Ключевые слова: альбедо, температура поверхности, NDVI, засуха, опустынивание, MODIS, Республика Калмыкия

Одобрена к печати: 18.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141

Введение

Специфическими особенностями территории Республики Калмыкия являются засухи и суховеи. Данный регион — самый засушливый на юге европейской части России. Важнейшая составная часть экономики Калмыкии — агропромышленный комплекс. Основу аграрного сектора экономики республики составляет животноводство, которое во многом зависит от состояния пастбищ, а оно, в свою очередь, характеризуется недостаточным атмосферным увлажнением и антропогенной нагрузкой.

На территории Калмыкии чередовались периоды нарастания процессов опустынивания и его ослабления. 1980-е гг. характеризовались стабильными и в целом благоприятными климатическими условиями (Тельнова, 2017). Площадь опустынивания обеспечивалась относительно небольшим количеством песчаных массивов (Шинкаренко, 2019). В период 1985–1991 гг. на территории Калмыкии были выявлены «острова» опустынивания антропогенного происхождения, один из которых существовал вблизи Черноземельского биосферного заповедника (Золотокрылин, Титкова, 2011; Лобковский и др., 2019). Фитомелиоративные мероприятия в 1990-х гг., совпавшие с влажной флуктуацией климата, и снижение антропогенной нагрузки на пастбища в последующие годы изменили ситуацию вблизи заповедника. Новое усиление перевыпаса в первом десятилетии XXI в. вызвало ускоренное образование новых районов деградации земель на пастбищах сухостепной части Калмыкии на фоне уменьшения суммы осадков за весенний период, очень важных для вегетации доминирующих растительных сообществ (Кулик и др., 2018; Петров и др., 2016, Шинкаренко, 2019).

Летние изменения климата юга Европейской России, в том числе в Республике Калмыкия, следует охарактеризовать как продолжающееся потепление. В последнее десятилетие XX в. увлажнение юга России имело положительную динамику, но после обширных засух 2003 и 2007 гг. началась устойчивая смена положительной тенденции увлажнения на отрицательную (Золотокрылин и др., 2016). Засухи в Калмыкии повторяются с постоянством не реже трёх-пяти раз за десятилетие (Zolotokrylin et al., 2020b).

В аридных землях, к которым относится и Калмыкия, с помощью мониторинга изменений знака связи альбедо и температуры поверхности можно выделить районы, подверженные климатическому и антропогенному опустыниванию (Золотокрылин, Титкова, 2011). Сухая растительность и обнажённая почва обычно имеют более высокое альбедо и меньшую излучательную способность, чем биологически активная растительность. Анализ накопленных данных о спектральных характеристиках поверхности в аридных природных зонах свидетельствует о конкуренции здесь механизмов регулирования температуры подстилающей поверхности: радиационного (альбедного) и эвапотранспирационного (Золотокрылин, 2003; Becker et al., 1988; Otterman, 1974; Tereshchenko et al., 2012). Каждому механизму соответствует положительная или отрицательная связь (корреляция) между альбедо и температурой поверхности.

При эвапотранспирационном регулировании температуры поверхности заметная часть поглощённого поверхностью радиационного тепла тратится на транспирацию и испарение. В итоге в случае увеличения альбедо поверхности температура поверхности возрастает, т. е. между ними возникает положительная корреляция вследствие того, что часть тепла, которая тратится на транспирацию, переключается на турбулентный прогрев приземного слоя атмосферы и почвы. С повышением температуры воздуха происходит и увеличение температуры поверхности почвы.

Радиационный механизм характерен для аридных ландшафтов со слабо развитым или отсутствующим растительным покровом. Радиационное регулирование температуры поверхности в аридных ландшафтах — это процесс, при котором с возрастанием альбедо поверхности происходит уменьшение поглощения радиационной энергии её деятельным слоем, при этом температура поверхности снижается, и наоборот — повышается при уменьшении альбедо. При доминировании этого механизма в аридных ландшафтах наблюдается отрицательная корреляция альбедо и температуры поверхности. Весь радиационный баланс пустыни расходуется на нагревание воздуха и почвы, что указывает на происходящие здесь процессы опустынивания. При этих условиях снижаются показатели листовой поверхности, злаки и разнотравье испытывают стресс, а значения NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) падают до минимума.

Цель настоящей работы заключается в мониторинге площади земель Республики Калмыкия, подверженных опустыниванию, обусловленному как климатическими предпосылками (особенно засухами), так и антропогенной нагрузкой, по отрицательной связи между значениями альбедо и температуры поверхности. В результате становится возможной оценка площадей распространения опустынивания и их динамики, а также определение тренда опустынивания в условиях роста повторяемости засух.

Данные и методика исследования

Методика исследований площадей, подверженных опустыниванию, была подробно разобрана в статье (Золотокрылин, Титкова, 2011). Подход базируется на разработанной в конце XX в. гипотезе о климатическом опустынивании с обратными связями «альбедо — осадки» (Золотокрылин, 2003). Согласно этой гипотезе, климатическое опустынивание доминирует в аридных условиях и поддерживается региональной положительной обратной связью «альбедо — осадки». Положительная обратная связь поддерживается структурой теплового баланса поверхности, в котором почти всё поглощённое радиационное тепло тратится на турбулентный прогрев приземной атмосферы. В этих условиях характерно радиационное регулирование температуры поверхности, которое выражается отрицательной корреляцией между альбедо и температурой поверхности.

Мониторинг опустынивания в Калмыкии стал возможен с использованием спутниковых данных MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Для оценки территорий, подверженных опустыниванию, мы использовали базу MODIS по спектральным характеристикам поверхности: альбедо, температуре поверхности и нормализованному индексу растительности NDVI. Рассматривался период с апреля по сентябрь 2000–2021 гг. как приближенный к вегетационному.

