

Многолетняя динамика NDVI аридных пастбищных ландшафтов Европейской России и сопредельных территорий

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

E-mail: vnialmi@bk.ru

Представлены результаты анализа многолетней динамики средних и максимальных значений NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс) за вегетационный период для пастбищ юго-востока Европейской России и Западного Казахстана по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за 2001–2020 гг. Существующие исследования трендов состояния ландшафтов часто не разделяют пастбищные и пахотные земли, не учитывают пастбищные нагрузки либо ограничены территориями отдельных стран, регионов или тестовых участков. В настоящей работе проведён корреляционный анализ многолетних рядов NDVI, сумм осадков за гидрологический и календарный годы, средней годовой температуры воздуха, максимальной температуры воздуха за вегетационный сезон и пастбищных нагрузок. Установлена значимая положительная корреляция с суммами осадков за гидрологический год на 98 % площади пастбищ, для 44,5 % пастбищ — наиболее сильная отрицательная корреляция с температурами воздуха, ещё для 55 % — с пастбищными нагрузками. На площади в 20 млн га (24 % исследованных пастбищ) отмечен значимый отрицательный тренд среднего значения NDVI за вегетационный сезон. Для 72 % пастбищ характерны отрицательные тренды сумм осадков, на 83 % пастбищ выявлен значимый тренд роста нагрузок, также для 59 % пастбищ отмечен положительный тренд увеличения максимальной за вегетационный сезон температуры. Таким образом, в результате исследований установлены закономерности многолетней динамики NDVI аридных пастбищ России и сопредельных территорий, выявлены ключевые факторы снижения их продуктивности: ухудшение условий увлажнения, рост температуры воздуха и пастбищных нагрузок.

Ключевые слова: пастбищные нагрузки, дистанционное зондирование, MODIS, Северный Прикаспий, Западный Казахстан

Одобрена к печати: 28.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-108-123

Введение

Естественные экосистемы засушливой зоны наиболее чувствительны к климатическим изменениям по сравнению с большинством других территорий, находящихся в лучших условиях увлажнения. При этом нерациональное использование аридных ландшафтов на фоне климатических изменений может приводить к необратимым последствиям опустынивания, которые выражаются в деградации растительности, вплоть до полного её уничтожения (Золотокрылин, Виноградова, 2007; Спивак и др., 2011). Так, в середине 80-х гг. прошлого века в Калмыкии и Астраханской обл. из-за распашки песчаных земель и неумеренного выпаса площадь подвижных песков превысила 350 тыс. га (Шинкаренко, 2019). Реализация принятой в конце 1980-х гг. Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Чёрных земель и Кизлярских пастбищ, снижение поголовья домашнего скота на рубеже XX и XXI вв. и благоприятные гидротермические условия этого периода позволили стабилизировать ситуацию (Kulík et al., 2018, 2020). К 2020 г. поголовье домашнего скота в регионах с преобладанием отгонного животноводства (Астраханская обл., республики Калмыкия и Дагестан) практически достигло величины начала 90-х гг. прошлого века, что привело к деградации растительного покрова пастбищ (Национальный..., 2019; Шинкаренко, 2019). Сильнейшая засуха 2020 г. (Титкова, Золотокрылин, 2022), чрезмерные пастбищные нагрузки привели к активизации эоловых процессов и катастрофическим пыльным бурям, в результате которых осе-

нию 2020 г. площадь открытых песков только в Северо-Западном Прикаспии достигла почти 1,5 млн га (Шинкаренко, Барталев, 2020а; Шинкаренко и др., 2020). В дальнейшем благодаря влажному 2021 г. массивы открытых песков начали самовосстанавливаться (Шинкаренко, Барталев, 2021), хотя из-за роста поголовья и засухи риск усиления опустынивания сохраняется. По этим причинам крайне важно проводить мониторинг состояния пастбищных земель засушливой зоны России и сопредельных территорий и своевременно регулировать антропогенное воздействие с учётом влияния климатических изменений.

Опустынивание ландшафтов аридной зоны рассматривается как результат одностороннего действия комплекса природных (аридизация и засухи) и антропогенных (распашка, выпас скота, ландшафтные пожары) факторов. Численность крупных диких животных — потребителей растительной массы пастбищ в последние десятилетия многократно сократилась, поэтому не может рассматриваться как существенный фактор опустынивания, тем не менее отдельные локальные всплески численности саранчовых могут существенно влиять на запас наземной фитомассы (Karimova et al., 2021). Воздействие природных и антропогенных факторов на состояние пастбищных ландшафтов достаточно сложно анализировать по отдельности (Золотокрылин, Виноградова, 2007; Zolotokrylin et al., 2018). Существующие исследования многолетней динамики состояния пастбищ по данным дистанционного зондирования часто не разделяют пахотные и пастбищные земли (например, (Спивак и др., 2011; Тельнова, 2017)) либо не учитывают выпас как фактор динамики состояния растительного покрова (Zhang et al., 2018), в то время как динамика состояния естественных пастбищ под влиянием выпаса существенно отличается от пашни как в сезонном, так и в многолетнем аспектах. Наземные исследования, как правило, имеют либо недостаточную продолжительность, либо ограничены только отдельными тестовыми участками или особо охраняемыми природными территориями (например, (Бананова, Лазарева, 2014; Власенко и др., 2019; Есмагулова, Ткаченко, 2016; Кулик и др., 2016; Лазарева и др., 2017; Лобойко и др., 2017; Рулев и др., 2016; Рябинина и др., 2018; Шинкаренко, 2015; Dedova et al., 2020)). Применение современных методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса лишено указанных выше недостатков, присущих наземным методам (Барталев и др., 2016; Брейдо и др., 1989; Ерошенко и др., 2018; Li et al., 2013). Многочисленные исследования трендов состояния растительности по данным ДЗЗ либо не учитывают структуру землепользования или пастбищные нагрузки, либо не полностью охватывают территорию Северного Прикаспия (например, (Золотокрылин, Виноградова, 2007; Тельнова, 2017; Chen et al., 2020; Hu et al., 2020; Li et al., 2013; Liang et al., 2017; Spivak et al., 2010; Zhang et al., 2018)).

Цель данного исследования заключается в определении закономерностей многолетней динамики состояния пастбищных ландшафтов засушливой зоны России и Западного Казахстана. Для этого решались следующие задачи: определение изменений значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index) пастбищных ландшафтов за 2001–2021 гг. и выявление его связей с основными факторами динамики состояния растительности (увлажнение, температура и поголовье скота).

Материалы и методы

Объект исследований — аридные пастбищные ландшафты европейской части России и сопредельных территорий Казахстана. Природные условия этой территории были описаны в ряде предыдущих публикаций (Шинкаренко, Барталев, 2020б; Шинкаренко и др., 2021), поэтому в данной работе не приводятся. Включение территории Казахстана в настоящее исследование необходимо для расширения возможностей анализа динамики ландшафтов-аналогов в иных условиях антропогенного воздействия и расширения выборки, поскольку значительная часть пастбищ Северного Прикаспия расположена в этой стране.

Статистика по поголовью скота доступна только в разрезе административно-территориальных единиц, по этой причине границы района исследований ограничены административными границами регионов, на территории которых расположена семиаридная и сухая

субгумидная зоны по (Золотокрылин и др., 2020). Это Астраханская, Волгоградская, Оренбургская, Ростовская, Саратовская области, Ставропольский край, республики Калмыкия, Дагестан и Чечня в России и Актюбинская, Атырауская, Западно-Казахстанская и Мангистауская области Казахстана.

