Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS

С. С. Шинкаренко[1,2], С. А. Барталев[1]

[1] *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*
[2] *Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН, Волгоград, 400062, Россия*
E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

В статье представлены результаты анализа сезонной динамики нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) для пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия. Предыдущие исследования многолетней динамики состояния естественных ландшафтов преимущественно опираются на усреднённые за продолжительные временные интервалы значения NDVI без учёта его сезонных изменений. В то же время фенологические особенности различных растительных сообществ, пастбищные нагрузки и ландшафтные пожары вносят существенный уровень неопределённости в использование средних за вегетационный сезон значений NDVI. Для зональных полупустынных и северопустынных ландшафтов характерно два пика NDVI: весенне-летний и осенний со значениями вегетационного индекса на уровне 60–90 % от весеннего. На севере изучаемого района в полупустынных ландшафтах не отмечено устойчивой статистически значимой связи между сезонной динамикой NDVI и гидротермическими условиями. По мере продвижения на юг в пустынных ландшафтах усиливается положительная связь значений NDVI с осадками и отрицательная — с температурой. Определены сроки наступления максимума NDVI для различных родов ландшафтов. На большей части территории максимум вегетации отмечается в середине – конце мая, наиболее поздний пик NDVI характерен для эолово-аккумулятивных северопустынных ландшафтов: 21–22-я недели года. Даты максимальных значений NDVI существенно меняются год от года, при этом во втором десятилетии XXI в. значительно вырос их разброс по сравнению с первым. Смещение даты максимальных значений NDVI объясняется комплексом факторов: климатическими и погодными флуктуациями, регулярными степными пожарами и пастбищными нагрузками. В рассматриваемых регионах выросло поголовье отгонного скота на 15–20 % и увеличилась сумма осадков за холодное полугодие на 10–22 мм, что способствует более продолжительной весенней вегетации и сдвигу максимума NDVI на более поздний срок. Результаты исследования могут учитываться при анализе многолетней динамики естественных зональных ландшафтов, а также для оптимизации пастбищных нагрузок в течение вегетационного сезона.

Ключевые слова: опустынивание, растительный покров, пустынные пастбища, сезонная динамика, MODIS, Северный Прикаспий, дистанционное зондирование

Одобрена к печати: 24.07.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194

Введение

Основной ресурс аридных ландшафтов — растительность, используемая как естественные кормовые угодья для животноводства. Травянистая растительность достаточно динамична под влиянием пастбищных нагрузок и гидротермических условий. Именно эколого-биологическими особенностями видов-доминантов определяется устойчивость пастбищных ландшафтов (Джапова, 2007). Превышение допустимых пастбищных нагрузок, трансформация ландшафтов при сельскохозяйственном освоении приводят к деградации и опустыниванию ландшафтов, существующих в условиях недостаточного увлажнения (Кулик и др., 2018; Опарин и др., 2004), особенно на территории аридной зоны (Глобальный..., 2019). Изучение отклика растительных сообществ пастбищ на антропогенные нагрузки в условиях климатических изменений и погодных флуктуаций является актуальной задачей. Определение продуктивности пастбищ натурными методами требует проведения неоднократных в течение сезона

наземных измерений на пробных площадях с укосами растительности для оценки фитомассы (Титлянова и др., 2018). На больших площадях наземный метод определения продуктивности пастбищ становится практически нереализуемым без снижения репрезентативности получаемых оценок. Ещё более ограничены возможности наземных наблюдений пастбищ при проведении ретроспективного анализа их продуктивности. Потенциал методов дистанционного зондирования при оценке состояния пустынных пастбищ отмечается исследователями уже на протяжении нескольких десятилетий (Барталев, 1991; Барталев, Брейдо, 1989; Брейдо и др., 1989; Кулик, 2004). Современные возможности получения непрерывных временных рядов данных дистанционных измерений индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), характеризующего фотосинтетически активную фитомассу, и других спектрально-отражательных характеристик растительного покрова позволяют оценивать его сезонную и многолетнюю динамику (Барталев и др., 2016). При совместном использовании данных наземных и дистанционных измерений возможно восстановление пространственно-временных изменений растительности пастбищ на основе установленных взаимосвязей её биофизических или биометрических характеристик (фитомасса, листовая поверхность, проективное покрытие и др.) с измерениями NDVI, а также определение степени деградации кормовых угодий (Ерошенко и др., 2018; Золотокрылин и др., 2013).

Исследования многолетней динамики NDVI часто основываются на анализе его осреднённых или интегрированных за достаточно продолжительные временные интервалы (вегетационный сезон или отдельные месяцы) значений с использованием данных низкого пространственного разрешения (1 км или ниже) на значительные площади (Золотокрылин и др., 2016; Тельнова, 2017) либо данных более высокого разрешения, но на ограниченную площадь. В то же время растительность аридных пастбищ очень динамична в течение сезона с достижением пика вегетации в период весны – начала лета и её минимума к середине лета по завершении развития эфемероидов и злаков. Второй пик вегетации приходится на конец лета и осень — период максимального накопления фитомассы полукустарничками и полукустарниками, галофитами, а также осенней вегетации злаков (Джапова, 2007; Маштыков, 2012; Рулев и др., 2016). Кроме того, часто имеющее место уничтожение травяного покрова аридных пастбищ пожарами в летний период может вносить существенный уровень неопределённости в использование среднегодовых значений NDVI в качестве характеристики состояния растительности (Рулев и др., 2016). Эти причины обуславливают, в частности, важность исследования закономерностей сезонной динамики NDVI растительного покрова аридных пастбищ. Сезонные временные ряды NDVI широко применяются для анализа состояния и определения сельскохозяйственных культур (Терехин, 2019). Использование интерполяционных алгоритмов реконструкции временных рядов данных дистанционных измерений позволяет восстанавливать непрерывный сезонный ход вегетационного индекса (Плотников и др., 2014), а также определять фенологические характеристики растительности, например даты начала и окончания вегетационного сезона (Миклашевич, Барталёв, 2016). Анализ сезонной динамики NDVI пастбищ позволяет выявить весенние и осенние максимумы развития растительного покрова, во многом определяющие запас кормовых ресурсов, поскольку именно прирост зелёной фитомассы весной и в начале лета составляет основную продукцию пастбищной растительности (Джапова, 2007). При этом анализ закономерностей изменения даты максимума вегетации позволяет выявлять тенденции и аномалии сроков наступления пика прироста зелёной фитомассы пастбищ.

Объект исследований

Изучаемый район относится к семиаридной климатической зоне (Золотокрылин и др., 2020) и включает частично или полностью следующие регионы: Астраханскую, Волгоградскую, Саратовскую области, Ставропольский край, Республики Калмыкию, Дагестан и Чечню, а также сопредельные Западно-Казахстанскую и Атыраускую области Республики

Казахстан. Территория является частью Прикаспийской низменности и представлена полупустынным типом ландшафтов (суглинистая аккумулятивная раннехвалынская равнина) и северопустынным подтипом (супесчаная и песчаная позднехвалынская равнина) с произрастанием степных и пустынных растительных сообществ (Бананова и др., 2011; Лазарева и др., 2017). Небольшие площади зональных пастбищ имеются также в дельте Волги на бэровских буграх (Дымова, 2009). Климат континентальный засушливый, годовая сумма осадков изменяется от 300 до 160 мм по метеостанциям «Эльтон» и «Атырау» соответственно при испаряемости 800–1000 мм и выше.

