

Анализ взаимосвязи структурных и спектрально-отражательных характеристик растительности аридных пастбищных ландшафтов

С. С. Шинкаренко, С. А. Баргалева

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru*

Представлены результаты сопоставления структурных (проективное покрытие, фитомасса) и спектрально-отражательных характеристик пастбищной растительности аридных ландшафтов юга Европейской части России по данным Sentinel-2 и MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer). Наземные данные получены в мае 2020–2022 гг. в Астраханской и Волгоградской областях, Ставропольском крае, республиках Калмыкия и Дагестан по стандартным геоботаническим методикам на площадках 10×10 м. Установлена значимая корреляция структурных характеристик с яркостью в каналах 10-метрового пространственно-го разрешения Sentinel-2 и вегетационными индексами NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (*англ.* Soil-Adjusted Vegetation Index), PVI (*англ.* Perpendicular Vegetation Index) и EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index). Наиболее сильная значимая корреляционная связь фитомассы ($R = 0,74$, $p < 0,001$) и проективного покрытия ($R = 0,76$, $p < 0,001$) отмечена со значениями NDVI. Группировка растительных сообществ по жизненным формам преобладающих в фитоценозах видов на многолетние злаки, полукустарнички, однолетники и эфемероиды не увеличила силу связи структурных и спектрально-отражательных характеристик. Разбивка данных по годам исследований позволила получить более тесную связь NDVI, проективного покрытия и фитомассы. Использование метода непараметрической регрессии Random forest увеличило точность определения фитомассы ($R^2 = 0,62$ против $R^2 = 0,55$), но не проективного покрытия. Добавление в качестве признаков суммы осадков за предшествующий полученным наземным данным период и коэффициентов обратного рассеяния VV- и VH-поляризации по данным Sentinel-1 не принесло повышения точности. Также в работе использовались ежедневные данные MODIS NDVI с устранённым влиянием облачности, что позволило получить значения NDVI непосредственно на даты проведения полевых исследований. Это дало возможность получить более сильную связь структурных и спектрально-отражательных характеристик по сравнению с данными Sentinel-2, разница дат которых с наземными составляла до 12 дней. Для всех типов растительности характерна отрицательная связь проективного покрытия и яркости в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, обусловленная более яркой относительно растительного покрова почвой. Таким образом, спектрально-отражательные характеристики определяются не только фотосинтезирующей фитомассой, но и степенью перекрытия почв растительностью, в том числе высушенной. Это может приводить к неопределённости и снижать силу связи между структурными и спектрально-отражательными характеристиками.

Ключевые слова: аридные ландшафты, пастбищная растительность, фитомасса, проективное покрытие, вегетационные индексы, MODIS, Sentinel-2

Одобрена к печати: 20.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-171-187

Введение

Пастбища являются очень важным типом экосистем, обеспечивающим отгонное скотоводство, а также сохранение биоразнообразия при соблюдении норм выпаса. Мониторинг состояния пастбищ и своевременное регулирование поголовья скота в зависимости от их ёмкости позволяют избежать деградации растительности. Естественные степные и пустынные экосистемы, которые используются в качестве пастбищ, депонируют углерод и способны обеспечить до 19 % стока атмосферного углерода в наземные экосистемы России (Golubyatnikov et al., 2023). В то же время оценки эмиссий при степных пожарах, а также масса поглощаемого углерода основываются на усреднённых сведениях (Bondur et al., 2022), не всегда учитывающих ландшафтные особенности России и её отдельных регионов (Akagi et al., 2011;

Andreae, 2019; Wiedinmyer et al., 2011) или недостаточно современных. При этом фитомасса степной и пустынной растительности отличается значительной сезонной и межгодовой изменчивостью (Шинкаренко, Барталев, 2020б, 2022). Например, к середине 2020 г. из-за засухи пастбищная растительность в северопустынных ландшафтах практически отсутствовала (Титкова, Золотокрылин, 2022; Шинкаренко, Барталев, 2021). По этим причинам необходима возможность ежегодного получения достоверных сведений о продуктивности пастбищной растительности.