Исследование основано на использовании композитных изображений со значениями средних и максимальных NDVI за вегетационный период с апреля по октябрь согласно работе (Шинкаренко, Барталев, 2020б) по данным MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) за 2001–2021 гг. (гранулы h20v03, h21v03, h20v04, h21v04). Данные получены с помощью сервиса «Beta-Science» (Loupian et al., 2022). Пастбищные земли выделялись на основе продукта типов земного покрова CCI Land Cover разрешения 250 м за период 2001–2020 гг. (<https://www.esa-landcover-cci.org/>). Электронная карта пастбищ, включающая классы grassland, shrubland, bareland, sparse vegetation, использовалась в качестве маски для анализа данных NDVI. Выбор источника данных о типах земного покрова обусловлен сопоставимым пространственным разрешением с использованными данными MODIS NDVI, ежегодным обновлением и глобальным охватом. Метеоданные приводятся согласно продукту CRU TS 4.05 — глобальному набору данных разрешения 0,5° (Harris et al., 2020) с месячными суммами осадков и среднемесячной температурой. Преимущество этого климатического набора состоит в пространственной однородности, которой лишены данные по отдельным метеостанциям. Были рассчитаны значения сумм осадков за календарный и гидрологический (ноябрь — октябрь) годы, а также средние и максимальные значения температуры за год или за вегетационный сезон (март — октябрь).

Для анализа многолетней изменчивости состояния растительности использовался индекс IVCI (*англ.* Integral Vegetation Condition Index — интегральный индекс условий вегетации), который является аналогом индекса VCI (Liu, Kogan, 1996) с заменой сезонных значений одного вегетационного сезона на годовые:

$$IVCI_i = (NDVI_i - NDVI_{\min}) / (NDVI_{\max} - NDVI_{\min}),$$

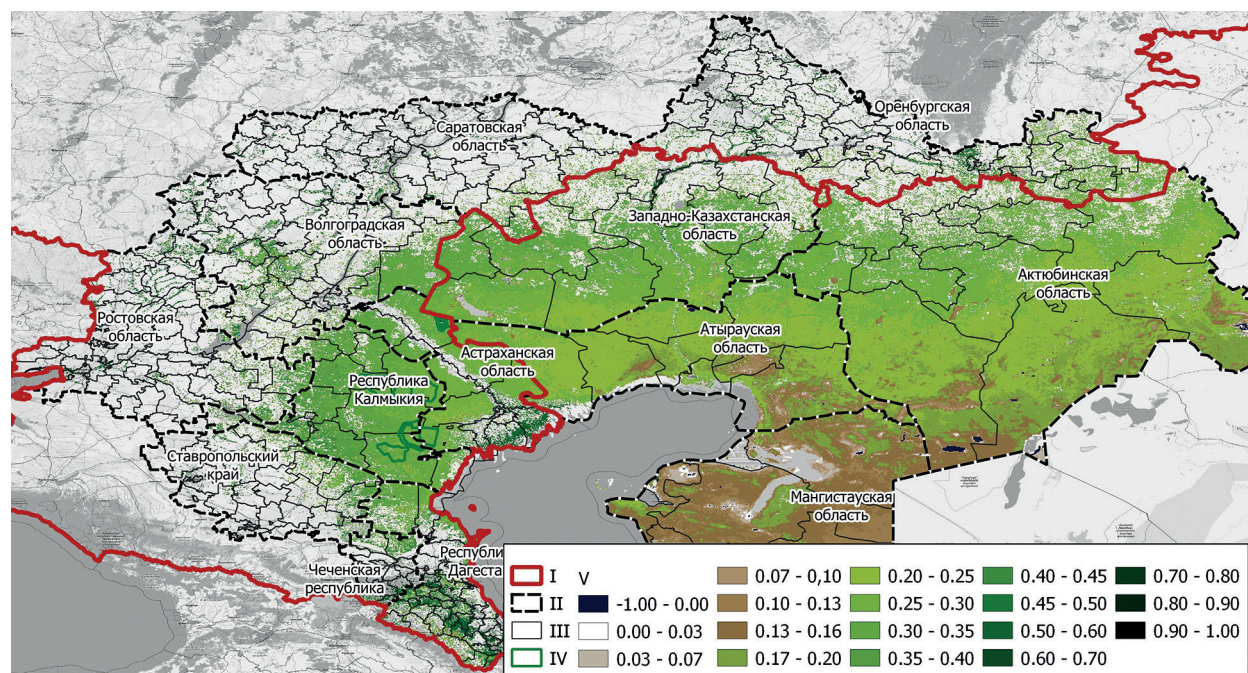
где $NDVI_i$ — значение NDVI в текущем году; $NDVI_{\min}$, $NDVI_{\max}$ — минимальное и максимальное значения за весь период исследований.

Традиционно VCI используется для оценки влияния сезонных погодных условий на состояние растительности. Для анализа межгодовой изменчивости применяют индекс IVCI, в котором вместо значений NDVI на текущие даты используют годовые суммы NDVI, их многолетние максимумы и минимумы (Spivak et al., 2010). Значения IVCI до 0,3 свидетельствуют о стрессовом состоянии растительности, от 0,3 до 0,7 — об удовлетворительном, близком к среднему многолетнему, а значения более 0,7 — о хорошем состоянии при благоприятных погодных условиях (Liu, Kogan, 1996).

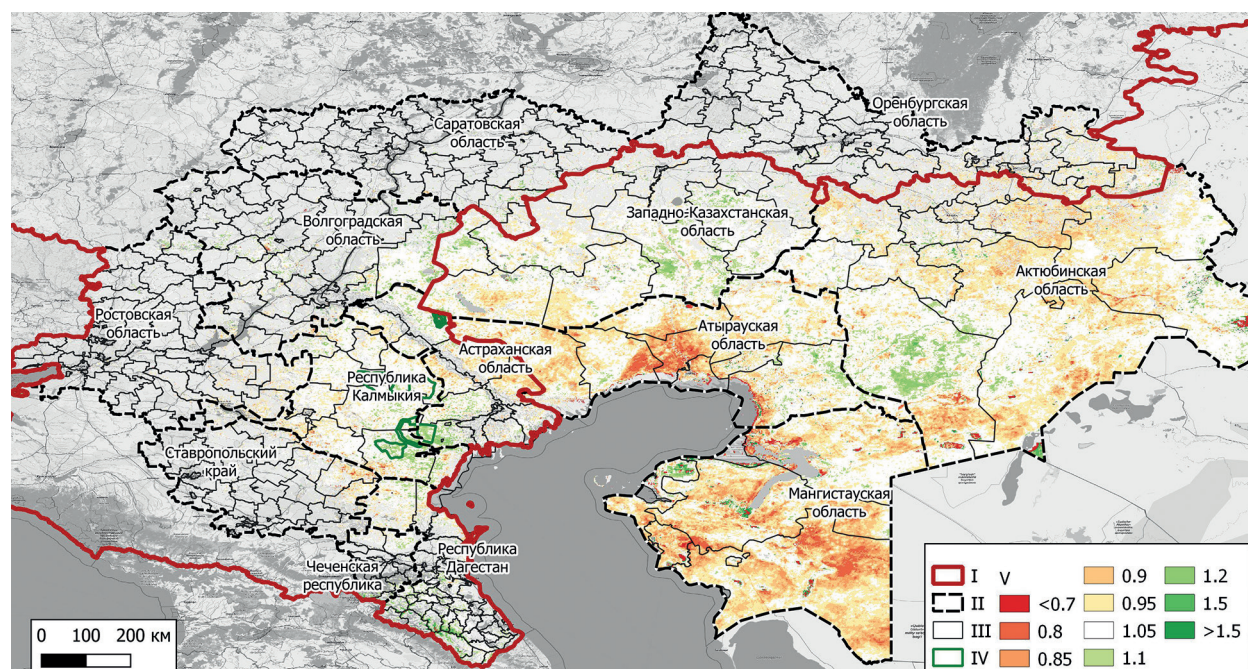
Расчёт значений для регионов и муниципальных образований осуществлялся с использованием функции «зональная статистика» QGIS (*англ.* Quantum Geographic Information Systems) для определения средних значений NDVI, IVCI, осадков и температуры внутри полигонов. Данные о поголовье скота приводятся согласно базе данных показателей муниципальных образований за 2007–2020 гг. (www.gks.ru/dbscripts/munst/munst.htm), данным Федеральной службы государственной статистики Российской Федерации (rosstat.gov.ru/folder/210/document/13204) и Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам Республики Казахстан (stat.gov.kz/region/list) за 2001–2020 гг. Доступность данных о поголовье в разрезе единиц административно-территориального деления обусловила использование границ регионов и муниципальных районов без учёта их ландшафтной или геоботанической однородности. Поголовье скота приводилось к показателю условных голов овец согласно имеющимся рекомендациям (О нормах..., 2006). Картографический слой административных границ получен по данным веб-картографического проекта OpenStreetMap (data.nextgis.com). Картографические материалы представлены в системе координат WGS84 (*англ.* World Geodetic System, всемирная система геодезических параметров Земли) (EPSG:4326). Значимость трендов определялась по тесту Манна — Кендалла, коэффициентов корреляции — по критерию Стьюдента.