Альbedo поверхности (Al) — данные модели MCD43C1, версия 6 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd43c1v006/>). Функция двунаправленного распределения отражения и набор параметров модели Albedo производятся ежедневно с использованием 16-дневных данных Terra и Aqua MODIS в CMG (*англ.* climate modelling grid — сетка моделирования климата) с разрешением $0,05 \times 0,05^\circ$. Мы использовали интегрированное изотропное альbedo, наблюдаемое в дневное время в видимом диапазоне для середины месяца, для контроля интерпретации значений альbedo типичных природных образований при нормальном падении излучения.

Температура поверхности (T_s) — данные модели MOD11C3, версия 6 (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod11c3v006/>), которая обеспечивает ежедневные значения коэффициента излучения (LST & E) (*англ.* land surface temperature) Земли с разрешением $0,05 \times 0,05^\circ$. Значения LST & E в продукте MOD11C3 получены усреднением значений из соответствующего месяца ежедневных файлов MOD11C1. Использовалась температура поверхности, наблюдаемая в дневное время.

Площади, подверженные опустыниванию в результате как климатического, так и антропогенного влияния, были идентифицированы по статистически значимым отрицательным коэффициентам корреляции между альbedo и температурой поверхности на исследуемой территории. Значимость корреляции определялась по статистической достоверности корреляционной связи r -Пирсона. Анализировались средние месячные коэффициенты корреляции для каждого года с апреля по сентябрь 2000–2021 гг. Пространственная корреляция между альbedo и температурой поверхности была рассчитана в ячейках $0,25 \times 0,25^\circ$. Каждый участок включал $5 \times 5 = 25$ измерений. При этой статистике для уровня значимости (p) 0,05 критическое значение корреляции равно 0,27, для уровня значимости 0,01 составляет 0,35. Поля корреляции строились в системе MatLab. Интенсивность опустынивания оценивалась по величине отрицательной корреляции альbedo и температуры поверхности: коэффициент корреляции $K < -0,2$ — слабая, $K < -0,4$ — средняя, $K < -0,6$ — сильная (Zolotokrylin et al., 2020a).

Для оценки реакции растительности на изменения условий увлажнения был использован среднемесячный количественный показатель фотосинтетически активной биомассы — нормализованный индекс растительности NDVI. Анализ проводился по данным NDVI, полученным с помощью модели MOD13C2 версии 6 для среднемесячных значений с разрешением CMG $0,05 \times 0,05^\circ$ (<https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13c2v006/>). Глобальные данные представляют собой безоблачные пространственные композиты поверхности за месяц. Значения NDVI менее 0,5 указывают на разреженную растительность. Существует устойчивая корреляция между показателем NDVI и продуктивностью для различных типов экосистем. Для Калмыкии характерны сухостепные и полупустынные ландшафты (Национальный..., 2004–2021) со значениями NDVI 0,2–0,5 (Титкова и др., 2020). Поэтому NDVI менее 0,2 здесь указывает на полную деградацию растительности в засушливых условиях.

Результаты и обсуждение

Земли, подверженные опустыниванию

При рассмотрении в среднем 22-летнего периода (2000–2021) можно отметить, что в центральной части Калмыкии наблюдаются значительные площади земель, где доминирует радиационный тип регулирования температуры поверхности. Эти площади увеличиваются от месяца к месяцу в тёплый период: от 7 тыс. км² в апреле–мае до 16–17 тыс. км² в августе и уменьшаются в сентябре (*табл. 1*). Здесь коэффициент корреляции между Al и T_s отрицательный и имеет значение менее $-0,2$ (*рис. 1*, см. с. 133). Это районы с неустойчивыми ландшафтами, которые с большой вероятностью могут быть подвергнуты процессами опустынивания.

В апреле–мае при максимуме вегетации «острова» опустынивания расположены севернее г. Яшкуль, а также севернее и южнее г. Ютта. Очаги опустынивания в это время года с $K < -0,6$ занимают порядка 0,3 тыс. км² и представлены, вероятнее всего, открытыми песками и солончаками.