Технологии обработки спутниковых данных позволяют проводить широкомасштабный мониторинг значительно дешевле и быстрее традиционных наземных обследований, что крайне важно в условиях продолжающихся процессов деградации на юге России (Шинкаренко и др., 2022; Kulik et al., 2015, 2020). Тем не менее, при оценках продуктивности пастбищной растительности по данным дистанционного зондирования (ДДЗ) прямые выборочные наземные измерения фитомассы и проективного покрытия растительного покрова необходимы для калибровки и верификации результатов спутниковых наблюдений. Исследование стало продолжением работы по развитию методов использования ДДЗ для оценки состояния пастбищных ландшафтов. Ранее были установлены закономерности спектрально-отражательных свойств различных типов пастбищной растительности юго-востока Европейской части России в зависимости от их видового состава и структурных характеристик (проективное покрытие, надземная биомасса) с помощью наземного спектрометрирования (Шинкаренко, Барталев, 2023). Выявленные значимые корреляционные связи фитомассы и сомкнутости с различными вегетационными индексами (ВИ) свидетельствуют о перспективности развития методов определения структурных характеристик на основе мультиспектральных спутниковых данных. По данным наземных измерений наиболее сильно с проективным покрытием и надземной биомассой связаны такие ВИ, как NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (*англ.* Soil-Adjusted Vegetation Index) и EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index), при этом NDVI является самым распространённым ВИ при исследовании состояния пастбищ (Wang et al., 2022).

Наиболее широко в исследованиях пастбищ используются ДДЗ, получаемые спутниковыми системами MODIS, Landsat-8/9 OLI (*англ.* Operational Land Imager), Sentinel-2 MSI (*англ.* MultiSpectral Instrument) (Wang et al., 2022). Высокое пространственное разрешение спутниковых изображений Sentinel-2 и Landsat даёт возможность учесть существенную пространственную неоднородность растительного покрова пастбищ в засушливых условиях (Рулев и др., 2016), но преимуществом данных MODIS представляется более высокое временное разрешение, что также важно, поскольку растительность аридных ландшафтов отличается значительной сезонной динамичностью (Шинкаренко, Барталев, 2020б). Наличие ежедневных данных MODIS с устранённым влиянием облачности (Миклашевич и др., 2019) позволяет сопоставить спектрально-отражательные характеристики и наземные данные непосредственно в день их получения. Спутниковые изображения Sentinel-2 по сравнению с Landsat имеют не только более высокое пространственное разрешение, но и временное, поэтому их использование более предпочтительно.

В работе представлены результаты сопоставления наземных измерений проективного покрытия и фитомассы растительности пастбищ юго-востока Европейской части России в 2020–2022 гг. и спектрально-отражательных характеристик по спутниковым данным MODIS и Sentinel-2 с использованием стандартных статистических методов, а также непараметрической регрессии с помощью алгоритма Random forest.

Материалы и методы исследования

Полевые исследования проводились в 2020–2022 гг. преимущественно во второй половине мая, когда отмечаются максимальные значения NDVI (Шинкаренко, Барталев, 2020б) в Волгоградской и Астраханской областях, республиках Калмыкия и Дагестан, Ставропольском крае. Расположение тестовых полигонов показано на *рис. 1* (см. с. 173).