Результаты и обсуждение

Территория исследований имеет площадь 143,1 млн га и включает 85,3 млн га пастбищ. Западные и северные районы преимущественно сельскохозяйственные, пастбищные земли здесь сохранились только на песках, в долинах рек, балках и других землях, непригодных для распашки. Прикаспийская низменность, наоборот, представлена почти исключительно пастбищными землями.



a



б

Рис. 1. Среднемноголетние значения NDVI (а); отношение среднемноголетних NDVI за 2011–2021 гг. к 2001–2010 гг. (б). I — государственная граница РФ; II — границы регионов; III — границы районов; IV — ООПТ; V — значения NDVI (а), отношение среднемноголетних NDVI за 2011–2020 гг. к 2001–2010 гг. (б)

Продуктивность растительности пастбищ исследуемого региона снижается с севера на юг согласно широтно-зональным закономерностям по мере роста температуры, испаряемости и снижения количества выпадающих осадков (рис. 1а (см. с. 111), 2а). Наиболее продуктивные пастбища расположены в северных и западных районах, что связано как с большими суммами атмосферных осадков, так и с фактом расположения пастбищ в долинах рек и балках, аккумулирующих поверхностный сток. Преобладают же по площади малопродуктивные пастбища со среднемноголетними значениями NDVI до 0,3.

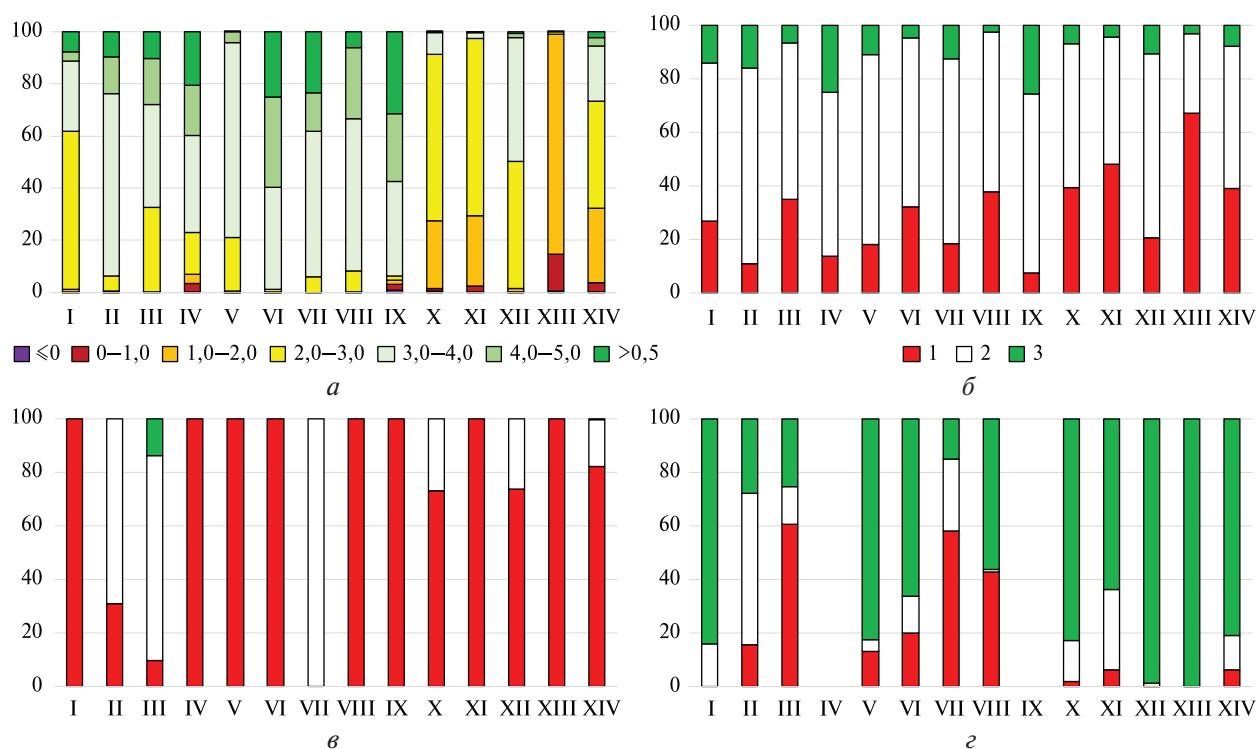


Рис. 2. Соотношение площади пастбищ с различными среднемноголетними значениями NDVI (а), изменением NDVI (б), изменением суммы осадков (в) и изменением пастбищных нагрузок (г) в 2011–2021 гг. по сравнению с 2001–2010 гг.: I — Астраханская обл., II — Волгоградская обл., III — Оренбургская обл., IV — Дагестан, V — Калмыкия, VI — Ростовская обл., VII — Саратовская обл., VIII — Ставропольский край, IX — Чечня, X — Актыбинская обл., XI — Атырауская обл., XII — Западно-Казахстанская обл., XIII — Мангистаская обл., XIV — вся территория; 1 — снижение значений, 2 — без изменений, 3 — рост значений

За последние 10 лет отмечено снижение среднегодовых NDVI на 40 % площади пастбищ исследуемой территории по сравнению с периодом 2001–2010 гг. (рис. 1б, 2). Произошло это на фоне повсеместного снижения годовых сумм осадков и роста среднегодовой температуры, не затронувших только северные регионы: Оренбургскую, Саратовскую и частично Волгоградскую области. В этих же регионах уменьшились или практически не изменились пастбищные нагрузки, в то время как на 80 % площади исследуемых пастбищ они увеличились. Таким образом, можно констатировать, что снижение многолетних значений NDVI в 2011–2020 гг. по сравнению с периодом 2001–2010 гг. происходило на фоне уменьшения годовых сумм осадков (как за календарный, так и за гидрологический год), роста среднегодовой температуры и пастбищных нагрузок (см. рис. 2). Увеличение NDVI характерно также для особо охраняемых природных территорий (ООПТ) и горных пастбищ. Статистически значимых трендов NDVI пастбищ за период 2001–2020 гг. в разрезе регионов не выявлено. Аналогичная ситуация характерна для всей Центральной Азии (Zhang et al., 2018), а также для пастбищ Монголии (Zolotokrylin et al., 2018). Подобные тенденции климатических изменений и соответствующая реакция на них растительности были характерны и для периода 1990–2000 гг. (Тельнова, 2017). В период до середины 1990-х гг. отмечался значимый рост NDVI при улучшении условий увлажнения (Liang et al., 2017).

Практически на всей территории (98 %) отмечена положительная корреляция средних и максимальных за вегетационный сезон NDVI с суммами осадков в период 2001–2020 гг. (рис. 3а, б, см. с. 114). При этом значения коэффициентов корреляции выше для суммы осадков за гидрологический год, что свидетельствует о большой роли увлажнения в осенне-зимний период. Для горных пастбищ Северного Кавказа характерна положительная связь NDVI с температурой, эти территории нельзя считать зоной недостаточного увлажнения: из-за высотной поясности здесь нет дефицита влаги. Наиболее тесная отрицательная связь NDVI аридных пастбищ выявлена с максимальной температурой за вегетационный сезон, среднегодовой температурой либо с пастбищными нагрузками (см. рис. 3б). При этом площадь пастбищ, где отмечена наиболее сильная отрицательная связь среднегодовых NDVI с температурой, составляет 44,5 %, а с пастбищными нагрузками — 55 %. Для максимальных за вегетационный сезон NDVI это отношение составляет 37 на 63 % соответственно. Положительное влияние роста увлажнения на продуктивность пастбищ отмечают многие исследователи (Chen et al., 2020).