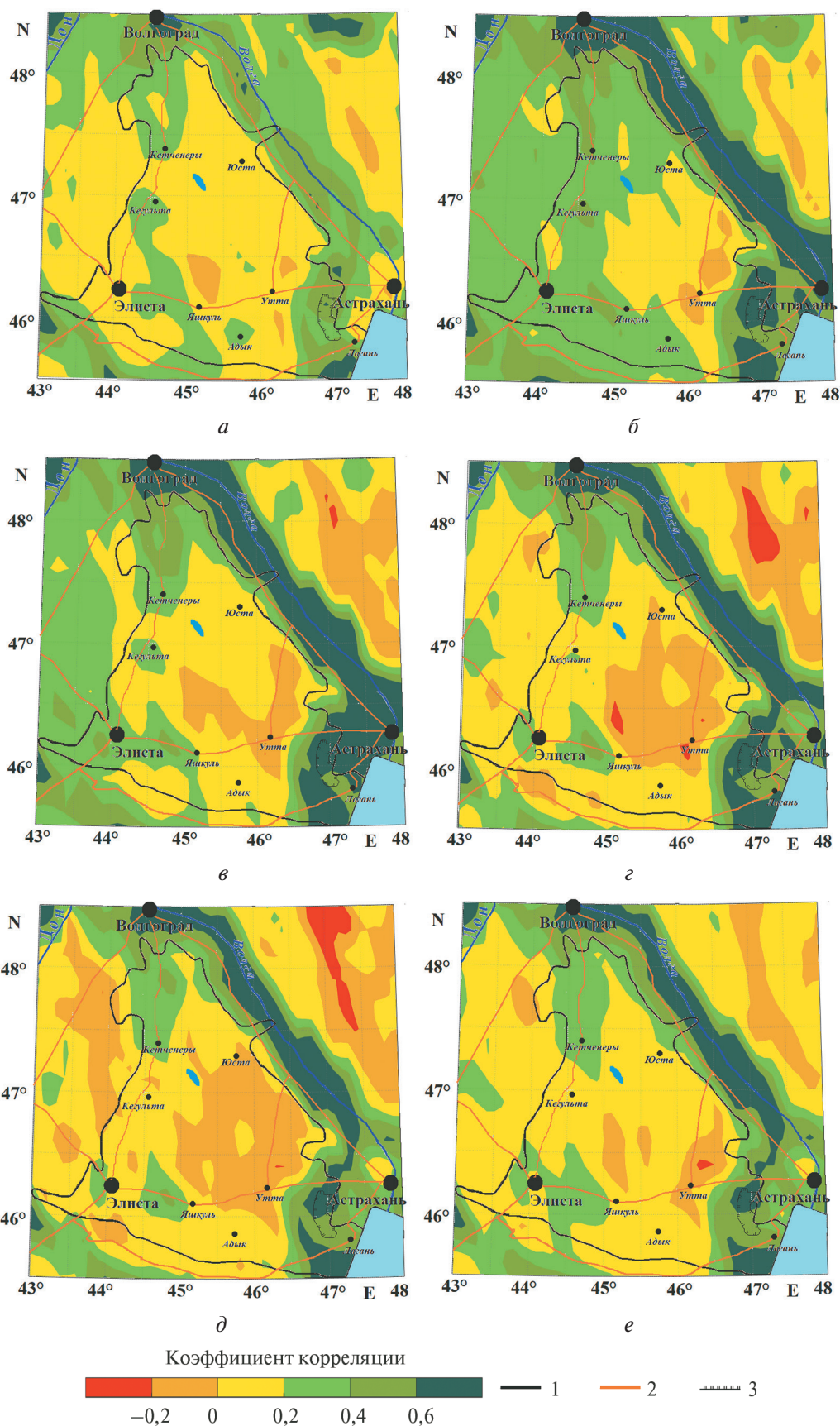


Рис. 1. Корреляция альбедо (Al) и температуры поверхности (T_s) в 2000–2021 гг. в Республике Калмыкия: а — апрель; б — май; в — июнь; г — июль; д — август; е — сентябрь. Условные обозначения: 1 — границы Республики Калмыкия; 2 — автомобильные дороги между региональными центрами; 3 — границы заповедника «Чёрные Земли»

Таблица 1. Характеристики (среднее, стандартное отклонение (СТО), годовой тренд) площадей отрицательной корреляции альбедо и температуры поверхности разной степени интенсивности опустынивания (K) и $NDVI < -0,2$ в Калмыкии по месяцам за 2000–2021 гг., км²

K	$<-0,2$	$<-0,4$	$<-0,6$	$NDVI <-0,2$
<i>Апрель</i>				
среднее	7443	2031	319	219
СТО	3642	1542	350	319
тренд/год	359	105	11	15
<i>Май</i>				
среднее	7230	2066	344	239
СТО	2923	1879	516	515
тренд/год	250	142	34	30
<i>Июнь</i>				
среднее	9867	3246	618	968
СТО	3131	1753	647	1673
тренд/год	145	115	17	135
<i>Июль</i>				
среднее	13943	5312	1107	4095
СТО	4483	2103	875	4603
тренд/год	151	69	26	276
<i>Август</i>				
среднее	16900	6106	1185	8044
СТО	5961	2578	831	6710
тренд/год	168	48	22	293
<i>Сентябрь</i>				
среднее	13473	5539	953	5712
СТО	6824	5092	1268	6927
тренд/год	228	240	40	230

С июня по август районы, подвергнутые опустыниванию, разрастаются, сливаются и занимают практически всю центральную часть Калмыкии. Площади, уже подверженные опустыниванию ($K < -0,4$), увеличиваются от 2 тыс. км² (апрель–май) до 6 тыс. км² (август). Площади с сильной интенсивностью опустынивания ($K < -0,6$) обнаруживаются только в аномальные засушливые годы и в среднем за 2000–2021 гг. составляют от 0,3 до 1,5 тыс. км². Колебание площадей с разной интенсивностью опустынивания год от года значительное: от 0 до 10 тыс. км². Стандартное отклонение в мае–июне может быть сравнимо с самим средним значением.

Характерная ритмика роста и развития растений на территории Калмыкии геннотипически определённа и выражается в феноритмотипах. Большинство видов развиваются в самое благоприятное время года — весной, с максимумом развития в апреле–мае и минимумом в июле–августе (Бакташева, Хазыкова, 2013). Средняя площадь с деградированной растительностью ($NDVI < -0,2$) в апреле–мае составляет около 0,2 тыс. км², увеличивается к августу до максимума около 8 тыс. км² и уменьшается в сентябре до 5,7 тыс. км² (см табл. 1). Связь изменений деградированной растительности ($NDVI < -0,2$) с изменениями площадей, находящихся в зоне риска опустынивания ($K < -0,2$), с землями, подверженными опустыниванию ($K < -0,4$), а также с сильным опустыниванием ($K < -0,6$) значима с июня по сентябрь (табл. 2).