Рис. 1. Расположение тестовых полигонов: I — государственная граница РФ; II — границы регионов; III — населённые пункты; ландшафты: IV — степные, V — полупустынные, VI — пустынные, VII — тестовые полигоны и годы обследований)

Тестовые полигоны расположены в семиаридной зоне (Золотокрылин и др., 2020), где растительность представлена опустыненными степями (полупустынями) и северными пустынями. Геоботанические исследования выполнялись по стандартной методике на площадках 10×10 м и включали: определение видового состава, ярусности, высоты, общего проектив-

ного покрытия, фенологической фазы, аспекта и проведение укосов в 3–5-кратной повторности на площадках размера 0,5×0,5 м. Геоботаническая площадка 10×10 м соответствует пикселю Sentinel-2, для расчёта показателей фитомассы и проективного покрытия на уровне пикселя MODIS использовались данные 3–5 геоботанических площадок в границах пикселя. Каждой геоботанической и укосной площадке присваивался вес от 0,1 до 0,5 в зависимости от их встречаемости, при этом сумма весов в пределах одной геоботанической площадки или полигона, соответствующего пикселю MODIS, была равна единице. Фитомасса для пикселей MODIS или геоботанических площадок, а также проективное покрытие в пикселях MODIS при этом определялись как сумма произведений этих величин на их веса в пределах полигона или площадки:

$$M_{\text{MODIS}} = \sum_{j=1}^N b_j \sum_{i=1}^K a_i \times M_i, \quad P_{\text{MODIS}} = \sum_{j=1}^N b_j \times P_{\text{Sentinel}_j},$$

где: M_{MODIS} , P_{MODIS} — значения фитомассы и проективного покрытия в пикселе MODIS; P_{Sentinel_j} — значения проективного покрытия в пикселе Sentinel-2 (на геоботанической площадке 10×10 м); M_i — значение фитомассы на укосной площадке; a , b — весовые коэффициенты; N — количество геоботанических площадок (пикселей Sentinel-2) в пикселе MODIS; K — количество укосных площадок в пикселе Sentinel-2.

Использование средневзвешенного значения по сравнению со средним по геоботанической площадке или пикселю MODIS имеет ряд преимуществ: появляется возможность учесть вариабельность распределения фитомассы, разреженность растительного покрова, а также относительно редкие фитоценозы и укосные площадки без увеличения количества измерений, что позволило существенно сократить количество укосных и геоботанических площадок для каждого пикселя MODIS и за счёт этого увеличить географический охват исследований. Схема наземных исследований представлена на *рис. 2*.