В отличие от положительной связи для отрицательной характерно пространственное различие между среднегодовыми и максимальными годовыми значениями NDVI, наиболее выраженное в западной части исследуемой территории (рис. 3в, г). Например, в Калмыкии отсутствуют районы, где наибольшее отрицательное влияние на максимальные NDVI оказывают пастбищные нагрузки, в то время как на 25 % пастбищ этого региона отмечена отрицательная связь нагрузок и средних NDVI за вегетационный сезон. Выпас скота в данном случае в меньшей степени влияет на максимальное значение NDVI за сезон, обеспеченное кратковременным развитием эфемерной растительности ранней весной или поздней осенью, что характерно для деградированных пастбищ в условиях превышения пастбищной ёмкости. В Актюбинской, Западно-Казахстанской, Волгоградской и Саратовской областях, наоборот, шире влияние на максимальные NDVI пастбищных нагрузок, чем температуры (по сравнению со средними за вегетационный сезон). В лучших условиях увлажнения температура оказывает меньшее влияние на продуктивность растительности, чем пастбищные нагрузки. Проведённые ранее исследования сезонной динамики NDVI пастбищ региона это подтверждают (Шинкаренко, Барталев, 2020б).

Исследование, выполненное в долине р. Или, показало, что примерно на 29 % пастбищ отмечены разнонаправленные тренды средних и максимальных за вегетационный сезон значений NDVI (Yan et al., 2022). Это связано с насыщением максимальных NDVI в период развития наибольшей фитомассы в экосистемах долины р. Или. Для аридных ландшафтов характерны более низкие показатели продуктивности, по этой причине здесь насыщение NDVI не отмечено и тренды как максимальных, так и средних за вегетационный сезон NDVI однонаправленны (рис. 3д, е). Стоит отметить, что на средние за вегетационный сезон значения NDVI серьёзное влияние могут оказывать степные пожары, характерные для данной территории (Шинкаренко и др., 2021, 2022). Ландшафтные пожары на пастбищах интенсифицируются в период улучшения гидротермических условий и снижения пастбищных нагрузок, что способствует накоплению растительной ветоши (Шинкаренко и др., 2022; Dubinin et al., 2011). По этой причине средние за вегетационный сезон значения NDVI в период благоприятных условий увлажнения могут быть занижены из-за уничтожения растительного покрова пожарами. Для определения роли пирогенного фактора в динамике NDVI требуется проведение дополнительных исследований.

На территории примерно в 20 млн га (24 % всех пастбищ, рис. 4д, см. с. 115) отмечены значимые отрицательные тренды средних NDVI за вегетационный сезон (в том числе 7,7 млн га при $p < 0,1$ и 12,9 млн га при $p < 0,05$) и на 13,5 млн га — максимальных годовых NDVI (16 % пастбищ, из них 7,3 млн га при $p < 0,1$ и 6,3 млн га при $p < 0,05$). Выше было показано, что максимальный годовой NDVI меньше зависит от пастбищных нагрузок, поэтому отрицательная динамика максимальных NDVI характерна для меньшей площади по сравнению со средними за вегетационный сезон значениями индекса. На территории России значимыми отрицательными трендами NDVI характеризуются Оренбургская, Саратовская и Ростовская области, в Казахстане — Актюбинская, Атырауская и Западно-Казахстанская области.

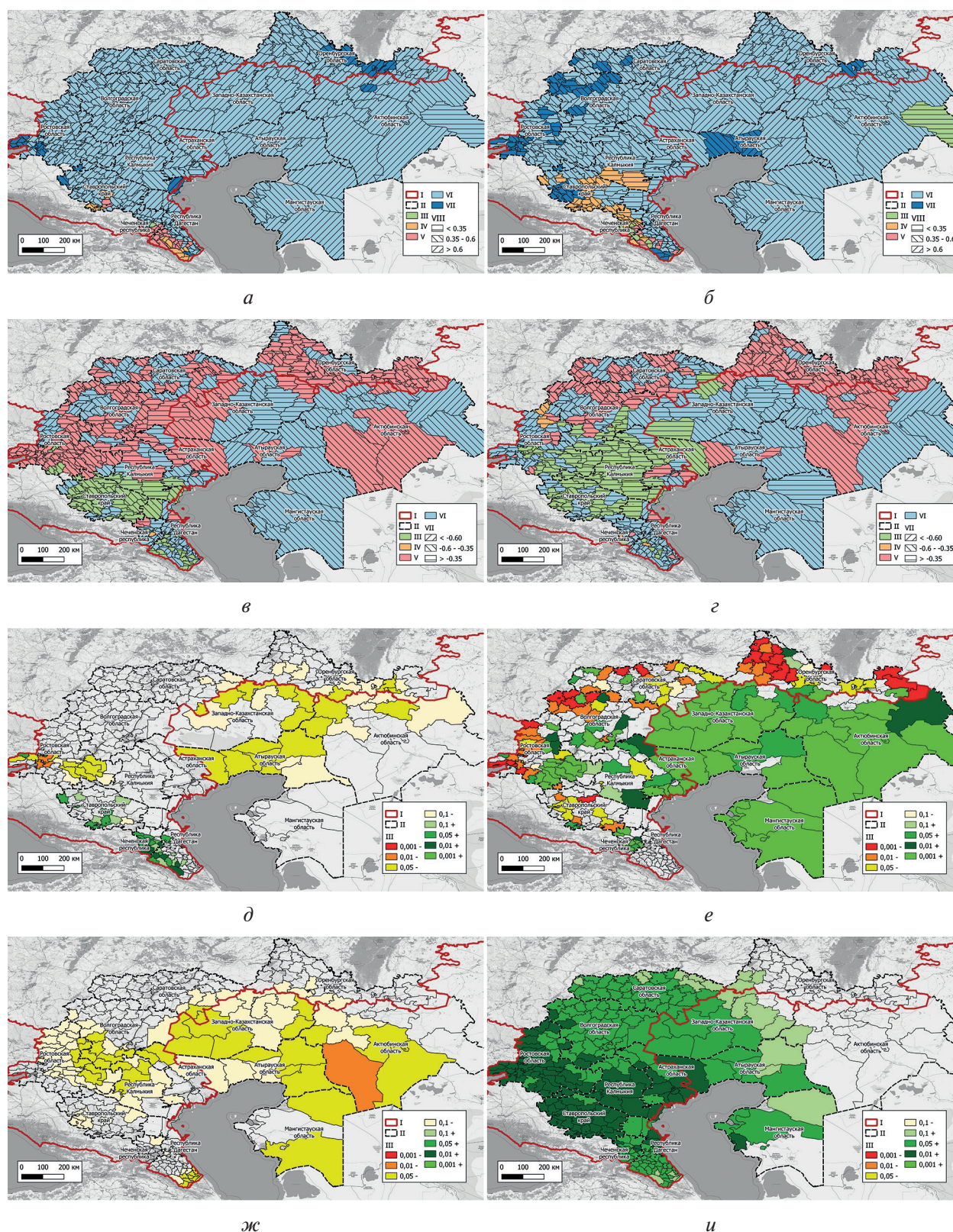


Рис. 3. Показатели наиболее сильной положительной корреляционной связи (а, б) и отрицательной корреляционной связи (в, г) со средними и максимальными за вегетационный сезон NDVI за 2001–2021 гг. Уровень значимости и знак угловых коэффициентов трендов по тесту Манна–Кендалла: д — среднегодовые или максимальные NDVI; е — поголовье скота; ж — сумма осадков за гидрологический год; и — температура за вегетационный сезон. I — государственная граница РФ; II — границы регионов; III — средняя годовая температура; IV — средняя температура за вегетационный сезон; V — максимальная годовая температура; VI — сумма осадков за гидрологический год (а), пастбищные нагрузки (б); VII — сумма осадков за календарный год; VIII — коэффициенты корреляции