Таблица 2. Корреляция площади земель с $NDVI < -0,2$ с площадью отрицательной корреляции AI и Ts поверхности разной степени интенсивности опустынивания (K) по месяцам

K	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь
$< -0,2$	0,05	0,62	0,66	0,76	0,78	0,85
$< -0,4$	0,10	0,77	0,68	0,76	0,71	0,92
$< -0,6$	0,01	0,59	0,35	0,48	0,55	0,84

Динамика опустынивания

С начала XXI в. наблюдается тенденция увеличения земель, подверженных сезонному опустыниванию во все месяцы с мая по сентябрь (см. табл. 1, рис. 2), чему способствовали как климатические условия (Золотокрылин и др., 2016), так и участвовавшие в регионе ландшафтные пожары, приводящие к гибели кустарников и полукустарничков, закреплявших пески (Дубинин и др., 2010; Шинкаренко, 2019). Наиболее сильно это происходит в конце весны. Так, тренд земель со слабой степенью опустынивания находится в пределах $150\text{--}359\text{ км}^2/\text{год}$ с максимумом в апреле, со средней — $48\text{--}142\text{ км}^2/\text{год}$ с максимумом в мае, с сильной — $22\text{--}57\text{ км}^2/\text{год}$ с максимумом в мае и сентябре.

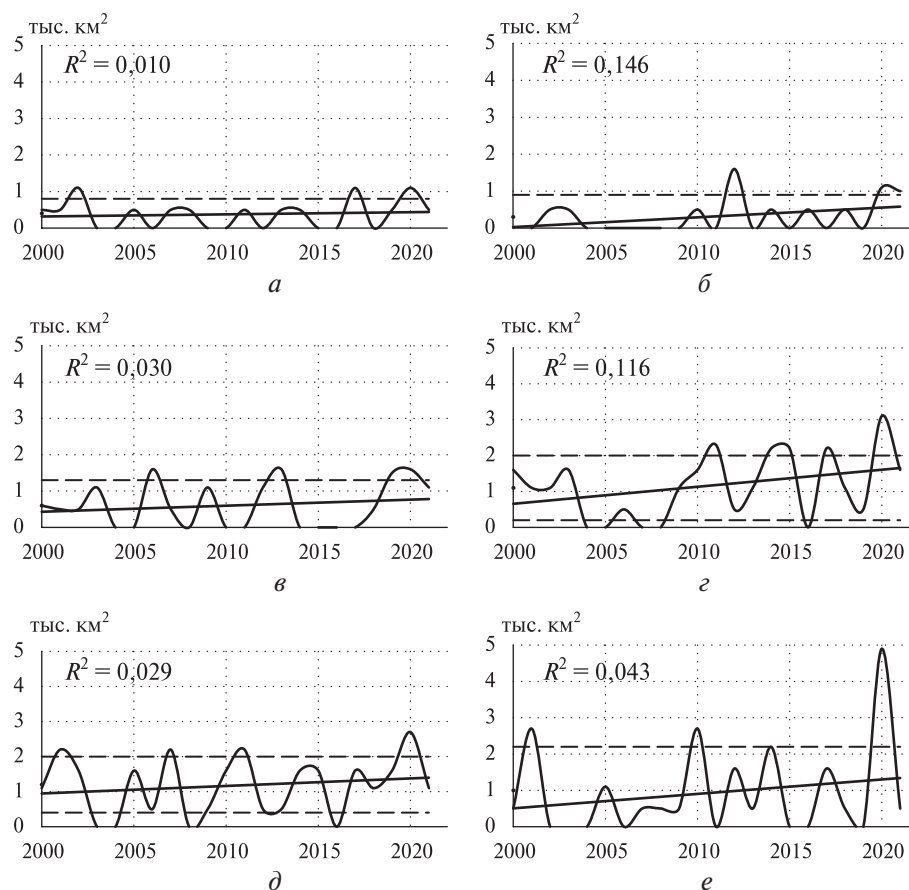


Рис. 2. Изменение площадей, подверженных сильному опустыниванию ($K < -0,6$), на территории Республики Калмыкия в 2000–2021 гг. с доверительными интервалами и трендом по месяцам: a — апрель; $б$ — май; $в$ — июнь; $г$ — июль; $д$ — август; $е$ — сентябрь

Значительные площади Калмыкии, подверженные сильному опустыниванию, наблюдались в 2003 и 2007 гг., но в эти годы площади засух не превышали стандартное отклонение средних характеристик. Уже в 2011 и 2014 гг. число земель, подверженных опустыниванию, стало превышать стандартное отклонение.

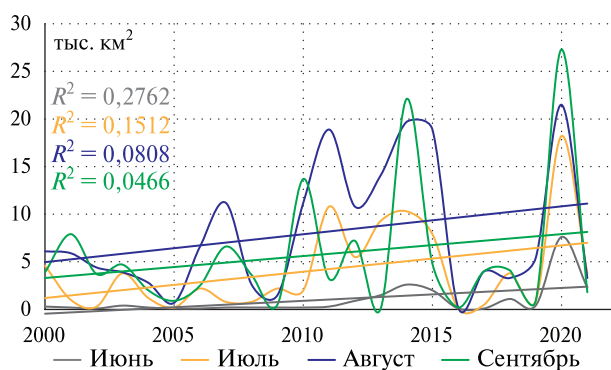


Рис. 3. Изменение площадей с NDVI < 0,2 на территории Республики Калмыкия в 2000–2021 гг. с трендом по месяцам

Рост опустынивания начался после 2010 г. Произошло увеличение пастбищных нагрузок на фоне уменьшения суммы осадков за весенний период, очень важный для вегетации злаковых трав (Шинкаренко, 2019). В 2011, 2014 и 2020 гг. засуха уничтожила максимальное число пастбищ, что стало принимать катастрофические последствия для хозяйственной деятельности Калмыкии. В 2020 г. опустынивание приобрело региональный масштаб. Площадь земель, подвергнувшихся опустыниванию с разной степенью интенсивности, превысила двойное стандартное отклонение за 22-летний период. Для районов с интенсивным опустыниванием ($K < -0,6$) двойное стандартное отклонение было превышено в июле и сентябре.