На песчаных почвах преобладают фитоценозы с доминированием житняка ломкого (*Agropyron fragile*), овсяницы валлисской (*Festuca valesiaca*), ковыля-волосатика (*Stipa capillata*), ковыля сарептского (*S. Sareptana*), на суглинках — полыни Лерхе (*Artemisia lercheana*), мятлика луковичного (*Poa bulbosa*), пижмы тысячелистниковой (*Tanacetum achilleifolium*). Велики площади солонцов и солончаков с галофитной растительностью (полынь малоцветковая (*Artemisia pauciflora*), камфоросма монпелийская (*Camphorosma monspeliaca*), бассия простертая (*Bassia prostrata*) и др.) (Горяев, 2019). При усилении пастбищных нагрузок растёт роль полыни, эфемеров (мортук пшеничный (*Eremopyrum triticeum*), неравноцветник кровельный (*Anisantha tectorum*), рогач песчаный (*Ceratocarpus arenarius*)) и эфемероидов (мятлик луковичный (*Poa bulbosa*)) (Бананова, Лазарева, 2014; Власенко и др., 2019). В 1970–1980-х гг. из-за распашки и чрезмерного выпаса большая часть песчаных земель Калмыкии в районе Чёрных земель лишилась растительного покрова. Благодаря фитомелиоративным мероприятиям, снижению пастбищных нагрузок и благоприятной климатической флуктуации удалось предотвратить экологическое бедствие в регионе. Однако после периода устойчивого состояния в 2002–2010 гг. вновь усилились процессы опустынивания, и площадь открытых песков на Чёрных землях приблизилась к значениям начала – середины 1990-х гг., а большая часть очагов опустынивания возникла в Астраханской обл. (Золотокрылин и др., 2014; Радочинская и др., 2019; Шинкаренко, 2019б). На значительной части песчаных земель было проведено закрепление песков кустарником жузгун безлистный (*Calligonum aphyllum*). В большой степени подвержены деградации Кизлярские пастбища и Терские пески (Кулик и др., 2018; Усманов и др., 2010). Современное состояние растительности Западного Казахстана менее изучено, однако имеющиеся фрагментарные данные о пастбищах позволяют констатировать сходство ботанического состава и тенденций динамики растительности под влиянием климатических и антропогенных факторов в соответствующих родах ландшафтов (Золотокрылин, Титкова, 2011; Есмагулова, Ткаченко, 2016; Иванов, Васильев, 1995; Кулик, 2004; Кулик и др., 2016; Лобойко и др., 2017). Имеющиеся различия в величине пастбищных нагрузок, структуре и пространственном распределении поголовья стимулируют изучение пастбищ Западного Казахстана.

Материалы и методы

Анализ сезонной динамики NDVI основан на использовании 16-дневных композитных изображений (стандартный продукт данных MOD13Q1), сформированных по данным спутниковых наблюдений спектрорадиометром MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) с пространственным разрешением примерно 0,003° за период 2000–2019 гг. (22 марта – 31 октября). Применение указанных данных позволяет анализировать практически непрерывные временные ряды NDVI в наиболее важный для исследований весенний период.

Использование геоинформационного слоя ландшафтной карты СССР (Швиденко, 2007) позволило определить полупустынные и пустынные типы пастбищных ландшафтов региона. Пастбища от прочих земель были отделены на основе информационного продукта USGS Land Use/Land Cover System, включающего следующие категории: «пастбища», «закустаренные пастбища» и «редкая растительность» (*рис. 1*, см. с. 182). Пересечение созданной регулярной сети ячеек, соответствующих пикселям изображений MODIS, с картами границ административных образований, ландшафтов и типов земной поверхности позволило присвоить

указанным регулярным ячейкам соответствующие атрибуты принадлежности и значения NDVI за каждый 16-дневный период наблюдений.

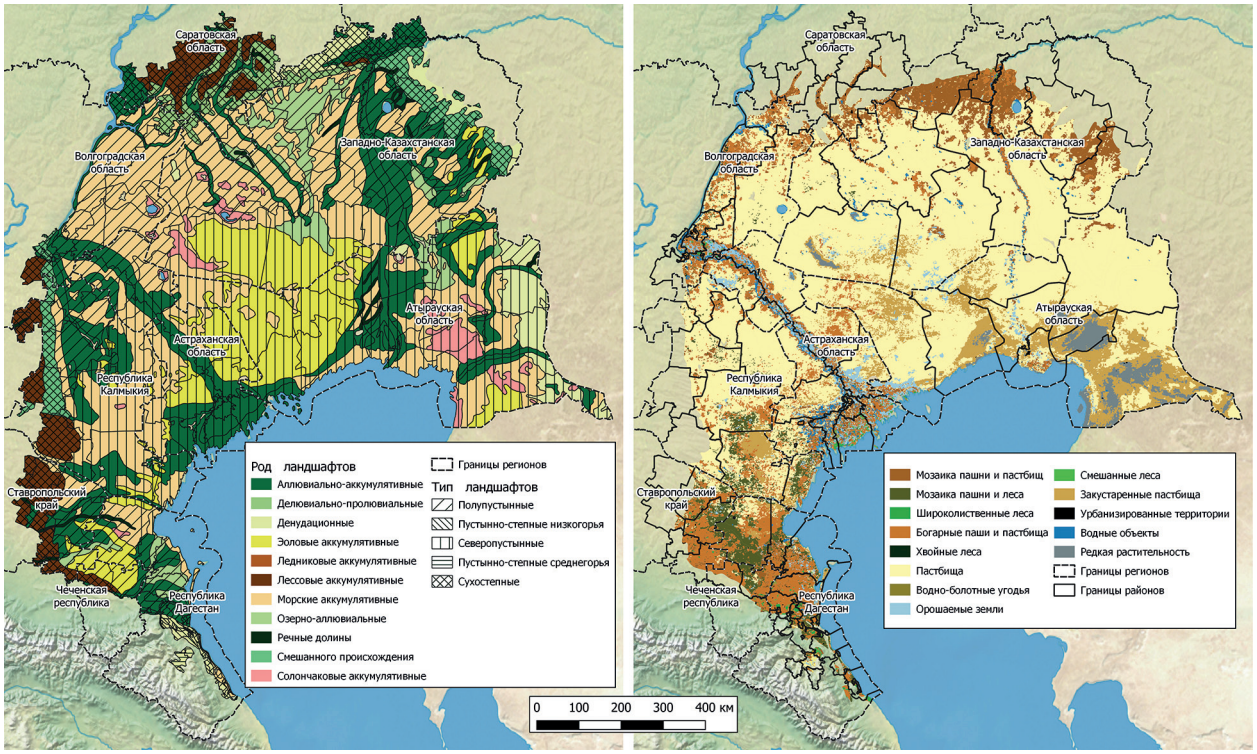

Рис. 1. Карты ландшафтов (*слева*) и типов земного покрова (*справа*) территории

Для анализа сезонного хода NDVI усреднялись его значения на каждый период наблюдений с последующим определением дат достижения максимальной величины индекса для каждого года и средних значений даты максимума за весь рассматриваемый период. Для каждого муниципального района, региона и рода ландшафтов были рассчитаны средневзвешенные значения NDVI на каждую дату. Учёт различий размеров фракций пограничных ячеек, образовавшихся в результате пересечения последних с разными картами, достигался вычислением следующего взвешенного среднеарифметического значения вегетационного индекса:

$$\overline{\mathrm{NDVI}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_i \mathrm{NDVI}_i}{\sum_{i=1}^{n} S_i},$$

где $\overline{\mathrm{NDVI}}$ — средневзвешенное значение NDVI; S_i —площадь i-й ячейки; NDVI_i —значение NDVI в i-й ячейке.

Аналогично были определены средневзвешенные значения дат достижения максимальных значений NDVI.

Источником данных о температуре и осадках послужил Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — Мировой центр данных (http://aisori.meteo.ru/ClimateR). На каждый 16-дневный интервал рассчитывалась среднесуточная температура и сумма осадков. Муниципальные районы группировались по ближайшей к центроиду соответствующего полигона метеостанции. Сведения о поголовье скота для России получены из базы данных показателей муниципальных образований (https://www.gks.ru/dbscripts/munst/munst.htm), для территории Казахстана — на официальном сайте национального Комитета по статистике (https://stat.gov.kz/region/list).