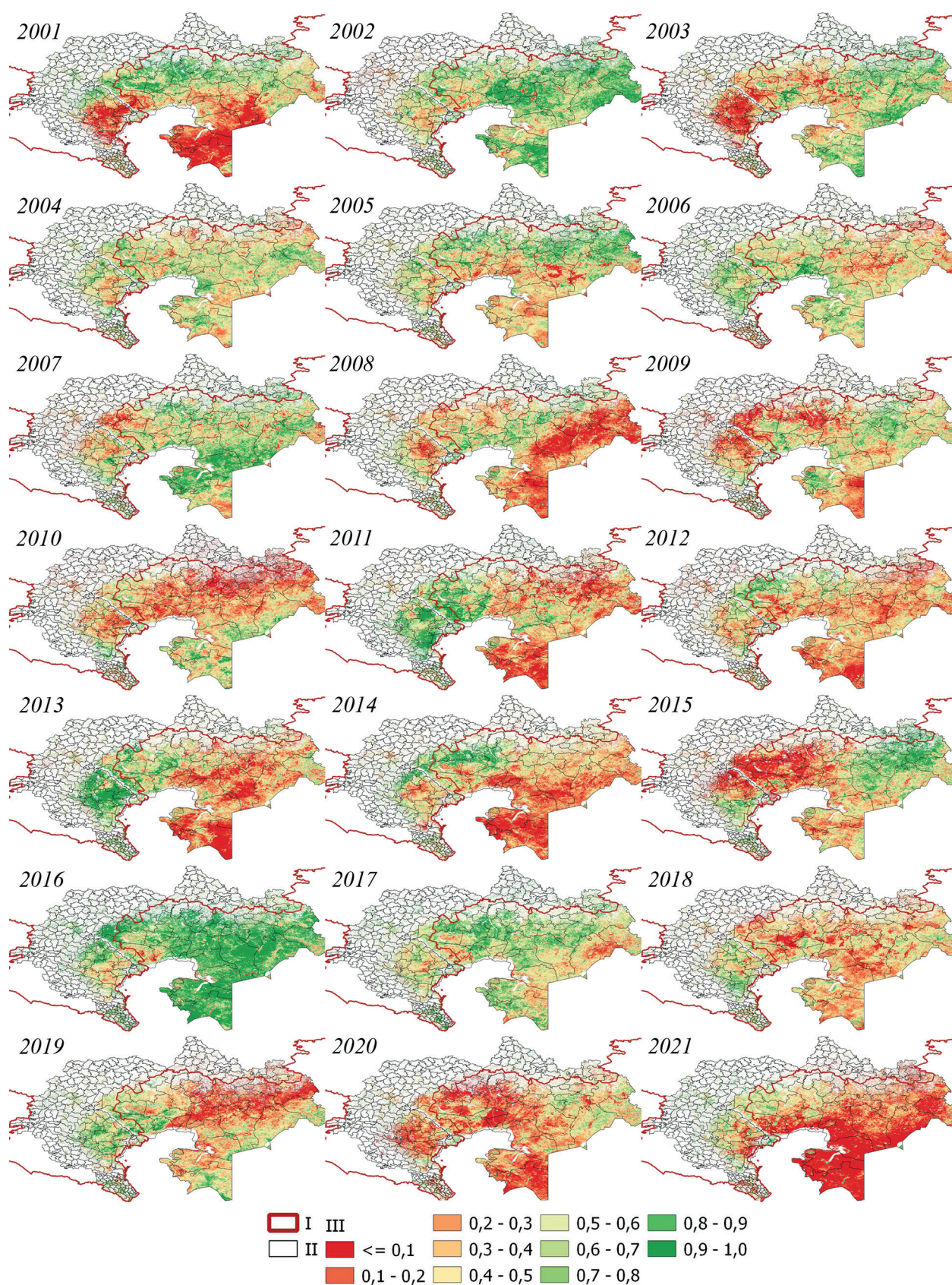


Рис. 4. Динамика IVCI максимальных годовых значений NDVI:
I — государственная граница РФ; II — границы районов; III — значения IVCI

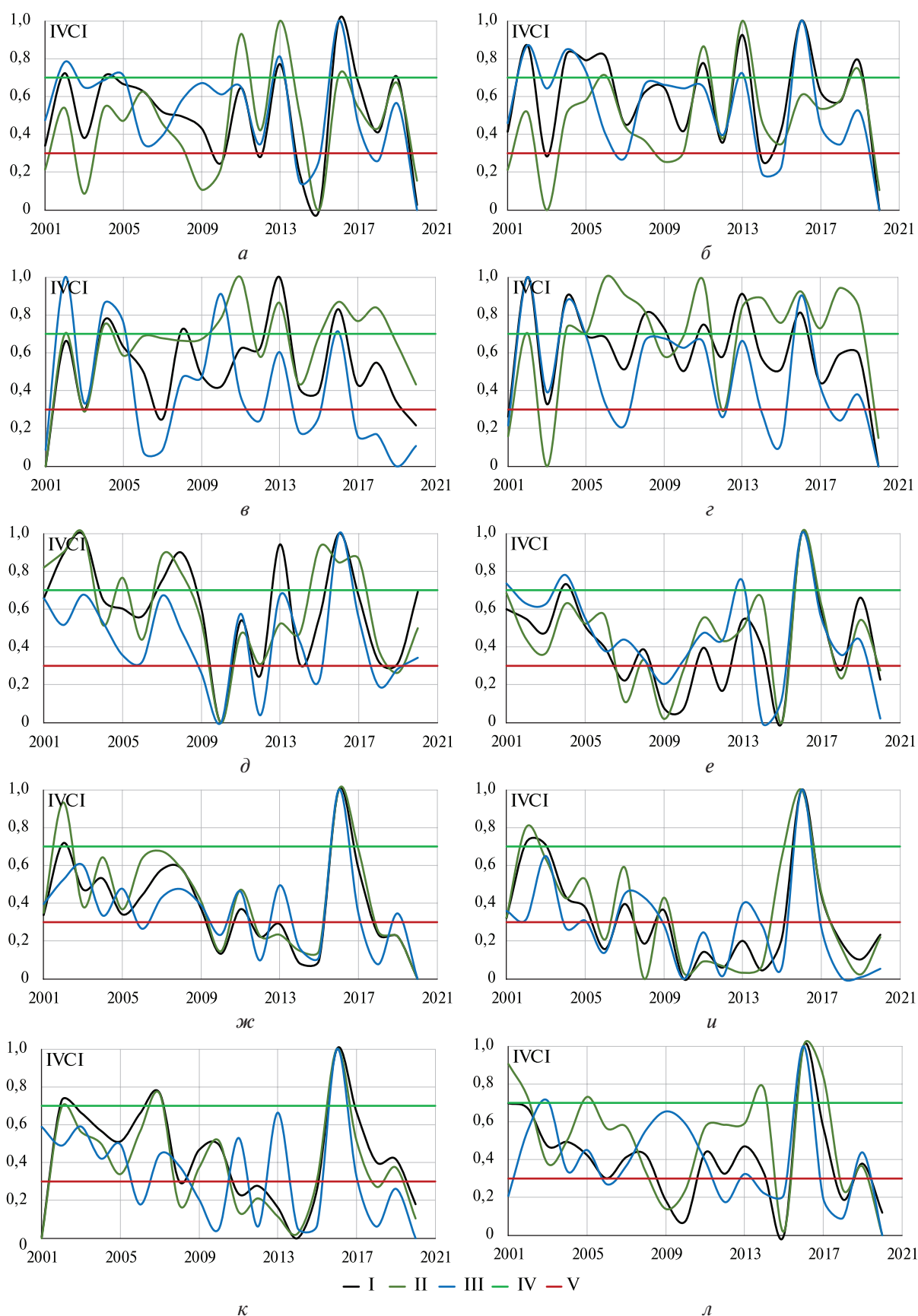


Рис. 5. Многолетняя динамика IVCI средних (I) и максимальных (II) NDVI, суммы осадков за гидрологический год (III), IV — IVCI = 0,7, V — IVCI = 0,3; а — Астраханская обл., б — Калмыкия, в — Дагестан, з — Ставропольский край, д — Оренбургская обл., е — Волгоградская обл., ж — Атырауская обл., и — Актыубинская обл., к — Западно-Казахстанская обл., л — Мангистауская обл.