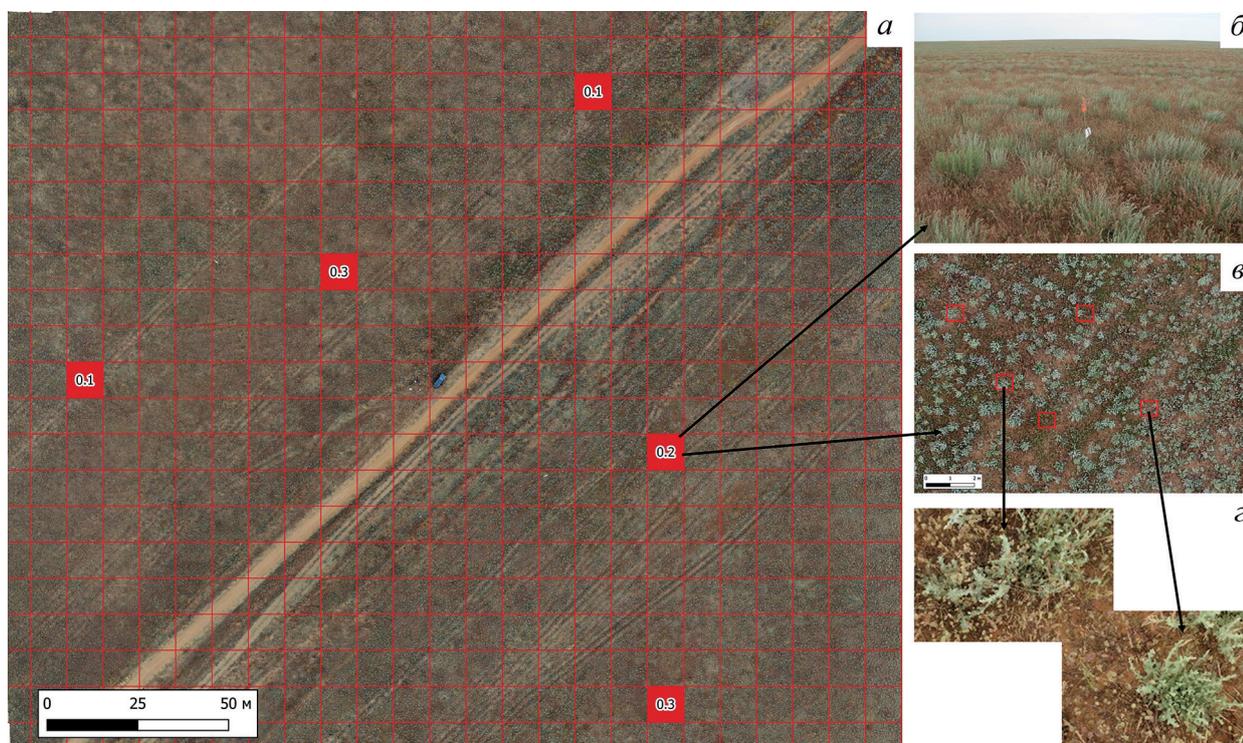


Рис. 2. Схема наземных исследований (мятликово-полынное сообщество): *а* — тестовый полигон, соответствующий пикселю MODIS, сеткой показаны пиксели Sentinel-2, красные ячейки — геоботанические площадки и их вес; *б* — наземная фотография геоботанической площадки; *в* — аэрофотография, красными квадратами показаны укосные площадки; *г* — наземные фотографии укосных площадок)

Растительные сообщества были сгруппированы по соотношению жизненных форм доминирующих видов: многолетние дерновинные злаки (ковыли, житняки, пырей), однолетники и эфемероиды (мятлик луковичный, неравноцветник кровельный, полевица малая, рогач песчаный, аистник цикutowый, гулявник, солянка сорная и др.), а также полукустарнички (полыни, пижма тысячелистниколистная, бассия простёртая, кокпек и др.). Скошенная растительная масса разделялась на мортмассу и прирост текущего года, взвешивание которых проводилось по отдельности в день скашивания, что позволяло получить более точные оценки связи сырой фитомассы и спектральных характеристик (Marabel, Alvarez-Taboada, 2013). Также в дальнейшем определялась масса укосов в воздушно-сухом состоянии. Проективное покрытие и фитомасса были определены на 182 геоботанических площадках 10×10 м с последующим сопоставлением с данными Sentinel-2 (табл. 1) и 47 пикселями MODIS. Ещё для 40 пикселей MODIS определялось только проективное покрытие.

Таблица 1. Распределение количества геоботанических площадок по преобладающим видам разных жизненных форм и годам проведения наземных наблюдений

Растительность	2020 г.	2021 г.	2022 г.	Всего:
Многолетние злаки	40	2	0	42
Однолетники и эфемероиды	4	36	23	63
Полукустарнички	18	32	3	53
Открытая почва и очень редкая растительность	8	8	8	24
Всего:	70	78	34	182

Спутниковые данные получены с помощью сервиса «Vegetation Science» (Loupian et al., 2022). Использованы спутниковые изображения Sentinel-2 на максимально близкие к наземным измерениям даты с разрешением 10 м/пиксель, что соответствует размерам стандартной геоботанической площадки. Разница дат спутниковых и наземных наблюдений составила от одного дня в Волгоградском Заволжье в 2020 г. до 12 дней на юге Астраханского Заволжья в 2022 г. Для 98 геоботанических площадок разница в датах получения наземных и спутниковых данных не превышает два дня, ещё для 38 площадок — пять дней. Для участков с очень редкой растительностью и открытыми почвами различие дат натурного обследования и спутниковых изображений некритично (24 площадки). Только для 25 геоботанических площадок отмечена разница от 5 до 12 дней.