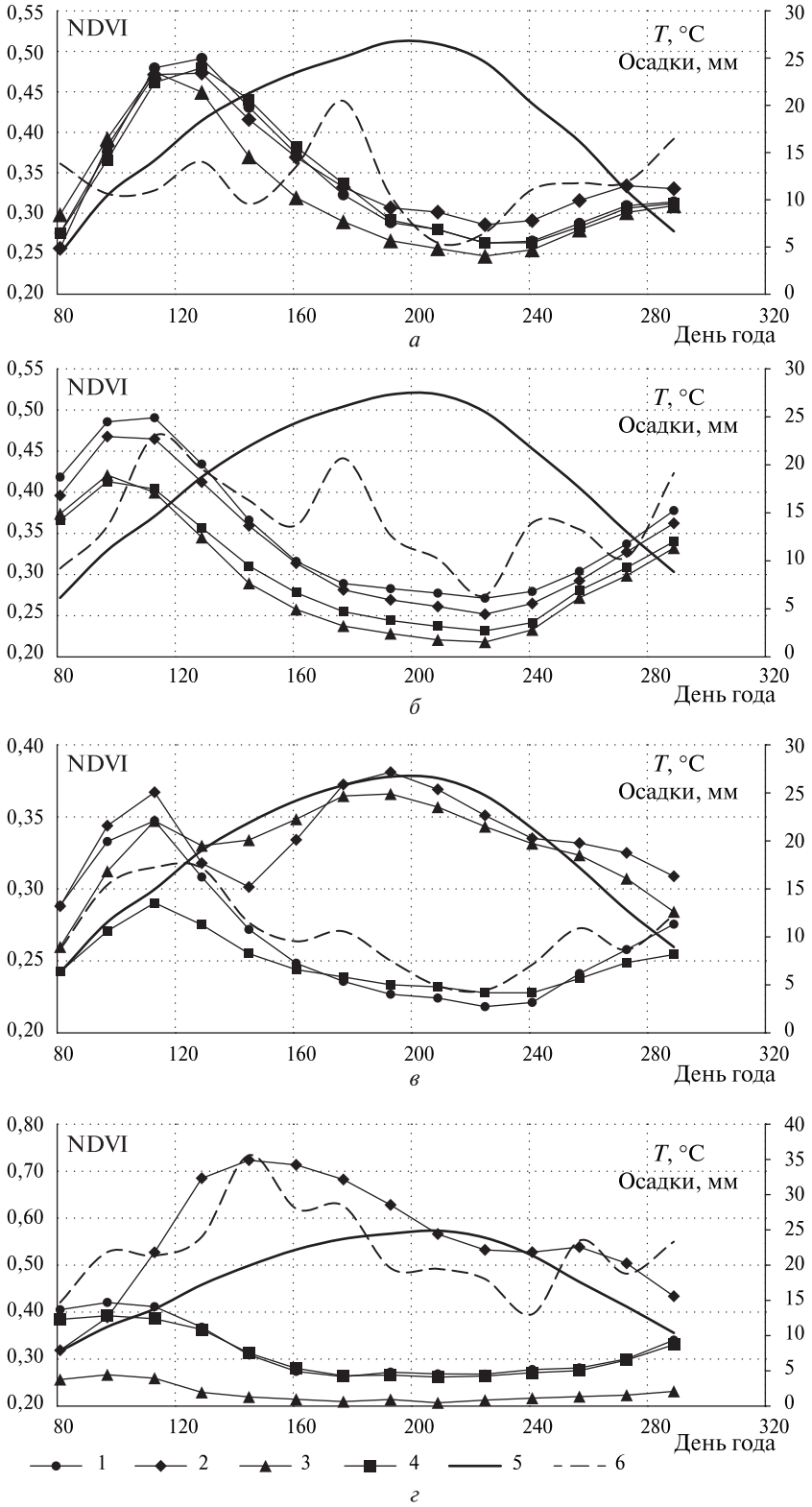

Рис. 2. Сезонная динамика NDVI (среднемноголетние значения) различных родов ландшафтов: *а* — МС «Эльтон», полупустынные: 1 — морские аккумулятивные, 2 — аллювиально-аккумулятивные, 3 — солончаковые аккумулятивные, 4 — денудационные структурные; *б* — МС «Яшкуль», полупустынные: 1 — морские аккумулятивные, 2 — дельтовые аккумулятивные, северопустынные: 3 — солончаковые аккумулятивные, 4 — эоловые аккумулятивные; *в* — МС «Астрахань», северопустынные: 1 — морские аккумулятивные, 2 — аллювиально-аккумулятивные, 3 — дельтовые аккумулятивные, 4 — эоловые аккумулятивные; *г* — МС «Гудермес», полупустынные: 1 — морские аккумулятивные, 3 — солончаковые аккумулятивные, 2 — денудационно-эрозионно складчатые горные пустыни, 4 — северопустынные эоловые аккумулятивные; 5 — температура, 6 — осадки

Результаты и их обсуждение

Большая часть площади изучаемых пастбищных ландшафтов относится к полупустынным и северопустынным морским аккумулятивным родам (22,25 и 21,15 % соответственно), а также к северопустынным эолово-аккумулятивным (20,1 %) и дельтовым аккумулятивным (8,9 %). Ещё от 2 до 5,5 % площади занимают аккумулятивные пастбищные ландшафты полупустыни и северных пустынь: дельтовые, озерно-аллювиальные и аллювиальные. Соотношение между полупустынными и пустынными пастбищами составляет примерно 37 на 62 %, оставшуюся часть занимают низкогорные пустынно-степные пастбища. В региональном аспекте изучаемые ландшафты относятся в большей степени к Западному Казахстану: почти 70 % всех аридных пастбищ изучаемой территории. Ещё 22 % пастбищных ландшафтов принадлежат Астраханской обл. и Республике Калмыкии, почти 6,5 % относятся к волгоградскому и саратовскому Заволжью.

На *рис. 2* (см. с. 183) показан сезонный ход усреднённых за 2000–2019 гг. значений NDVI, среднесуточной температуры и суммы осадков для различных родов ландшафтов. В дельтовых и пойменных ландшафтах отмечается два выраженных пика: весенний и летний. Первый связан с вегетацией эфемеров и эфемероидов, второй — с вегетацией луговой и галофитной растительности при подъёме грунтовых вод после половодья на Волге. Для всех других ландшафтов характерен весенний пик NDVI, минимум в середине лета и рост осенью до 60–90 % от весеннего пика. Сильнее всего осенний пик выражен в пустынных эоловых, морских и солончаковых аккумулятивных ландшафтах. В денудационных структурных ландшафтах обоих типов и в полупустынных озёрно-аллювиальных аккумулятивных осенняя величина вегетационного индекса имеет наименьшие значения по сравнению с весенними максимумами.

Для полупустынных ландшафтов в северной части изучаемой территории с метеостанциями (МС) «Эльтон», «Новоузенск» и «Уральск» отсутствует статистически значимая корреляция сезонной динамики вегетационного индекса, осадков и температуры, в том числе с накопленными значениями. Только в отдельные годы отмечается заметная отрицательная связь ($r = -0{,}5...-0{,}6$) NDVI и среднесуточной температуры. При продвижении на юг (МС «Верхний Баскунчак») появляется умеренная положительная связь NDVI и суммы осадков ($r = 0{,}3–0{,}4$) при таких же коэффициентах корреляции со среднесуточной температурой. Ещё южнее (МС «Яшкуль») уже отмечается высокая положительная связь между NDVI и осадками ($r = 0{,}72–0{,}86$) и высокая отрицательная — с температурой ($r = -0{,}68...-0{,}80$). В Предкавказье (МС «Гудермес») не отмечено значимой связи вегетационного индекса и осадков, в то же время связь с температурой высокая отрицательная ($r = -0{,}83$). Для пустынных ландшафтов по всей исследуемой территории характерна высокая отрицательная связь NDVI со среднесуточной температурой ($r = -0{,}70...-0{,}80$) и везде, кроме Предкавказья, отмечается высокая и весьма высокая положительная связь с осадками ($r = 0{,}70–0{,}93$). Нельзя не отметить синхронность сезонного хода NDVI в разных родах ландшафтов, коэффициенты корреляции соответствуют высокой силе связей ($r = 0{,}85–0{,}99$).

Существует высокая связь ($r = 0{,}7–0{,}9$) между датой пика вегетационного индекса и суммой осадков с начала года до этой даты. С одной стороны, действительно, осадки в течение вегетационного сезона способствуют более продолжительной вегетации, за счёт чего происходит увеличение длительности периода весенне-летней вегетации и соответствующий сдвиг даты. При этом следовало бы ожидать и увеличения максимума вегетационного индекса, так как за более длительный период накопится бóльшая фитомасса. Но связь максимума NDVI с суммой осадков за вегетационный период у большинства ландшафтов умеренная ($r = 0{,}4–0{,}5$) или отсутствует. С другой стороны, более позднее наступление пика вегетации приводит к увеличению продолжительности периода накопления и интегрального количества осадков, что объясняет и рост значений коэффициента корреляции.

Результаты обработки временных рядов NDVI и определения среднемноголетних максимальных значений индекса и даты их наступления (*рис. 3*, см. с. 185) показывают, что последние лежат в диапазоне 7 апреля – 16 октября. При этом примерно на половине территории

(51 %) максимум NDVI приходится на 19–21-ю недели, на более ранний срок — около 11 %, на четвёртой части изучаемых ландшафтов 22–24-я недели соответствуют максимуму NDVI и примерно на 13 % максимальные значения индекса отмечаются в более поздние сроки.