Для всей территории исследований, кроме Актыбинской обл., характерно снижение сумм осадков как за календарный, так и за гидрологический год на фоне роста максимальной среднемесячной температуры. На 72 % пастбищ отмечены значимые отрицательные тренды сумм осадков, на 59 % пастбищ — положительные значимые тренды максимальной среднемесячной температуры. Значимый рост пастбищных нагрузок выявлен на 83 % пастбищ региона исследований. Особенно неблагоприятная обстановка складывается в Атырауской и Мангыстауской областях Казахстана: на всех пастбищах отмечен значимый рост нагрузок и температуры на фоне снижения уровня увлажнения.

Динамика значений IVCI, рассчитанных как для средних за вегетационный сезон NDVI, так и для максимальных годовых величин NDVI, соответствует выявленным тенденциям климатических изменений и пастбищных нагрузок (см. *рис. 4, 5*, см. с. 116). Для регионов Казахстана частота неблагоприятных лет со значениями IVCI менее 0,3 составляет от 25 % в Мангыстауской обл. до 55 % — в Актыбинской. В российских регионах этот показатель значительно ниже: от 10 % в Ставропольском крае до 25 % в Астраханской обл. и 40 % — в Ростовской. В Астраханской обл., Дагестане, Калмыкии и Западно-Казахстанской обл. пастбищные нагрузки за последние 10 лет существенно превышали значения предыдущего десятилетия, что привело к резкому росту площадей деградированных пастбищ (Титкова, Золотокрылин, 2022; Шинкаренко, Барталев, 2020а, 2021).

По данным работы (Hu et al., 2020), для Западного Казахстана в большей степени характерно влияние климатических факторов, чем антропогенных, поскольку тренды температуры и сумм осадков значимые. Тем не менее наличие значимых трендов пастбищных нагрузок на 98 % пастбищ данной территории свидетельствует о значительной роли выпаса в динамике состояния растительного покрова. Также важен фактор пространственной неравномерности распределения пастбищных нагрузок, поскольку поголовье приурочено к населённым пунктам и фермам. Соответственно, имеются участки с сильным локальным превышением пастбищных нагрузок, в то же время где-то выпас может отсутствовать (Hankerson et al., 2019). Для более точных результатов оценки влияния выпаса на динамику NDVI необходимо отделить используемые пастбища, для чего требуются дополнительные исследования.

Заключение

В результате исследования для пастбищ зоны недостаточного увлажнения России и сопредельных регионов Западного Казахстана установлены закономерности многолетней динамики NDVI под влиянием климатических факторов и пастбищных нагрузок. Установлено снижение NDVI на 40 % площади пастбищ исследуемой территории в 2011–2020 гг. по сравнению с 2001–2010 гг., в том числе на 24 % площади пастбищ отмечены значимые отрицательные тренды вегетационного индекса.

Наиболее существенным фактором динамики состояния растительности представляется снижение суммы осадков за гидрологический и календарный годы, рост среднегодовой и максимальной среднемесячной температуры вегетационного сезона, увеличение пастбищных нагрузок. На 72 % пастбищ отмечены значимые отрицательные тренды суммы осадков, на 59 % пастбищ — положительные значимые тренды максимальной среднемесячной температуры. Значимый рост пастбищных нагрузок выявлен на 83 % пастбищ региона исследований.

Анализ многолетнего ряда индекса условий вегетации (IVCI) показал высокую повторяемость неблагоприятных лет на территории Казахстана (25–55 % площади пастбищ) и среднюю (10–40 %) — в России, что соответствует тенденциям изменений гидротермических условий и пастбищных нагрузок. В Западном Казахстане на всех пастбищах отмечены значимые тренды, направленные на снижение увлажнения, рост температуры и поголовья скота, приведшие к устойчивому снижению продуктивности на 60 % территории.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 19-35-60007 с использованием сервиса «Bega-Science» (Lourian et al., 2022) и инфраструктуры ЦКП «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015).

Литература

1. Бананова В. А., Лазарева В. Г. Тенденции изменения ботанического разнообразия под влиянием опустынивания в республике Калмыкия // Аридные экосистемы. 2014. Т. 20. № 2(59). С. 87–96.
2. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Брейдо М. Д., Жирин В. М., Барталев С. А., Бахтинова Е. В. Определение некоторых характеристик кормовых ресурсов пустынных пастбищ по аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 3. С. 66–76.
4. Власенко М. В., Кулик А. К., Салугин А. Н. Оценка экологического состояния и потерь продуктивности аридных пастбищных экосистем Сарпинской низменности // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25. № 4(81). С. 71–81.
5. Ерошенко Ф. В., Барталев С. А., Лапенко Н. Г., Самофал Е. В., Сторчак И. Г. Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66.
6. Есмагулова Б. Ж., Ткаченко Н. А. Лесомелиоративное картографирование пастбищ на Урдинских песках (в пределах Бокейординского района Западно-Казахстанской области) // Изв. Нижневолжского агроуниверситет. комплекса: наука и высшее проф. образование. 2016. № 2(42). С. 127–134.
7. Золотокрылин А. Н., Виноградова В. В. Соотношение между климатическим и антропогенным факторами восстановления растительного покрова юго-востока европейской России // Аридные экосистемы. 2007. Т. 13. № 33–34. С. 7–16.
8. Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б. Аридизация засушливых земель европейской части России и связь с засухами // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2020. Т. 84. № 2. С. 207–217. DOI: 10.31857/S258755662002017X.
9. Кулик К. Н., Есмагулова Б. Ж., Кошелева О. Ю., Мушаева К. Б., Шинкаренко С. С. Изменение фитоценозов волго-уральского междуречья под влиянием пастбищных нагрузок // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер. География. Геоэкология. 2016. № 4. С. 25–32.
10. Лазарева В. Г., Бананова В. А., Нгуен В. З. Картирование растительности Сарпинской низменности в пределах Республики Калмыкия методами дистанционного зондирования и ГИС // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 178–183.
11. Лобойко В. Ф., Есмагулова Б. Ж., Ткаченко Н. А. Фитоэкологическая оценка и лесомелиоративное картографирование песчаного массива «Кандагаш» Западно-Казахстанской области республики Казахстан // Изв. Нижневолжского агроуниверситет. комплекса: наука и высшее проф. образование. 2017. № 2(46). С. 211–218.
12. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычуглов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
13. Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)» / под ред. Р. С.-Х. Эдельгериева. М.: ООО «Издательство МБА», 2019. Т. 2. 476 с.
14. О нормах нагрузки скота на пастбища на территории Республики Калмыкия: Постановление Правительства Республики Калмыкия от 27 апреля 2006 года № 158 (ред. от 31.03.2014 № 116). <https://docs.cntd.ru/document/460200682>.
15. Рулев А. С., Канищев С. Н., Шинкаренко С. С. Анализ сезонной динамики NDVI естественной растительности Заволжья Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 113–123. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-20-113-123.
16. Рябинина Н. О., Канищев С. Н., Шинкаренко С. С. Современное состояние и динамика степных геосистем юго-востока Русской равнины (на примере природных парков Волгоградской области) // Юг России: экология, и развитие. 2018. № 1. С. 116–127. DOI: 10.18470/1992-1098-2018-1-116-127.
17. Спивак Л. Ф., Витковская И. С., Терехов А. Г., Батырбаева М. Ж. Мониторинг долговременных изменений растительного покрова аридных и полуаридных зон Казахстана с использованием данных дистанционного зондирования // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 163–169.
18. 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.