В работе использовались как классические статистические методы, реализованные в программе MS Excel, так и алгоритм Random forest — метод непараметрической регрессии. При этом для обучения использовалось 70 % наземных измерений, а для контроля (определения точности) — 30 %. Указанные 30 % выборки не применялись для обучения модели, для них получены предсказанные значения, которые затем сравнивались с фактическими с оценкой точности на основе коэффициента детерминации R^2 . Метод Random forest с блоками подготовки спутниковых изображений, балансировки обучающей выборки, анализа точности регрессора реализован в виде скрипта на языке Python (Барталев, Хвостиков, 2023).

Наличие ежедневных данных MODIS с устранённым влиянием облачного покрова (Миклашевич и др., 2019) позволило определить значения NDVI непосредственно на даты наземных измерений. По данным MODIS рассчитывался только NDVI разрешения около 230 м/пиксель, так как другие ВИ требуют измерений в спектральных каналах, обладающих более низким пространственным разрешением.

Результаты и обсуждения

Средняя продуктивность по результатам исследований составила 5,12 т/га в сырой и 1,08 т/га в сухой массе. При учёте ветоши средняя сухая фитомасса составляет 1,2 т/га. Подобные оценки на уровне 1–2 т/га сухой и 2–7 т/га сырой наземной растительной био-

массы для территории Северо-Западного Прикаспия приводятся и в других исследованиях (Mamaenkova, Rybashlykova, 2020; Zolotokrylin et al., 2013). При этом до периода интенсификации процессов деградации в регионе масса ветоши и войлока значительно превышала зелёную фитомассу (Гасанов и др., 2023), чего не наблюдалось в 2020–2022 гг. В работе (Akagi et al., 2011), из которой широко используются коэффициенты для определения эмиссий при пожарах в разных типах наземных экосистем, приводятся оценки надземной фитомассы в сухом состоянии для пастбищ Мексики на уровне 24–40 т/га, а для пастбищ Бразилии — от 53 до 119 т/га. В исследовании (Wiedinmyer et al., 2011) приводится оценка продуктивности травянистых экосистем Восточной Европы в 16,1 т/га, а для севера Центральной Азии — 21,7 т/га. Таким образом, глобальные усреднённые оценки продуктивности травянистых экосистем во много раз превышают полученные данные на региональном уровне.

Для всех геоботанических площадок без учёта видового состава характерна значимая корреляционная связь фитомассы и проективного покрытия со спектрально-отражательными характеристиками и ВИ по данным Sentinel-2 (табл. 2).

Таблица 2. Коэффициенты корреляции проективного покрытия (числитель) и фитомассы (знаменатель) со спектрально-отражательными характеристиками по данным Sentinel-2

Растительность	Коэффициенты корреляции							
	Спектральные каналы и вегетационные индексы							
	Blue	Green	Red	NIR	NDVI	PVI	SAVI	EVI
Многолетние злаки	<i>-0,63</i>	<i>-0,55</i>	<i>-0,53</i>	<i>-0,44</i>	<i>0,63</i>	<i>0,52</i>	<i>0,57</i>	<i>0,49</i>
	-0,47	-0,49	-0,53	-0,46	0,58	0,45	0,51	0,54
Однолетники и эфемероиды	<i>-0,33</i>	<i>-0,37</i>	<i>-0,47</i>	<i>-0,26</i>	<i>0,70</i>	<i>0,61</i>	<i>0,68</i>	<i>0,39</i>
	-0,20	-0,22	-0,32	-0,16	0,71	0,62	0,68	0,23
Полукустарнички	<i>-0,59</i>	<i>-0,54</i>	<i>-0,56</i>	<i>-0,27</i>	<i>0,70</i>	<i>0,63</i>	<i>0,68</i>	<i>0,66</i>
	-0,60	-0,52	-0,52	-0,50	0,50	0,17	0,30	0,25
Всего	<i>-0,38</i>	<i>-0,45</i>	<i>-0,57</i>	<i>-0,36</i>	<i>0,76</i>	<i>0,66</i>	<i>0,73</i>	<i>0,38</i>
	-0,32	-0,38	-0,52	-0,40	0,74	0,49	0,60	0,25

Примечание: значимые коэффициенты при $p < 0,001$ выделены курсивным начертанием; Blue — синий; Green — зелёный; Red — красный.