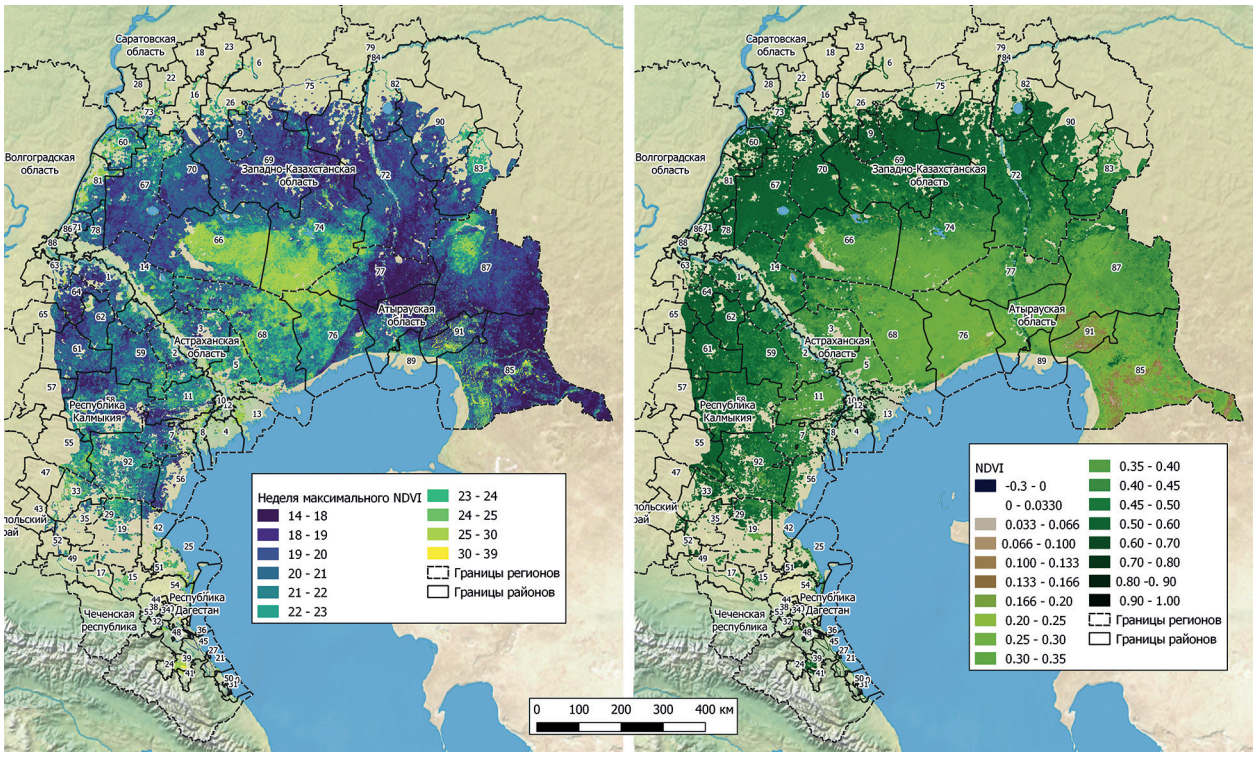

Рис. 3. Среднемноголетний период (*слева*, в календарных неделях) и максимальное значение NDVI

Наиболее рано максимум NDVI наступает в пустынных денудационных ландшафтах юго-восточной части Атырауской обл. (в среднем 18–19-я недели). В то же время для пастбищ этого рода ландшафтов характерна наименьшая продуктивность: среднегодовой максимум NDVI здесь составляет 0,23–0,3. Далее на 20-ю неделю приходится максимум NDVI полупустынных территорий, составляющий 0,45–0,53 у морских, озёрно-аллювиальных и дельтовых аккумулятивных ландшафтов и 0,42 — у денудационно-структурных. На 21-й неделе вегетационный индекс достигает максимальных значений в северопустынных морских, озёрно-аллювиальных, дельтовых аккумулятивных и солончаково-аккумулятивных ландшафтах. Наиболее поздним для равнинных ландшафтов является максимум NDVI в полупустынных (NDVI = 0,43) и северопустынных (NDVI = 0,32) эолово-аккумулятивных ландшафтах (23-я неделя). На *рис. 3* выражены наиболее крупные песчаные массивы: Рын-пески в Западно-Казахстанской обл., пески Тайсойган в Атырауской обл., Чёрные земли в Калмыкии и Астраханской обл., для которых характерно более позднее наступление дат максимума NDVI. В пустынно-степных низко- и среднегорьях максимальные значения наблюдаются на 24–27-й неделях.

На *рис. 4* показано распределение площадей пастбищ с разными датами наблюдения максимальных значений NDVI по родам ландшафтов. От 90 до 100 % ландшафтов с максимальными значениями NDVI на 14–17-й неделях относятся главным образом к северопустынным морским и дельтовым аккумулятивным ландшафтам. На 18-й неделе доля пустынных ландшафтов снижается до 70 % с тем же распределением по родам. Площади пастбищ с максимумом на 19–21-й неделях распределены примерно поровну между пустыней и полупустыней. В дальнейшем доля полупустынных ландшафтов снижается вплоть до 37-й недели, а в конце вегетационного сезона максимумы NDVI наблюдаются только у полупустынных ландшафтов. Наибольшие площади с более ранними максимумами вегетационного индекса характерны для

морских и озёрно-аллювиальных аккумулятивных ландшафтов. Здесь преобладают эфемеры, эфемероиды и дерновинные злаки. Более поздние максимальные значения NDVI отмечены у солончаковых аккумулятивных ландшафтов, что связано со специфическим флористическим составом растительных сообществ: галофитная растительность поздно начинает вегетацию, а плодоношение происходит в сентябре – октябре.

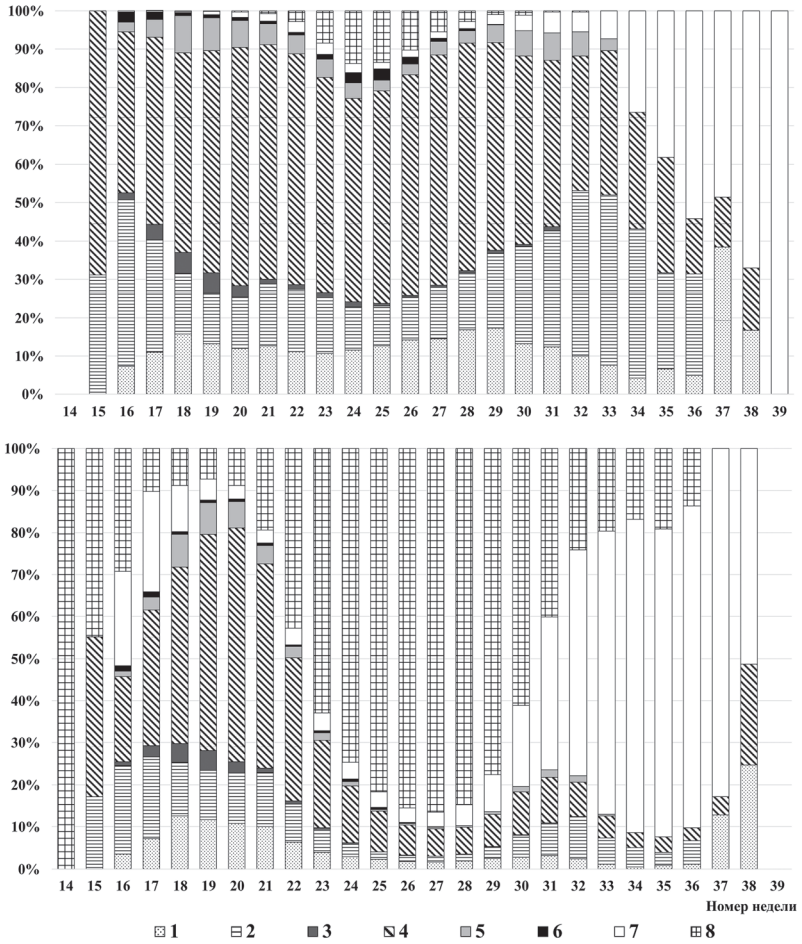

Рис. 4. Распределение площадей с различными датами достижения максимальных значений NDVI по родам полупустынных (*вверху*) и пустынных (*внизу*) ландшафтов: 1 — аллювиально-аккумулятивные; 2 — дельтовые аккумулятивные; 3 — денудационные структурные; 4 — морские аккумулятивные; 5 — озерно-аллювиально аккумулятивные; 6 — речные долины; 7 — солончаковые аккумулятивные; 8 — эоловые аккумулятивные