Такое развитие событий подтверждает изменение площадей со значениями NDVI < 0,2, которые максимальны в годы сильных засух (рис. 3). Тренд земель с увядшей и деградированной растительностью возрастает с мая по август до 0,2–0,3 тыс. км².

Засуха 2020 года

Засуха 2020 г. оказалась одной из сильнейших в Калмыкии. Её предпосылки были заметны ещё с осени 2019 г. Аномально малое количество осадков отмечалось всю осень и начало зимы 2019 г. В начале 2020 г. ситуация не улучшилась, месячные суммы осадков не превышали 5 мм (рис. 4). Отсутствие зимней влаги и ранняя весна предопределили чрезмерную эксплуатацию естественных кормовых угодий. Аномально сухая зима вынудила калмыцких фермеров пойти на непопулярные меры: часть скота была продана, а оставшихся начали кормить из стратегических запасов ещё с поздней зимы. В июле 2020 г. в семи районах Калмыкии был объявлен режим чрезвычайной ситуации из-за засухи и суховеев. Специалистами Министерства сельского хозяйства Республики Калмыкия и специальными районными комиссиями была выявлена гибель пастбищ на территории 2,8 млн га (<https://www.agroinvestor.ru/business-pages/35171-zasukha-2020-goda-ostro-obnazhila-problemy-agrosektora-v-kalmykii/>).

Начавшийся в начале мая летний период отмечался высокими температурами (25,5–35 °С) и редкими осадками, преимущественно ливневого характера. На рис. 4 показана месячная сумма осадков за сезон 2019–2020 гг. на фоне средних сумм за период 1991–2015 гг. на метеостанции Элиста по данным Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — Мирового центра данных (<http://meteo.ru/>). С сентября 2019 г. по август 2020 г. осадки были в 4–5 раз меньше нормы. Летний период 2020 г. характеризовался длительными суховеями разной степени интенсивности. Почвенная засуха началась уже в конце весны, с температурой почвы +60 °С. При отсутствии достаточного количества осадков суховеи иссушали землю, в которой практически не осталось влаги, а в межсезонье почти не было дождей (Ташнинова, 2020).

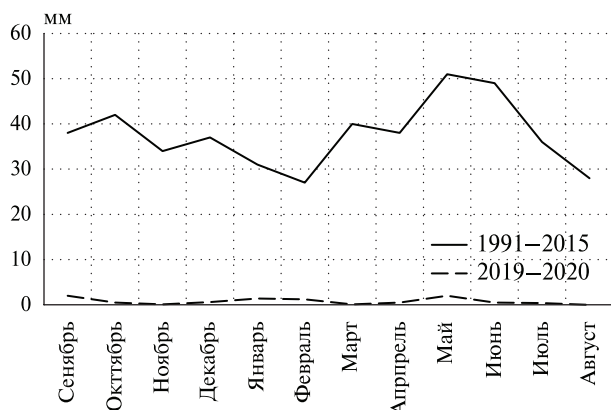


Рис. 4. Месячные суммы осадков на ст. Элиста в среднем за 1991–2015 гг. и сезон 2019–2020 гг.

По рис. 5 и табл. 3 можно наглядно увидеть, как менялись площади и интенсивность опустынивания с мая по август 2020 г. В мае очаг интенсивности опустынивания находился в самом центре республики, а также в окрестностях городов Утта и Яшкуль и занимал площади около 540 км². Площади с меньшими интенсивностями уже отмечались мозаично по всей территории и в сумме занимали около 2 тыс. км². Исследователи отмечали, что площадь открытых песков весной 2020 г. в исследуемом районе составляла 171,8 тыс. га (Шинкаренко, Барталев, 2020). Значения NDVI < 0,2 наблюдались на территории около 0,3 тыс. км². В июне произошло объединение очагов опустынивания и их усиление, начиная от западных границ республики до восточных. Площади со средней интенсивностью уже занимали более 1 тыс. км², а со слабой — почти в 3 раза больше.