При этом использование нелинейных функций для регрессии не дало увеличения коэффициента детерминации по сравнению с линейной. Значения NDVI для открытых почв лежат в диапазоне от 0,1 до 0,2. Наиболее сильной связью характеризуется NDVI, что подтверждается данными наземного спектрометрирования (Шинкаренко, Барталев, 2023). Сила корреляционной связи фитомассы в воздушно-сухом состоянии и NDVI значительно слабее по сравнению с сырой, но статистически значима ($R = 0,55$, $p < 0,001$). У однолетних и эфемероидных фитоценозов отсутствует связь фитомассы с коэффициентом спектральной яркости (КСЯ) в голубом, зелёном, ближнем инфракрасном (БИК) диапазонах и EVI. Также нет связи значений проективного покрытия и КСЯ в БИК-диапазоне, при том что с NDVI корреляция высокая. Для однолетних и эфемероидных растительных сообществ характерны более низкие значения NDVI и относительно высокие КСЯ во всех диапазонах по сравнению со злаками и полукустарничками при равном проективном покрытии (рис. 3, см. с. 177). Это может быть связано с завершением вегетации эфемеров в период проведения исследований, из-за чего концентрация хлорофилла и интенсивность фотосинтеза существенно снижались. Также большинство видов эфемероидов и эфемеров имеют меньшую высоту и фитомассу по сравнению с другими типами растительности, особенно это выражено в северопустынных ландшафтах, где крайне велика доля открытых почв. Значительная неоднородность почвенного покрова на территории исследований при низкой сомкнутости травостоя становится одним из источников неопределённости при сопоставлении спектраль-

но-отражательных и структурных характеристик. Злаковые сообщества встречались большей частью в Волгоградском Заволжье в 2020 г. на относительно однородных почвах, поэтому этот фактор не играл существенной роли, о чём свидетельствуют значимые коэффициенты корреляции структурных показателей злаковых фитоценозов со всеми рассмотренными спектрально-отражательными характеристиками.