Даты максимальной вегетации существенно меняются год от года, поэтому несомненный интерес представляет анализ динамики максимумов NDVI и соответствующих им дат (*рис. 5*). На большей части территории (61 %) во втором десятилетии XXI в. не отмечено значительных изменений максимальных NDVI и соответствующих им дат: изменения значений вегетационного индекса укладываются в диапазон ±5 %, а смещение дат не превышает одну декаду. На 17,2 % территории произошло увеличение NDVI при сдвиге даты максимума на более поздний срок, на площади 3,7 % от изучаемого района увеличение NDVI сопровождалось более ранней датой максимума. Снижение NDVI на фоне увеличения даты максимума характерно для 11,9 % территории, на оставшихся 6,2 % произошло снижение максимальных значений NDVI и сдвиг дат на более ранние. Средневзвешенное значение даты максимума для полупустынных ландшафтов увеличилось на 14 дней: с 12 до 26 мая. Для пустынных ландшафтов смещение составило неделю: с 23 на 30 мая. Наибольшее изменение даты максимальных NDVI в 2–3 недели характерно для полупустынных дельтовых, солончаковых и аллюви-

ально-аккумулятивных, а также северопустынных озёрно-аллювиальных аккумулятивных и морских аккумулятивных ландшафтов обоих типов. В пустынных ландшафтах примерно на равных площадях происходит как рост NDVI, так и его снижение: 19,7 и 21,6 % соответственно. Увеличение и снижение максимальных NDVI происходит в основном на фоне сдвига дат их наблюдения на более поздний срок. Наибольшая доля площади со снижением NDVI характерна для северопустынных ландшафтов речных долин.

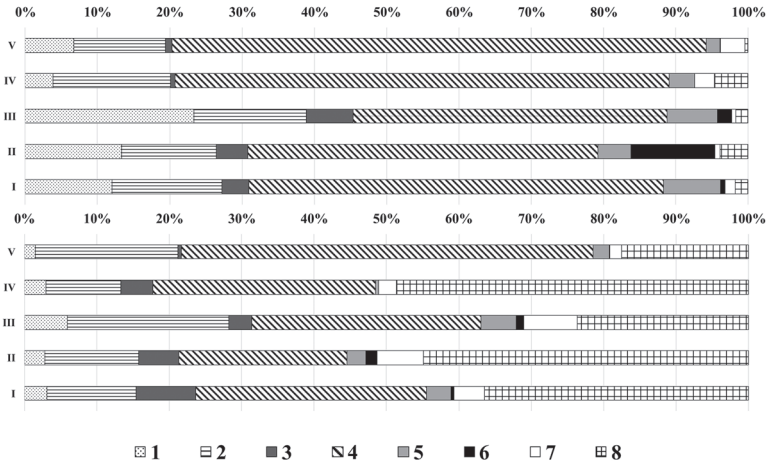

Рис. 5. Распределение площадей по направлению изменений максимальных NDVI и соответствующих им дат среди полупустынных (*вверху*) и пустынных (*внизу*) ландшафтов: I — без существенных изменений, II — снижение NDVI и более ранние даты, III — снижение NDVI и более поздние даты, IV — рост NDVI и более ранние даты, V — рост NDVI и более поздние даты; 1 — аллювиально-аккумулятивные ландшафты, 2 — дельтовые – аккумулятивные, 3 — денудационные структурные, 4 — морские аккумулятивные, 5 — озерно-аллювиально аккумулятивные, 6 — речные долины, 7 — солончаковые аккумулятивные, 8 — эоловые аккумулятивные

Смещение даты максимума NDVI может быть вызвано несколькими причинами. Во-первых, более поздним началом вегетации, связанным с низкой температурой в начале весны. Во-вторых, более длительным периодом весенней вегетации эфемеров и эфемероидов, вызванным прохладной и влажной весной. В этом случае кроме сдвига даты максимума NDVI должно происходить и увеличение значений самого вегетационного индекса, поскольку за счёт большей длительности вегетации накопится большая фитомасса. Кроме того, в условиях засушливой весны подавляется вегетация эфемеров, эфемероидов и дерновинных злаков, из-за чего фитомасса растительных сообществ состоит в основном из полукустарничков (полынь (*Artemisia* spp.), бассия распростёртая (*Bassia prostrata*) и др.), максимум вегетации которых приходится на вторую половину лета – начало осени. Также на сроки максимумов NDVI влияют пирогенные изменения растительности. На Чёрных землях, в волгоградском и астраханском Заволжье, Рын-песках, северо-западе и востоке Западно-Казахстанской обл. часты степные пожары (Павлейчик, 2019; Шинкаренко, 2018, 2019а; Шинкаренко, Берденгалиева, 2019). В изучаемых ландшафтах преобладают пожары летне-осеннего периода. В результате огнём повреждаются дерновины злаков, уничтожаются полукустарнички и полукустарники (Рыбашлыкова и др., 2019; Рябинина и др., 2018). На следующий год после пожара возможно развитие фитоценозов по нескольким вариантам: доминирование ранней весной эфемерной и эфемероидной растительности на месте многолетних фитоценозов (главным образом мятлика луковичного (*Poa bulbosa*) и дескурайнии Софии (*Descurainia sophia*) на суглинистых почвах морских и озёрно-аллювиальных аккумулятивных ландшафтов, неравноцветника кровельного (*Anisantha tectorum*) на песчаных почвах эолово-аккумулятивных ландшафтов), которая даёт ранний и высокий пик NDVI либо более медленное восстановление исходной растительной ассоциации, в результате максимальное значение NDVI будет меньше и сдвинется на более поздний срок.

Пастбищные нагрузки также влияют на максимум вегетационного индекса и даты его наступления. Особенно заметно влияние стравливания всходов озимых злаков (житняка (*Agropyron* spp.), овсянницы (*Festuca* spp.) и др.) осенью и зимой. За счёт этого весной преобладают эфемеры с ранней вегетацией, а максимум NDVI многолетней растительности сдвигается относительно территорий с меньшими пастбищными нагрузками. Также возможен другой сценарий сезонного хода вегетационного индекса при пастбищных нагрузках. Например, боле ранний и низкий пик вегетации из-за стравливания растительности: пока на невыпасаемых участках растительность развивается, на пастбищах происходит отчуждение фитомассы, из-за которого рост растительности замедляется. Стравливание растительности скотом способствует отавности, за счёт чего возможна более длительная вегетация на пастбищах в весенне-летний период. В исследуемых ландшафтах в разной степени проявляются все описанные процессы.

Во всех регионах произошёл рост поголовья овец и коз во втором десятилетии XXI в. по сравнению с первым десятилетием. Сильнее всего поголовье выросло в Западно-Казахстанской обл. (на 51,3 % до 1,15 млн голов), Астраханской (на 50,2 % до 1,4 млн голов), Волгоградской (на 40,6 % до 1,0 млн голов) областях и Калмыкии (на 38,6 % до 2,42 млн голов). В Дагестане поголовье было стабильно высоким на уровне 4,5–5 млн голов. Наименьший прирост поголовья овец и коз наблюдался в Атырауской обл. — всего 14,3 % до 0,56 млн голов. С ростом пастбищных нагрузок связаны сдвиги сроков максимума вегетационного индекса на более поздние. Средняя температура выросла на 0,1–0,6 °C, а сумма осадков уменьшилась на 5–50 мм по разным метеостанциям. Только в Предкавказье (МС «Гудермес», «Дербент») произошёл рост годовой суммы осадков на 10–13 мм. В то же время отмечено перераспределение накопленной суммы осадков за холодное полугодие на 10–20 %, что способствует более продолжительной весенней вегетации.

Заключение

В результате исследований определены закономерности сезонной динамики NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия в 2000–2019 гг. Для зональных полупустынных и пустынных ландшафтов характерно два пика вегетации: весенний и осенний. При этом величина осеннего пика составляет 60–90 % от весеннего. Осенний максимум вегетации наиболее выражен в пустынных эоловых, морских и солончаковых аккумулятивных ландшафтах. В дельтовых и аллювиальных аккумулятивных ландшафтах кроме весеннего максимума вегетации есть также летний пик, связанный с подъёмом грунтовых вод при половодье. Для полупустынных ландшафтов в северной части района исследований (Волгоградская, Саратовская, Западно-Казахстанская обл.) не выявлено статистически значимой связи сезонных изменений NDVI и гидротермических условий. При продвижении на юг нарастает сила отрицательной связи со среднесуточной температурой и положительная — с суммой осадков. Для пустынных ландшафтов на всей исследуемой территории характерна высокая положительная связь NDVI с осадками и отрицательная — с температурой. Ландшафтные пожары уменьшают осенние пики вегетации, а пастбищные нагрузки способствуют снижению фитомассы в середине вегетационного сезона.