19. Титкова 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.
20. Шинкаренко С. С. Оценка влияния выпаса на ландшафты Приэльтона // Научное обозрение. 2015. № 14. С. 10–15.
21. 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.
22. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. (2020а) 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.
23. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. (2020б) Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 179–194. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
24. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Оценка площади опустынивания на юге европейской части России в 2021 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 291–297. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-291-297.
25. Шинкаренко С. С., Ткаченко Н. А., Барталев С. А., Юферев В. Г., Кулик К. Н. Пыльные бури на юге европейской части России в сентябре–октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 5. С. 291–296. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-5-291-296.
26. Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н., Комарова И. А. Динамика горимости аридных ландшафтов России и сопредельных территорий по данным детектирования активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 149–164. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.
27. Шинкаренко С. С., Дорошенко В. В., Берденгалиева А. Н. Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2022. Т. 86. № 1. С. 122–133. DOI: 10.31857/S2587556622010113.
28. Chen T., Tang G., Yuan Y., Guo H., Xu Z., Jiang G., Chen X. Unraveling the relative impacts of climate change and human activities on grassland productivity in Central Asia over last three decades // Science of the Total Environment. 2020. V. 473. Art. No. 160469. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140649.
29. Dedova E. B., Goldvarg B. A., Tsagan-Mandzhiev N. L. Land Degradation of the Republic of Kalmykia: Problems and Reclamation Methods // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. No. 2. P. 140–147. DOI: 10.1134/S2079096120020043.
30. Dubinin M., Lushekina A., Radloff V. C. Climate, Livestock, and Vegetation: What Drives Fire Increase in the Arid Ecosystems of Southern Russia? // Ecosystems. 2011. V. 14. P. 547–562. DOI: 10.1007/s10021-011-9427-9.
31. Hankerson B. R., Schierhorn F., Prischchepov A. V., Changxing D., Eisfelder C., Muller D. Modeling the spatial distribution of grazing intensity in Kazakhstan // PLoS One. 2019. V. 14. No. 1. P. e0210051. DOI: 10.1371/journal.pone.0210051.
32. Harris I., Osborn T. J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset // Scientific Data. 2020. No. 7. Art. No. 109. DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
33. Hu Y., Han Y., Zhang Y. Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan // J. Arid Environments. 2020. V. 180. Art. No. 104206. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2020.104203.
34. Karimova T. Y., Lushchekina A. A., Neronov V. M. Saiga Populations of Russia and Kazakhstan: Current Status and Retrospective Analysis of Some Biological Parameters // Arid Ecosystems. 2021. V. 11. No. 2. P. 164–172. DOI: 10.1134/S2079096121020074.
35. Kulik K. N., Petrov V. I., Rulev A. S., Kosheleva O. Y., Shinkarenko S. S. On the 30th anniversary of the “General plan to combat desertification of Black lands and Kizlyar pastures” // Arid Ecosystems. 2018. V. 8. No. 1. P. 5–20. DOI: 10.1134/S2079096118010067.
36. Kulik K. N., Petrov V. I., Yuferev V. G., Tkachenko N. A., Shinkarenko S. S. Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. No. 2. P. 98–105. DOI: 10.1134/S2079096120020080.
37. Li Z., Huffman T., McConkey B., Townley-Smith L. Monitoring and modeling spatial and temporal patterns of grassland dynamics using time-series MODIS NDVI with climate and stocking data // Remote Sensing of Environment. 2013. V. 138. P. 232–244. DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.020.
38. Liang L., Wenpeng D., Huimin Y., Lin Z., Yu D. Spatio-Temporal Patterns of Vegetation Change in Kazakhstan from 1982 to 2015 // J. Resources and Ecology. 2017. V. 8. No. 4. P. 378–384. DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2017.04.009.
39. Liu W. T., Kogan F. N. Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. No. 14. P. 2761–2782. DOI: 10.1080/01431169608949106.

40. Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 1. Art. No. 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
41. Spivak L., Vitkovskaya I., Batyrbayeva M., Terekhov A. Detection of Desertification Zones Using Multiyear Remote Sensing Data // *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability*. Springer, 2010. P. 235–241.
42. Yan J., Zhang G., Ling H., Han F. Comparison of time-integrated NDVI and annual maximum NDVI for assessing grassland dynamics // *Ecological Indicators*. 2022. V. 136. Art. No. 108611. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108611.
43. Zhang G., Biradar C.M., Xiao X., Dong J., Zhou Y., Qin Y., Zhang Y., Liu F., Ding M., Thomas R. Exacerbated grassland degradation and desertification in Central Asia during 2000–2014 // *Ecological Applications*. 2018. V. 28. No. 2. P. 442–456. DOI: 10.5061/dryad.12bd9.
44. Zolotokrylin A.N., Titkova T.B., Bazha S.N., Syrtypova S.H.D. Trends in Livestock Numbers and Spectral Properties of the Pasture Surface: Case Study of the Middle Gobi Aimag of Mongolia // *Arid Ecosystems*. 2018. V. 8. No. 3. P. 153–160. DOI: 10.1134/S2079096118030095.

Long-term arid pasture landscapes NDVI dynamics in European Russia and adjacent territories

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: vnialmi@bk.ru

The article presents the results of the analysis of the long-term dynamics of the average and maximum NDVI values during the growing season for pastures in the southeast of European Russia and Western Kazakhstan. The research is based on the MODIS data for the period of 2001–2020. The current studies of landscape condition trends often do not differentiate between pastures and arable land and do not take into account pasture loads. Moreover, they are limited to the territories of individual countries, regions or test sites. The present research outlines a correlation analysis of the long-term NDVI series, including the total precipitation for hydrological and calendar years, the average annual air temperatures, the maximum air temperatures during the growing season, as well as pasture loads. We have established a significant positive correlation between the landscape condition and the amount of precipitation during the hydrological year on 98 % of the pasture area. The strongest negative impact of air temperatures and pasture loads is observed on 44.5 and 55 % of pastures, respectively. An area of 20 million ha (24 % of the studied pastures) is characterized by a significant negative trend in the average NDVI value for the growing season. 72 % of pastures are characterized by a negative trend in precipitation amount; 83% of pastures are characterized by a significant trend in the increase of pasture loads; and 59 % of pastures are characterized by a positive trend for an increase in maximum temperatures during the growing season. Thus, as a result of the research, the regularities of the long-term dynamics of the NDVI of arid pastures in Russia and adjacent territories have been established, and key factors for reducing their productivity have been identified. They include deterioration in moisture conditions, an increase in air temperature and pasture loads.

Keywords: pasture loads, remote sensing, MODIS, Northern Caspian, Western Kazakhstan

Accepted: 28.10.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-108-123

References

1. Bananova V.A., Lazareva V.G., Trends of changes in the botanical diversity under the influence of desertification in the republic of Kalmykia, *Arid Ecosystems*. 2014, Vol. 4, No. 2, pp. 119–126, DOI: 10.1134/S2079096114020024.