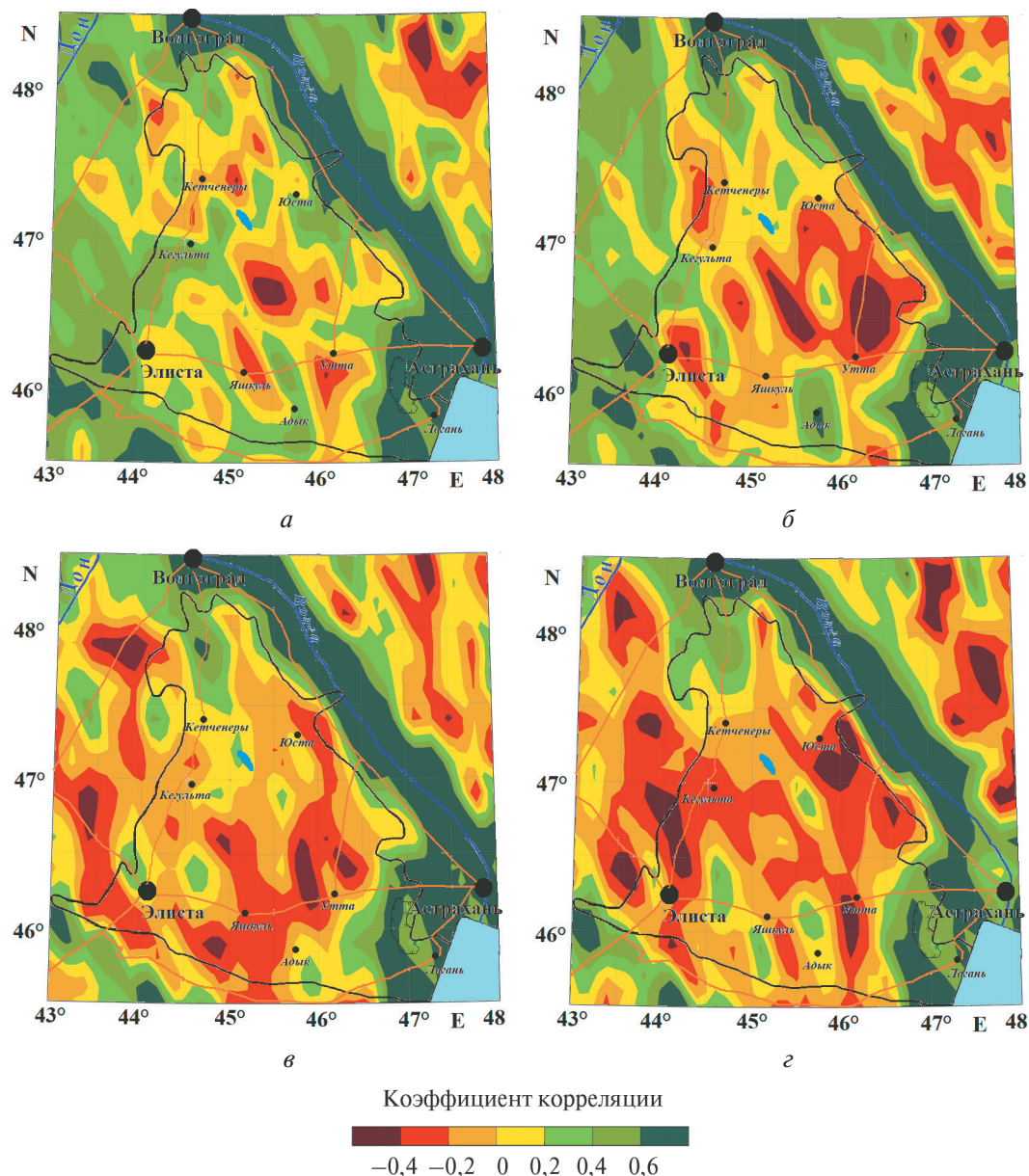


Рис. 5. Поля корреляции альbedo и температуры поверхности в Республике Калмыкия, 2020 г.: а — май; б — июнь; в — июль; г — август. Условные обозначения — см. рис. 1

В июле распространение опустынивания в условиях катастрофической засухи продолжилось и охватило большую половину Калмыкии, расширяясь как на север, так и на юг. Опустынивание слабой интенсивности уже охватило более 10 тыс. км² территории. Между

городами Яшкуль и Утта появились очаги с сильной интенсивностью опустынивания с площадью более 1 тыс. км². В августе продолжились увеличиваться площади с сильной интенсивностью опустынивания между городами Кетченеры, Кегульта, Юста и заняли уже более 14 тыс. км². При этом от июля к августу были отмечены участки с ослаблением степени опустынивания на юго-западе г. Яшкуля и западнее г. Утта. В работе (Шинкаренко, Барталев, 2020) показано, что среднемесячный прирост площади песчаных массивов в Калмыкии в мае – сентябре составлял примерно 65,7 тыс. га. В результате к концу сентября площадь открытых песков увеличилась почти до 600 тыс. га.

Таблица 3. Площади с отрицательной корреляцией альбедо и температуры поверхности в Республике Калмыкия по месяцам в 2020 г. с разной интенсивностью опустынивания и $NDVI < 0,2$, км²

Месяц	Слабая, $K < -0,2$	Средняя, $K < -0,4$	Сильная, $K < -0,6$	$NDVI < 0,2$
Май	2105	540	0	324
Июнь	2705	1082		5842
Июль	10279	2705	1082	28077
Август	14066	4869	0	38573

Погодные особенности наложили отпечаток на прохождение цикла фенологических фаз. В засушливые годы большая часть видов растительности в степях Калмыкии остаётся в вегетативном состоянии либо усыхает в процессе вегетации (Бакташева, Хазыкова, 2013), что наблюдалось и в 2020 г. Территория с $NDVI < 0,2$ стремительно расширилась и стала больше среднего за 22-летний период: в 6 раз в июне – июле и в 5 раз в августе.

Выводы

Для мониторинга площади распространения опустынивания в аридных районах, и в Республике Калмыкия в частности, хорошо зарекомендовал себя показатель связи спектральных характеристик поверхности: альбедо и температуры поверхности, подтверждённый минимальными показателями вегетационного индекса $NDVI$. Этот подход позволил выявить площади земель, подверженных сезонному опустыниванию, которые различаются по протяжённости и интенсивности.

В центральной части Калмыкии наблюдаются значительные площади земель, где доминирует радиационный тип регулирования температуры поверхности и которые с большой вероятностью могут быть подвергнуты процессами опустынивания. Колебание площадей с разной интенсивностью опустынивания год от года составляет от 0 до 10 тыс. км². Площади с сильной интенсивностью опустынивания обнаруживаются только в аномальные засушливые годы. Связь изменений деградированной растительности ($NDVI < -0,2$) с изменениями площадей, находящихся в зоне риска опустынивания, значима с июня по сентябрь.