На большей части территории (61 %) во втором десятилетии XXI в. не отмечено существенных изменений максимальных значений NDVI и соответствующих им дат: изменения максимума вегетационного индекса укладываются в диапазон ±5 %, а смещение дат не превышает одну декаду. На 17,2 % территории произошло увеличение максимума NDVI при сдвиге его даты на более поздний срок, на площади 3,7 % от изучаемого района увеличение NDVI сопровождалось более ранним достижением максимума. Снижение максимумов NDVI на фоне более позднего наступления их дат характерно для 11,9 % территории, на оставшихся 6,2 % произошло снижение максимальных значений NDVI и сдвиг дат на более ранние. Смещение даты максимальных значений NDVI объясняется комплексом факторов: климатическими и погодными флуктуациями, регулярными степными пожарами и пастбищными нагрузками. Во всех рассматриваемых регионах произошло увеличение поголовья овец и коз

от 15 до 20 % и суммы осадков за холодное полугодие на 10–22 мм. Всё это способствует более продолжительной весенней вегетации и сдвигу максимума NDVI на более поздний срок.

Во втором десятилетии XXI в. существенно вырос разброс дат максимальных NDVI по сравнению с первым: в полупустынных ландшафтах стандартное отклонение даты увеличилось с 13 до 47 дней, в пустынных — с 17 до 36 дней. При том что стандартное отклонение максимальных значений вегетационного индекса оставалось практически неизменным и в первом десятилетии, и во втором. Для полупустынных ландшафтов стандартное отклонение максимума NDVI от среднемноголетнего составило 0,05, для пустынных — 0,03.

Полученные результаты могут использоваться при планировании нагрузок на пастбища региона исследований. Кроме того, особенности сезонной динамики должны учитываться при анализе многолетних изменений состояния растительности, в том числе с использованием данных дистанционного зондирования. Наряду со средними за вегетационный сезон величинами NDVI необходимо анализировать и многолетнюю динамику значений и дат наступления его максимумов.

В работе использовалась инфраструктура Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015). Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) в рамках научного проекта № 19-35-60007.

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. *Бананова В. А.*, *Лазарева В. Г.*, *Сератирова В. В.* Природное районирование Северо-Западного Прикаспия при современном хозяйственном использовании // Геология, география и глобальная энергия. 2011. № 3(42). С. 223–232.
3. *Барталев С. А.* Автоматизированные методы обработки аэрокосмической информации при оценке состояния пастбищных угодий пустынь: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 23 с.
4. *Барталев С. А.*, *Брейдо М. Д.* Автоматизированное определение таксационных характеристик кустарниковой растительности пустынь по дистанционным данным // Изв. вузов: геодезия и аэрофотосъемка. 1989. № 4. С. 94–102.
5. *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.
6. *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.
7. *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.
8. Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Национальный доклад. Т. 2 / под ред. Р. С.-Х. Эдельгериева. М.: Изд-во МБА, 2019. 476 с.
9. *Горяев И. А.* Галофитные полынники на Прикаспийской низменности (в пределах Калмыкии) // Ботанический журн. 2019. Т. 104. № 1. С 93–106.
10. *Джапова Р. Р.* Динамика растительного покрова Ергенинской возвышенности и Прикаспийской низменности в пределах республики Калмыкия: дис. ... д-ра биол. наук. М.:2007., 288 с.
11. *Дымова Т. В.* Перераспределение экологических групп и жизненных форм растений пастбищ дельты Волги под влиянием выпаса // Юг России: экология, развитие. 2009. № 1. С. 24–29.
12. *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.
13. *Есмагулова Б. Ж.*, *Ткаченко Н. А.* Лесомелиоративное картографирование пастбищ на Урдинских песках (в пределах Бокейординского района Западно-Казахстанской области) // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2016. № 2(42). С. 127–134.

14. *Золотокрылин А. Н.*, *Титкова Т. Б.* Тенденция опустынивания Северо-Западного Прикаспия по MODIS-данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 2. С. 217–225.
15. *Золотокрылин А. Н.*, *Титкова Т. Б.*, *Уланова С. С.*, *Федорова Н. Л.* Наземные и спутниковые исследования продуктивности пастбищ республики Калмыкии с различной степенью деградации растительных сообществ // Аридные экосистемы. 2013. Т. 19. № 4(57). С. 31–39.
16. *Золотокрылин А. Н.*, *Трофимова И. А.*, *Титкова Т. Б.* Оценка экологического состояния «норма» аридных пастбищ по геоботаническим и MODIS данным // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 197–207.
17. *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.
18. *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.
19. *Иванов И. В.*, *Васильев И. Б.* Человек, природа и почвы Рын-песков Волго-Уральского междуречья в голоцене. М.: Интеллект, 1995. 258 с.
20. *Кулик К. Н.* Агролесомелиоративное картографирование и фитоэкологическая оценка аридных агроландшафтов. Волгоград: Изд-во ВНИАЛМИ, 2004. 248 с.
21. *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.
22. *Кулик К. Н.*, *Петров В. И.*, *Рулев А. С.*, *Кошелева О. Ю.*, *Шинкаренко С. С.* К 30-летию «Генеральной схемы по борьбе с опустыниванием Чёрных земель и Кизлярских пастбищ» // Аридные экосистемы. 2018. № 1. С. 5–12.
23. *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.
24. *Лобойко В. Ф.*, *Есмагулова Б. Ж.*, *Ткаченко Н. А.* Фитоэкологическая оценка и лесомелиоративное картографирование песчаного массива «Кандагаш» Западно-Казахстанской области республики Казахстан // Изв. Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2017. № 2(46). С. 211–218.
25. *Лупян Е. А.*, *Прошин А. А.*, *Бурцев М. А.*, *Балашов И. В.*, *Барталев С. А.*, *Ефремов В. Ю.*, *Кашницкий А. В.*, *Мазуров А. А.*, *Матвеев А. М.*, *Суднева О. А.*, *Сычугов 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.
26. *Маштыков К. В.* Сезонная изменчивость растительных сообществ пустынной зоны Калмыкии (на примере племзавода «Улан-Хееч» Яшкульского района) // Вестн. ин-та комплексных исследований аридных территорий. 2012. № 2(25). С. 45–50.
27. *Миклашевич Т. С.*, *Барталёв С. А.* Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24.
28. *Опарин М. Л.*, *Опарина О. С.*, *Цветкова А. А.* Выпас как фактор трансформации наземных экосистем семиаридных регионов // Поволжский экологич. журн. 2004. № 2. С. 183–199.
29. *Павлейчик В. М.* Широтно-зональная неоднородность развития травяных пожаров в Заволжско-Уральском регионе // Бюл. Оренбургского науч. центра УрО РАН. 2019. № 2. С. 1–14.
30. *Плотников Д. Е.*, *Миклашевич Т. С.*, *Барталёв С. А.* Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
31. *Радочинская Л. П.*, *Кладиев А. К.*, *Рыбашлыкова Л. П.* Продукционный потенциал восстановленных пастбищ Северо-Западного Прикаспия // Аридные экосистемы. 2019. Т. 25. № 1. С 61–68.
32. *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.
33. *Рыбашлыкова Л. П.*, *Беляев А. И.*, *Пугачёва А. М.* Мониторинг сукцессионных изменений пастбищных фитоценозов в «потухших» очагах дефляции Северо-Западного Прикаспия // Юг России: экология, развитие. 2019. Т. 14. № 4. С. 78–85.
34. *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, развитие. 2018. № 1. С. 116–127.

35. *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.
36. *Терехин Э. А.* Сезонная динамика проективного покрытия растительности агроэкосистем на основе спектральной спутниковой информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 4. С. 111–123.
37. *Титлянова А. А.*, *Базилевич Н. И.*, *Шмакова Е. И.*, *Снытко В. А.*, *Дубынина С. С.*, *Магомедова Л. Н.*, *Нефедьева Л. Г.*, *Семенюк Н. В.*, *Тишков А. А.*, *Ти Тран*, *Хакимзянова Ф. И.*, *Шатохина Н. Г.*, *Кыргыс Ч. О.*, *Самбуу А. Д.* Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. 2-е изд. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.
38. *Усманов Р. З.*, *Баламирзоев М. А.*, *Котенко М. Е.*, *Бабаева М. А.*, *Осипова С. В.* Проблемы борьбы с деградацией и опустыниванием Кизлярских пастбищ в связи с аридизацией климата и антропогенных воздействий на природные экосистемы // Юг России: экология, развитие. 2010. № 3. С. 117–122.
39. *Швиденко А.*, *Щепащенко Д.*, *МакКаллум Я.* Леса и лесное хозяйство России / Международный ин-т прикладного системного анализа и Российская Академия наук. Лаксенбург, Австрия. 2007. URL: http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/forest_cdrom/index.html.
40. *Шинкаренко С. С.* Оценка динамики площадей степных пожаров в Астраханской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 138–146.
41. *Шинкаренко С. С.* (2019а) Пожарный режим ландшафтов Северного Прикаспия по данным очагов активного горения // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 121–133.
42. *Шинкаренко С. С.* (2019б) Пространственно-временная динамика опустынивания на Чёрных землях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 155–168.
43. *Шинкаренко С. С.*, *Берденгалиева А. Н.* Анализ многолетней динамики степных пожаров в Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 2. С. 98–110.