2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Land cover mapping over Russia using Earth observation data*, Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
3. Breido M. D., Zhirin V. M., Bartalev S. A., Bakhtinova E. V., Identification of forage resources features in desert grazing from aerospace data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1989, No. 3, pp. 66–76 (in Russian).
4. Vlasenko M. V., Kulik A. K., Salugin A. N., Evaluation of the Ecological Status and Loss of Productivity of Arid Pasture Ecosystems of the Sarpa Lowland, *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 9, No. 4, pp. 273–281, DOI: 10.1134/S2079096119040097.
5. Eroshenko F. V., Bartalev S. A., Lapenko N. G., Samofal E. V., Storchak I. G., Capabilities for range-lands state and degradation assessment using remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 53–66 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66.
6. Esmagulova B. Zh., Tkachenko N. A., Forest reclamation of grassland on Urda sands (within Bokey Orda district of West Kazakhstan region), *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2016, No. 2(42), pp. 127–134 (in Russian).
7. Zolotokrylin A. N., Vinogradova V. V., Relation between climatic and anthropogenic factors of re-vegetation in the south-east of European Russia, *Aridnye ekosistemy*, 2007, Vol. 14, No. 33–34, pp. 7–16 (in Russian).
8. Zolotokrylin A. N., Cherenkova E. A., Titkova T. B., Aridization of Drylands in the European Part of Russia: Secular Trends and Links to Droughts, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Seriya geograficheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 2, pp. 207–217 (in Russian), DOI: 10.31857/S258755662002017X.
9. Kulik K. N., Esmagulova B. Zh., Koshelova O. Yu., Mushaeva K. B., Shinkarenko S. S., Phytocenoses change of the area between Volga and Ural under the influence of grazing, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. Geografiya. Geoekologiya*, 2016, No. 4, pp. 25–32 (in Russian).
10. Lazareva V. G., Bananova V. A., Nguen V. Z., Mapping the vegetation of the plain of the Sarpinsky lowland (Kalmykia) using remote sensing and GIS, *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2017, No. 12, pp. 178–183 (in Russian).
11. Loboiko V. F., Esmagulova B. Zh., Tkachenko N. A., Phytoecological assessment and forest reclamative mapping of sand massive “Kandagash”, the Western Kazakhstan region the Republic of Kazakhstan, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee professional'noe obrazovanie*, 2017, No. 2(46), pp. 211–218 (in Russian).
12. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
13. *National report “Global Climate and Soil Cover of Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructure, Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry)”*, Moscow: OOO “Izdatel'stvo MBA”, 2019, Vol. 2, 476 p. (in Russian).
14. *O normakh nagruzki skota na pastbishchakh na territorii Respubliki Kalmykiya* (On the norms for the load of livestock on pastures in the territory of the Republic of Kalmykia), Government of the Republic of Kalmykia: Order No. 158, Date 27.04.2006 (as amended by Order No. 116, Date 31.03.2014) (in Russian), <https://docs.cntd.ru/document/460200682>.
15. Rulev A. S., Kanishchev S. N., Shinkarenko S. S., Analysis of NDVI seasonal dynamics of natural vegetation of Low Trans-Volga in Volgograd Region, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 113–123 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-20-113-123.
16. Ryabinina N. O., Kanishchev S. N., Shinkarenko S. S., The current state and dynamics of geosystems in the South-East of the Russian plain (by the example of the natural parks in Volgograd region), *Yug Rossii: ekologiya i razvitie*, 2018, No. 1, pp. 116–127 (in Russian), DOI: 10.18470/1992-1098-2018-1-116-127.
17. Spivak L., Vitkovskaya I., Terekhov A., Batorybayeva M., Monitoring of long-term changes of vegetation cover of arid and semi-arid zones of Kazakhstan with the use of remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 163–169 (in Russian).
18. 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 zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 6, pp. 97–107 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-6-97-107.
19. 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.
20. Shinkarenko S. S., Impact assessment of grazing on vicinity of Elton landscapes, *Nauchnoe obozrenie*, 2015, No. 14, pp. 10–15 (in Russian).

21. Shinkarenko S. S., Spatial-temporal dynamics of desertification in Black Lands, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 155–168 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-155-168.
22. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A. (2020a), 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.
23. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A. (2020b), NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes according to MODIS data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 179–194 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
24. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Assessment of desertification area in the south of the European part of Russia in 2021, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 291–297 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-291-297.
25. Shinkarenko S. S., Tkachenko N. A., Bartalev S. A., Yuferev V. G., Kulik K. N., Dust storms in the south of the European part of Russia in September – October 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 5, pp. 291–296 (in Russian), DOI: 10.1134/S2079096118010067.
26. Shinkarenko S. S., Doroshenko V. V., Berdengalieva A. N., Komarova I. A., Dynamics of arid landscapes burning of Russia and adjacent territories according to active fire data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 149–164 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-149-164.
27. Shinkarenko S. S., Doroshenko V. V., Berdengalieva A. N., Burned areas dynamics in zonal landscapes of the South-East of The European part of Russia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, Vol. 86, No. 1, pp. 122–133 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622010113.
28. Chen T., Tang G., Yuan Y., Guo H., Xu Z., Jiang G., Chen X., Unraveling the relative impacts of climate change and human activities on grassland productivity in Central Asia over last three decades, *Science of the Total Environment*, 2020, Vol. 473, p. 160469, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.140649.
29. Dedova E. B., Goldvarg B. A., Tsagan-Mandzhiev N. L., Land Degradation of the Republic of Kalmykia: Problems and Reclamation Methods, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, No. 2, pp. 140–147, DOI: 10.1134/S2079096120020043.
30. Dubinin M., Lushchikina A., Radeloff V. C., Climate, Livestock, and Vegetation: What Drives Fire Increase in the Arid Ecosystems of Southern Russia? *Ecosystems*, 2011, Vol. 14, pp. 547–562, DOI: 10.1007/s10021-011-9427-9.
31. Hankerson B. R., Schierhorn F., Prischchepov A. V., Changxing D., Eisfelder C., Muller D., Modeling the spatial distribution of grazing intensity in Kazakhstan, *PLoS One*, 2019, Vol. 14, No. 1, p. e0210051, DOI: 10.1371/journal.pone.0210051.
32. Harris I., Osborn T. J., Jones P., Lister D., Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset, *Scientific Data*, 2020, No. 7, Art. No. 109, DOI: 10.1038/s41597-020-0453-3.
33. Hu Y., Han Y., Zhang Y., Land desertification and its influencing factors in Kazakhstan, *J. Arid Environments*, 2020, Vol. 180, Art. No. 104206, DOI: jaridenv.2020.104203.
34. Karimova T. Y., Lushchekina A. A., Neronov V. M., Saiga Populations of Russia and Kazakhstan: Current Status and Retrospective Analysis of Some Biological Parameters, *Arid Ecosystems*, 2021, Vol. 11, No. 2, pp. 164–172, DOI: 10.1134/S2079096121020074.
35. Kulik K. N., Petrov V. I., Rulev A. S., Kosheleva O. Y., 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. 5–20, DOI: 10.1134/S2079096118010067.
36. Kulik K. N., Petrov V. I., Yuferev V. G., Tkachenko N. A., Shinkarenko S. S., Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, No. 2, pp. 98–105, DOI: 10.1134/S2079096120020080.
37. Li Z., Huffman T., McConkey B., Townley-Smith L., Monitoring and modeling spatial and temporal patterns of grassland dynamics using time-series MODIS NDVI with climate and stocking data, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 138, pp. 232–244, DOI: 10.1016/j.rse.2013.07.020.
38. Liang L., Wenpeng D., Huimin Y., Lin Z., Yu D., Spatio-Temporal Patterns of Vegetation Change in Kazakhstan from 1982 to 2015, *J. Resources and Ecology*, 2017, Vol. 8, No. 4, pp. 378–384, DOI: 10.5814/j.issn.1674-764x.2017.04.009.
39. Liu W. T., Kogan F. N., Monitoring regional drought using the Vegetation Condition Index, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 14, pp. 2761–2782, DOI: 10.1080/01431169608949106.
40. Loupian E., Burtsev M., Proshin A., Kashnitskii A., Balashov I., Bartalev S., Konstantinova A., Kobets D., Radchenko M., Tolpin V., Uvarov I., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Art. No. 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
41. Spivak L., Vitkovskaya I., Batyrbayeva M., Terekhov A., Detection of Desertification Zones Using Multiyear Remote Sensing Data, *NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability*, Springer, 2010, pp. 235–241.

42. Yan J., Zhang G., Ling H., Han F., Comparison of time-integrated NDVI and annual maximum NDVI for assessing grassland dynamics, *Ecological Indicators*, 2022, Vol. 136, Art. No. 108611, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108611.
43. Zhang G., Biradar C. M., Xiao X., Dong J., Zhou Y., Qin Y., Zhang Y., Liu F., Ding M., Thomas R., Exacerbated grassland degradation and desertification in Central Asia during 2000–2014, *Ecological Applications*, 2018, Vol. 28, No. 2, pp. 442–456, DOI: 10.5061/dryad.12bd9.
44. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Bazha S. N., Syrtykova S. H. D., Trends in Livestock Numbers and Spectral Properties of the Pasture Surface: Case Study of the Middle Gobi Aimag of Mongolia, *Arid Ecosystems*, 2018, Vol. 8, No. 3, pp. 153–160. DOI: 10.1134/S2079096118030095.