Локализация районов, подверженных опустыниванию, из года в год может меняться; это свидетельствует о том, что оно может быть обусловлено как климатическим, так и антропогенным прессом, что подтверждается и другими исследованиями (Шинкаренко, 2019). Результаты изучения динамики аридизации и деградации земель Калмыкии выявили внутривековые периоды усиления и ослабления аридизации — в зависимости от частоты и интенсивности весенне-летних засух (Zolotokrylin et al., 2020b). Начиная с 2007 г. на территории Калмыкии наблюдается фаза снижения увлажнения. Сильные засухи в регионе повторяются в среднем 3–5 раз за десятилетие. Таким образом, интенсивность опустынивания, обусловленная климатическими факторами, в Калмыкии имеет значительную тенденцию к росту. Это подтвердила катастрофическая засуха лета 2020 г., которая распространилась на огромные площади и привела к выгоранию больше половины пастбищных территорий, большим потерям в животноводстве и миллионным убыткам.

Перечисленные выше факты доказывают уязвимость пастбищных угодий Республики Калмыкия к изменению климата, что требует разработки и внедрения адаптационных мер. В современный период встаёт вопрос о дополнительных мерах по снижению последствий иссушения и деградации земель для обеспечения оптимального функционирования природного комплекса и хозяйственной деятельности. Необходимы более продуманный контроль за перевыпасом скота и повышение экологической культуры населения, чтобы уменьшить антропогенную нагрузку на пастбища и минимизировать риски для сельского хозяйства. На фоне климатических изменений необходимы меры адаптации пастбищных угодий к последствиям потепления климата, такие, например, как обводнение пастбищ и орошение, восстановление отгонно-пастбищной системы содержания животных, внедрение системы регулируемого выпаса животных, усовершенствование системы мониторинга пастбищ.

Исследование выполнено в рамках темы государственного задания Института географии РАН № AAAA-A19-119022190173-2 (FMGE-2019-0009).

Литература

1. Бакташева Н. М., Хазыкова Н. Б. Особенности сезонного развития псаммофильной растительности в черноземельском районе республики Калмыкия // Вестн. Калмыцкого ин-та гуманитарных исслед. РАН. 2013. № 2. С. 139–142.
2. Дубинин М. Ю., Луцкеина А. А., Раделоф Ф. К. Оценка современной динамики пожаров в аридных экосистемах по материалам космической съемки (на примере Черных земель) // Аридные экосистемы. 2010. Т. 6. № 3. С. 5–16.
3. Золотокрылин А. Н. Климатическое опустынивание / ред. Кренке А. Н. М.: Наука, 2003. 246 с.
4. Золотокрылин А. Н., Титкова Т. Б. Новый подход к мониторингу опустынивания // Аридные экосистемы. 2011. Т. 17. № 3(48). С. 14–22.
5. 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.
6. 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. 24. № 1(74). С. 5–12.
7. Лобковский В. А., Куст Г. С., Андреева О. В., Бабина Ю. В., Бардин М. Ю., Золотокрылин А. Н., Кухта А. Е., Титкова Т. Б., Черенкова Е. А., Попова Е. Н. Информационная поддержка, мониторинг и основные показатели, используемые на национальном уровне в области предупреждения и борьбы с ОДЗЗ // Деградация земель и опустынивание в России: новейшие подходы к анализу проблемы и поиску путей решения. М.: Изд-во «Перо», 2019. С. 165–168.
8. Национальный атлас России / гл. ред. В. В. Свешников. М.: Роскартография, 2004–2021. Т. 2. С. 398–399. URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/331.html>.
9. Петров К. М., Бананова В. А., Лазарева В. Г., Унагаев А. С. Динамика процессов опустынивания Северо-Западного Прикаспия: физико-географические и социально-экономические аспекты: атлас-монография. СПб.: Химиздат, 2016. 90 с.
10. Ташнинова А. А. Анализ изменений основных климатических показателей в республике Калмыкия за 2020 год // Вестн. ин-та комплексных исслед. аридных территорий. 2020. № 41. С. 25–30. DOI: 10.24412/2071-7830-2020-41-25-30.
11. Тельнова Н. О. Выявление и картографирование многолетних трендов NDVI для оценки вклада изменений климата в динамику биологической продуктивности агроэкосистем лесостепной и степной зон Северной Евразии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 6. С. 97–107. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-97-107.
12. 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.
13. Шинкаренко С. С. Пространственно-временная динамика опустынивания на Чёрных землях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 155–168. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168.
14. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Последствия пыльных бурь на юге европейской части России в сентябре–октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 270–275. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-270-275.

15. Becker F., Bolle H. J., Rowntree P. R. The international satellite land-surface climatology project. Berlin: Free Unit. Press, 1988. 100 p.
16. Otterman J. Baring high-albedo soils by overgrazing: Hypothesized desertification mechanism // Science. 1974. No. 186(4163). P. 531–533.
17. Tereshchenko I., Zolotokrylin A., Titkova T., Brito-Castillo L., Monzon C. O. On seasonal variation of surface temperature-modulating factors in the Sonoran Desert, North-West Mexico // J. Applied Meteorology Climatology. 2012. No. 51. P. 1519–1530. DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0160.1.
18. Zolotokrylin A., Brito-Castillo L., Titkova T. (2020a) Monitoring of the “island” of desertification in Sonora in the 21st century // J. Arid Environments. 2020. No. 178. 104147. P. 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104147>.
19. Zolotokrylin A., Titkova T., Cherenkova E. (2020b) Characteristics of Spring–Summer Drought in Dry and Wet Periods in the South of European Russia // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. P. 322–328. <https://doi.org/10.1134/S2079096120040216>.