NDVI seasonal dynamics of the North Caspian pasture landscapes from MODIS data

S. S. Shinkarenko[1,2], S. A. Bartalev[1]

[1] *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
[2] *Federal Scientific Center of Agroecology, Complex Meliorations and Agroforestry RAS Volgograd 400062, Russia*
E-mail: shinkarenkos@vfanc.ru

The paper presents the results of analysis of the seasonal dynamics of the normalized difference vegetation index (NDVI) for pasture landscapes of the Northern Caspian region. A number of studies on the long-term dynamics of the condition of natural landscapes are based on the NDVI values averaged over long time intervals without considering its seasonal changes. At the same time, phenological characteristics of various plant communities, pasture loads and landscape fires determine a significant level of uncertainty in the use of average NDVI values for a vegetation period. Zonal semi-desert and north-desert landscapes are characterized by two peaks of NDVI: spring-summer and autumn with vegetation index of 60–90 % of the spring level. Semi-desert landscapes located in the north of the area under study do not have stable statistically significant connection between the seasonal dynamics of NDVI and hydrothermal conditions. Desert landscapes of the south, on the contrary, demonstrate a high positive connection between NDVI values and precipitation, and a negative one — between NDVI and temperature. The time periods of maximum NDVI values have been determined for various types of landscapes. In most part of the Northern Caspian region, vegetation maximum is observed in mid-late May with the latest NDVI peak being characteristic of aeolian-accumulative north-desert landscapes: 21st – 22nd week of the year. The dates of maximum NDVI values vary significantly from year to year, and it should be noted that in the second decade of the 21st century, their variation increased significantly

as compared to the first decade. The date shift of the maximum NDVI values is explained by a complex of factors: climatic and weather fluctuations, regular steppe fires and pasture loads. In all the areas under study, an increase in sheep and goat stock from 15 to 20 % and in the amount of precipitation over the cold half-year by 10–22 mm has been observed. All these factors contribute to a longer spring vegetation and a shift in the maximum vegetation index to a later date. The results of the study should be taken into account when analyzing the long-term dynamics of the NDVI of natural zonal landscapes, as well as for optimizing pasture loads during the growing season. The study was funded by Russian Foundation for Basic Research, project No. 19-35-60007.

Keywords: desertification, vegetation cover, desert pastures, seasonal dynamics, MODIS, Northern Pre-Caspian, remote sensing

Accepted: 24.07.2020
DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194

References

1. Bananova V. A., Lazareva V. G., Tendentsii izmeneniya botanicheskogo raznoobraziya pod vliyaniem opustynivaniya v respublike Kalmykiya (The tendencies of changes of botanical diversity under the influence of desertification in the Republic of Kalmykia), *Aridnye ekosistemy*, 2014, Vol. 20, No. 2(59), pp. 87–96.
2. Bananova V. A., Lazareva V. G., Seratirova V. V., Prirodnoe raionirovanie Severo-Zapadnogo Prikaspiya pri sovremennom khozyaistvennom ispol'zovanii (Natural zoning of the North-Western Caspian with modern economic use), *Geologiya*, *geografiya i global'naya energiya*, 2011, No. 3(42), pp. 223–232.
3. Bartalev S. A., *Avtomatizirovannye metody obrabotki aerokosmicheskoi informatsii pri otsenke sostoyaniya pastbishchnykh ugodii pustyn': Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk* (Automated methods for processing aerospace information in assessing the condition of pasture lands of deserts: Ext. abstract Cand. techn. sci. thesis), Moscow, 1991, 23 p.
4. Bartalev S. A., Breido M. D., Avtomatizirovannoe opredelenie taksatsionnykh kharakteristik kustarnikovoi rastitel'nosti pustyn' po distantsionnym dannym (Automated recognition of taxation features of shrub plants from remote data in deserts), *Izvestiya vuzov: geodeziya i aerofotos"emka*, 1989, No. 4, pp. 94–102.
5. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p.
6. Breido M. D., Zhirin V. M., Bartalev S. A., Bakhtinova E. V., Opredelenie nekotorykh kharakteristik kormovykh resursov pustynnykh pastbishch po aerokosmicheskoi informatsii (Identification of forage resources features in desert grazing from aerospace data), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1989, No. 3, pp. 66–76.
7. Vlasenko M. V., Kulik A. K., Salugin A. N., Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya i poter' produktivnosti aridnykh pastbishchnykh ekosistem Sarpinskoi nizmennosti (Evaluation of the Ecological Status and Loss of Productivity of Arid Pasture Ecosystems of the Sarpa Lowland), *Aridnye ekosistemy*, 2019, Vol. 25, No. 4(81), pp. 71–81.
8. *Global'nyi klimat i pochvennyi pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel'*, *institutsional'nye*, *infrastrukturnye*, *tekhnologicheskie mery adaptatsii* (*sel'skoe i lesnoe khozyaistvo*), *Natsional'nyi doklad*, *Tom 2* (Global Climate and Soil Cover of Russia: Desertification and Land Degradation, Institutional, Infrastructure, Technological Adaptation Measures (Agriculture and Forestry), National report, Vol. 2), R. S.-Kh. Edel'gerieva (ed.), Moscow: Izd. MBA, 2019, 476 p.
9. Goryaev I. A., Galofitnye polynniki na Prikaspiiskoi nizmennosti (v predelakh Kalmykii) (Halophytic wormwoods on the Caspian Lowland (in Kalmykia)), *Botanicheskii zhurnal*, 2019, Vol. 104, No. 1, pp. 93–106.
10. Dzhapova R. R., *Dinamika rastitel'nogo pokrova Ergeninskoi vozvyshennosti i Prikaspiiskoi nizmennosti v predelakh respubliki Kalmykiya: Diss. dokt. biol. nauk* (Dynamics of vegetation in Ergeny and the Caspian depression within the Republic of Kalmykia, Dr. biol. sci. thesis), Moscow, 2007, 288 p.
11. Dymova T. V., Pereraspredelenie ekologicheskikh grupp i zhiznennykh form rastenii pastbishch del'ty Volgi pod vliyaniem vypasa (Redistribution of ecological groups and life forms of plants of the Volga delta pastures under the influence of pasturage), *Yug Rossii: ekologiya*, *razvitie*, 2009, No. 1, pp. 24–29.
12. Eroshenko F. V., Bartalev S. A., Lapenko N. G., Samofal E. V., Storchak I. G., Vozmozhnosti distantsionnoi otsenki sostoyaniya i stepeni degradatsii prirodnykh kormovykh ugodii (Capabilities for rangelands state and degradation assessment using remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 7, pp. 53–66.
13. Esmagulova B. Zh., Tkachenko N. A., Lesomeliorativnoe kartografirovanie pastbishch na Urdinskikh peskakh (v predelakh Bokeiordinskogo raiona Zapadno-Kazakhstanskoi oblasti) (Forest reclamation of grass-