Monitoring of lands affected by desertification in the Republic of Kalmykia

T. B. Titkova, A. N. Zolotokrylin

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

A monitoring of lands with distinct desert conditions in the Republic of Kalmykia during the summer period from 2000 to 2021 was conducted. The analysis was produced on the basis of the connection between spectral values of albedo and surface temperature. The suggested approach allowed to evaluate land area affected by seasonal desertification, varying in length and intensity. The localization of districts affected by desertification can change from year to year, showing that it results from both climate and anthropogenic factors. The intensity of desertification caused by droughts tends to increase in the Republic of Kalmykia, and the disastrous drought of summer 2020 demonstrated that, spreading to vast areas and leading to millions in damages. The obtained results were confirmed, inter alia, by changes of minimal values of NDVI and proved the fragility of grassland in the Republic of Kalmykia to modern climate changes that requires development and implementation of adaptation measures.

Keywords: albedo, surface temperature, NDVI, drought, desertification, MODIS, the Republic of Kalmykia

Accepted: 18.04.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-2-130-141

References

1. Baktasheva N. M., Khazykova N. B., Peculiarities of seasonal development of psammophilic vegetation in the Chernozemel region of the Republic of Kalmykia, *Bull. Kalmyk Inst. Humanitarian Research RAS*, 2013, No. 2, pp. 139–142 (in Russian).
2. Dubinin M. Yu., Lushchekina A. A., Radelof F. K., Assessment of modern burning dynamics in arid ecosystems using remote sensing data (case study of Chernye zemli), *Aridnye ekosistemy*, 2010, Vol. 6, No. 3, pp. 5–16 (in Russian).
3. Zolotokrylin A. N., *Klimaticheskoe opustynivanie* (Climate desertification), Krenke A. N. (ed.), Moscow: Nauka, 2003, 246 p. (in Russian).
4. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., New approach to desertification seats monitoring, *Aridnye ekosistemy*, 2011, Vol. 17, No. 3(48), pp. 14–22 (in Russian).
5. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Cherenkova E. A., Vinogradova V. V., Dynamics of arid pastures summer moistening and biophysical parameters in the European Russia in 2000–2014, *Aridnye ekosistemy*, 2016, Vol. 22, No. 1(66), pp. 5–10 (in Russian).

6. 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", *Arid Ecosystems*, 2018, Vol. 8, No. 1, pp. 1–6.
7. Lobkovsky V. A., Kust G. S., Andeeva O. V., Babina Yu. V., Bardin M. Yu., Zolotokrylin A. N., Kukhta A. E., Titkova T. B., Cherenkova E. A., Popova E. N., Information support, monitoring and main indicators used at the national level in the field of preventing and combating DLDD, In: *Degradatsiya zemel' i opustynivanie v Rossii: noveishie podkhody k analizu problemy i poisku putei resheniya* (Land degradation and desertification in Russia: modern approaches to the problem analysis and ways of solution), Moscow: Izd. Pero, 2019, pp. 165–168 (in Russian).
8. *Natsionalnyi atlas Rossii* (The National Atlas of Russia), Sveshnikov V. V. (ed.), Moscow: Roskartografiya, 2004–2008, Vol. 2, pp. 398–399 (in Russian), available at: <https://nationalatlas.ru/tom2/331.html>.
9. Petrov K. M., Bananova V. A., Lazareva V. G., Unagaev A. S., *Dinamika protsessov opustynivaniya Severo-Zapadnogo Prikaspiya: fiziko-geograficheskie i sotsial'no-ekonomicheskie aspekty: atlas-mongorgapiya* (Dynamics of desertification processes in the North-Western Caspian region: physical-geographical and socio-economic aspects: atlas-monograph), Saint Petersburg, 2016, 90 p. (in Russian).
10. Tashninova A. A., Analysis of changes in the main climatic indicators in the Republic of Kalmykia for 2020, *Bull. Inst. Comprehensive Studies of Arid Territories*, 2020, No. 41, pp. 25–30 (in Russian), DOI: 10.24412/2071-7830-2020-41-25-30.
11. Telnova N. O., Revealing and mapping long-term NDVI trends for the analysis of climate change contribution to agroecosystems' productivity dynamics in the Northern Eurasian forest-steppe and steppe, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 97–107 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-97-107.
12. Titkova T. B., Zolotokrylin A. N., Vinogradova V. V., The spectral portrait of plain landscapes in Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 117–126 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-117-126.
13. Shinkarenko S. S., Spatial-temporal dynamics of desertification in Black Lands, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 155–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168.
14. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Consequences of dust storms in the south of the European part of Russia in September–October 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 270–275 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-270-275.
15. Becker F., Bolle H. J., Rowntree P. R., *The international satellite land-surface climatology project*, Berlin: Free Unit. Press, 1988, 100 p.
16. Otterman J., Baring high-albedo soils by overgrazing: Hypothesized desertification mechanism, *Science*, 1974, No. 186(4163), pp. 531–533.
17. Tereshchenko I., Zolotokrylin A., Titkova T., Brito-Castillo L., Monzon C. O., On seasonal variation of surface temperature-modulating factors in the Sonoran Desert, North-West Mexico, *J. Applied Meteorology Climatology*, 2012, No. 51, pp. 1519–1530, DOI: 10.1175/JAMC-D-11-0160.1.
18. Zolotokrylin A., Brito-Castillo L., Titkova T. (2020a), Monitoring of the "island" of desertification in Sonora in the 21st century, *J. Arid Environments*, 2020, No. 178, 104147, pp. 1–13, <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104147>.
19. Zolotokrylin A., Titkova T., Cherenkova E. (2020b), Characteristics of Spring–Summer Drought in Dry and Wet Periods in the South of European Russia, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, pp. 322–328, <https://doi.org/10.1134/S2079096120040216>.