land 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.
14. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Tendentsiya opustynivaniya Severo-Zapadnogo Prikaspiya po MODIS-dannym (Desertification tendency in North-West Caspian region according to MODIS data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 2, pp. 217–225.
15. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Ulanova S. S., Fedorova N. L., Nazemnye i sputnikovye issledovaniya produktivnosti pastbishch respubliki Kalmykii s razlichnoi stepen'yu degradatsii rastitel'nykh soobshchestv (Terrestrial and satellite investigation of pasture productivity of Kalmykia with different degree of vegetation degradation), *Aridnye ekosistemy*, 2013, Vol. 19, No. (57), pp. 31–39.
16. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Cherenkova E. A., Vinogradova V. V., Dinamika letnego uvlazhneniya i biofizicheskikh parametrov aridnykh pastbishch Evropeiskoi chasti Rossii v 2000–2014 gg. (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.
17. Zolotokrylin A. N., Trofimova I. A., Titkova T. B., Otsenka ekologicheskogo sostoyaniya "norma" aridnykh pastbishch po geobotanicheskim i MODIS dannym (Ecological conditions estimation: "normal" arid pastures by MODIS and geobotanical data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 197–207.
18. Zolotokrylin A. N., Cherenkova E. A., Titkova T. B., Aridizatsiya zasushlivykh zemel' evropeiskoi chasti Rossii i svyaz' s zasukhami (Aridization of Drylands in the European Part of Russia: Secular Trends and Links to Droughts), *Izvestiya Rossiiskoi Akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2020, Vol. 84, No. 2, pp. 207–217.
19. Ivanov I. V., Vasil'ev I. B., *Chelovek*, *priroda i pochvy Ryn-peskov Volgo-Ural'skogo mezhdurech'ya v golotsene* (Man, nature and soils in the Ryn-sands of the country between the Volga and the Ural rivers during the Holocene), Moscow: Intellect, 1995, 258 p.
20. Kulik K. N., *Agrolesomeliorativnoe kartografirovanie i fitoekologicheskaya otsenka aridnykh agrolandshaftov* (Agroforest-meliorative mapping and phyto-ecological estimation of arid landscapes), Volgograd: VNIALMI, 2004, 248 p.
21. Kulik K. N., Esmagulova B. Zh., Kosheleva O. Yu., Mushaeva K. B., Shinkarenko S. S., Izmenenie fitotsenozov Volgo-Ural'skogo mezhdurech'ya pod vliyaniem pastbishchnykh nagruzok (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.
22. Kulik K. N., Petrov V. I., Rulev A. S., Kosheleva O. Yu., Shinkarenko S. S., K 30-letiyu "General'noi skhemy po bor'be s opustynivaniem Chernykh zemel' i Kizlyarskikh pastbishch" (On the 30th Anniversary of the "General Plan to Combat Desertification of Black Lands and Kizlyar Pastures"), *Aridnye ekosistemy*, 2018, No. 1, pp. 5–12.
23. Lazareva V. G., Bananova V. A., Nguen V. Z., Kartirovanie rastitel'nosti Sarpinskoi nizmennosti v predelakh Respubliki Kalmykiya metodami distantsionnogo zondirovaniya i GIS (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.
24. Loboiko V. F., Esmagulova B. Zh., Tkachenko N. A., Fitoekologicheskaya otsenka i lesomeliorativnoe kartografirovanie peschanogo massiva "Kandagash" Zapadno-Kazakhstanskoi oblasti respubliki Kazakhstan (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.
25. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskii A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (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.
26. Mashtykov K. V., Sezonnaya izmenchivost' rastitel'nykh soobshchestv pustynnoi zony Kalmykii (na primere plemzavoda "Ulan-Kheech" Yashkul'skogo raiona) (Seasonal variability of plant communities in the desert zone of Kalmykia (on the example of the Ulan-Kheech breeding farm in the Yashkul district)), *Vestnik instituta kompleksnykh issledovanii aridnykh territorii*, 2012, No. 2(25), pp. 45–50.
27. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Metod opredeleniya fenologicheskikh kharakteristik rastitel'nogo pokrova na osnove vremennykh ryadov sputnikovykh dannykh (Method for estimating vegetation cover phenological characteristics from satellite data time series), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 1, pp. 9–24.
28. Oparin M. L., Oparina O. S., Tsvetkova A. A., Vypas kak faktor transformatsii nazemnykh ekosistem semiaridnykh regionov (Grazing as a factor in the transformation of terrestrial ecosystems of semiarid regions), *Povolzhskii ekologicheskii zhurnal*, 2004, No. 2, pp. 183–199.

29. Pavleichik V. M., Shirotno-zonal'naya neodnorodnost' razvitiya travyanykh pozharov v Zavolzhsko-Ural'skom regione (The latitudinal-zonal heterogeneity of the development of grass fires in the Volga-Ural region), *Byulleten' Orenburgskogo nauchnogo tsentra UrO RAN*, 2019, No. 2, pp. 1–14.
30. Plotnikov D. E., Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Vosstanovlenie vremennykh ryadov dannykh distantsionnykh izmerenii metodom polinomial'noi approksimatsii v skol'zyashchem okne peremennogo razmera (Using local polynomial approximation within moving window for remote sensing data time-series smoothing and data gaps recovery), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110.
31. Radochinskaya L. P., Kladiev A. K., Rybashlykova L. P., Produktsionnyi potentsial vosstanovlennykh pastbishch Severo-Zapadnogo Prikaspiya (Production Potential of Restored Pastures of the Northwestern Caspian), *Aridnye ekosistemy*, 2019, Vol. 25, No. 1, pp. 61–68.
32. Rulev A. S., Kanishchev S. N., Shinkarenko S. S., Analiz sezonnoi dinamiki NDVI estestvennoi rastitel'nosti Zavolzh'ya Volgogradskoi oblasti (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.
33. Rybashlykova L. P., Belyaev A. I., Pugacheva A. M., Monitoring suktsessionnykh izmenenii pastbishchnykh fitotsenozov v "potukhshikh" ochagakh deflyatsii Severo-Zapadnogo Prikaspiya (Monitoring Successional Changes in Pasture Phytocenoses in "Exhausted" Areas of Deflation in the North-West Caspian Region), *Yug Rossii: ekologiya*, *razvitie*, 2019, Vol. 14, No. 4, pp. 78–85.
34. Ryabinina N. O., Kanishchev S. N., Shinkarenko S. S., Sovremennoe sostoyanie i dinamika stepnykh geosistem yugo-vostoka Russkoi ravniny (na primere prirodnykh parkov Volgogradskoi oblasti) (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*, *razvitie*, 2018, No. 1, pp. 116–127.
35. Telnova N. O., Vyyavlenie i kartografirovanie mnogoletnikh trendov NDVI dlya otsenki vklada izmenenii klimata v dinamiku biologicheskoi produktivnosti agroekosistem lesostepnoi i stepnoi zon Severnoi Evrazii (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.
36. Terekhin E. A., Sezonnaya dinamika proektivnogo pokrytiya rastitel'nosti agroekosistem na osnove spektral'noi sputnikovoi informatsii (Seasonal dynamics of the agroecosystems green vegetation fraction derived from satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 4, pp. 111–123.
37. Titlyanova A. A., Bazilevich N. I., Shmakova E. I., Snytko V. A., Dubynina S. S., Magomedova L. N., Nefed'eva L. G., Semenyuk N. V., Tishkov A. A., Ti Tran, Khakimzyanova F. I., Shatokhina N. G., Kyrgys Ch. O., Sambuu A. D., *Biologicheskaya produktivnost' travyanykh ekosistem. Geograficheskie zakonomernosti i ekologicheskie osobennosti* (Biological productivity of grasslands. Geographical regularities and ecological features), Novosibirsk: IPA SO RAN, 2018, 110 p.
38. Usmanov R. Z., Balamirzoev M. A., Kotenko M. E., Babaeva M. A., Osipova S. V., Problemy bor'by s degradatsiei i opustynivaniem Kizlyarskikh pastbishch v svyazi s aridizatsiei klimata i antropogennykh vozdeistvii na prirodnye ekosistemy (The problems of the fight with degradation and desertification Kizlyar pasture in connection with aridization of the climate and anthropogenic effect influence on natural ecologic systems), *Yug Rossii: ekologiya*, *razvitie*, 2010, No. 3, pp. 117–122.
39. Shvidenko A., Shchepashchenko D., MakKallumi Ya., *Lesa i lesnoe khozyaistvo Rossii* (Forests and forestry in Russia), Mezhdunarodnyi institut prikladnogo sistemnogo analiza i Rossiiskaya Akademiya nauk, Laxenburg, Austria, 2007, available at: http://www.iiasa.ac.atResearchFORforest_cdromindex.html.
40. Shinkarenko S. S., Otsenka dinamiki ploshchadei stepnykh pozharov v Astrakhanskoi oblasti (Assessment of steppe burning dynamics in Astrakhan Region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 138–146.
41. Shinkarenko S. S. (2019a), Pozharnyi rezhim landshaftov Severnogo Prikaspiya po dannym ochagov aktivnogo goreniya (Fire regime of North Caspian landscapes according to the data of active burning centres), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 121–133.
42. Shinkarenko S. S. (2019b), Prostranstvenno-vremennaya dinamika opustynivaniya na Chernykh zemlyakh (Spatial-temporal dynamics of desertification in Black Lands), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 155–168.
43. Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., Analiz mnogoletnei dinamiki stepnykh pozharov v Volgogradskoi oblasti (Analysis of steppe fires long-term dynamics in Volgograd Region), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 2, pp. 98–110.