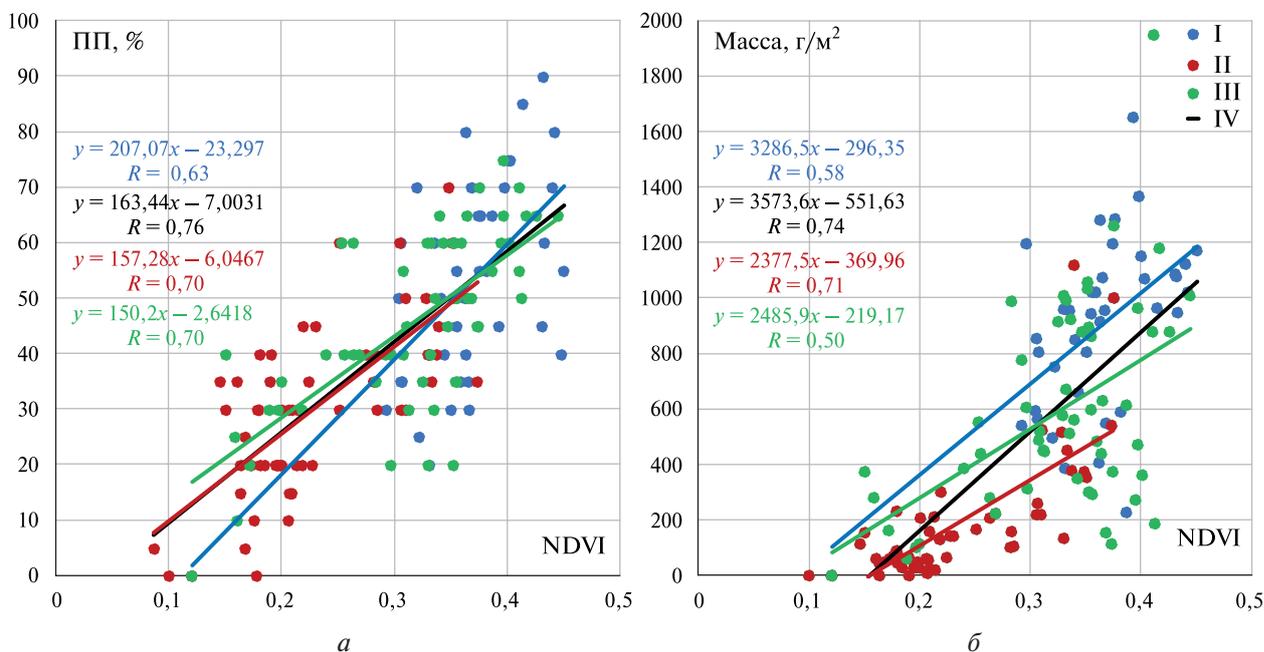


Рис. 3. Связь проективного покрытия (а) и фитомассы (б) с NDVI по данным Sentinel-2 для различных типов растительных сообществ: I — многолетние злаки; II — однолетники и эфемероиды; III — полукустарнички; IV — все измерения

Корреляционная связь отсутствует и между фитомассой полукустарничков, PVI и EVI, а также между их проективным покрытием и КСЯ в БИК-диапазоне. Может играть роль значительное разнообразие растительных сообществ, отнесённых к группам однолетников и полукустарничков, и соответствующих им почвенных разностей, которые вносят неопределённость при одних и тех же структурных характеристиках растительности. Рост проективного покрытия снижает КСЯ не только в красной области за счёт поглощения солнечного излучения хлорофиллом, но и в других диапазонах спектра из-за маскирования растительностью более яркой почвы. Увеличение альбедо земной поверхности в данном регионе рассматривается как один из индикаторов деградации (Yuferev et al., 2022; Zolotokrylin, Titkova, 2011), а также пирогенного воздействия на растительный покров на лёгких по гранулометрическому составу почвах северопустынных ландшафтов (Шинкаренко, 2021).

Разделение наземных данных по годам исследований позволяет увеличить силу корреляционной связи фитомассы, проективного покрытия и спектрально-отражательных характеристик (рис. 4, см. с. 178). При группировке растительных сообществ по годам исследований сила связи структурных и спектрально-отражательных характеристик возрастает. Например, в 2022 г. в выборку попали преимущественно сообщества однолетников и эфемероидов, что привело к усилению корреляционной связи проективного покрытия и фитомассы с NDVI ($R = 0,84$ и $0,75$ соответственно). По данным исследования А. В. Хорошева с соавторами (2023), проведённом в Оренбургском заповеднике, с ростом доли фитомассы злаков относительно разнотравья в растительных сообществах снижаются значения NDVI, но при этом с абсолютным значением их фитомассы сохраняется значимая положительная связь. Одним из объясняющих факторов выступает значительная величина мортмассы дерновинных злаков, маскирующая зелёные побеги. Подобное явление отмечено в Заволжье

Волгоградской обл. (Рулев и др., 2016). Большое влияние структурных характеристик растительности по сравнению с видовыми различиями подтверждается результатами наземного спектрометрирования (Шинкаренко, Барталев, 2023). Эти факты свидетельствуют о важности учёта значительной межгодовой изменчивости фитомассы и сомкнутости пастбищной растительности. Например, 2020 г. характеризовался засухой, что привело к деградации растительного покрова (Титкова, Золотокрылин, 2022), масштабным пыльным бурями и росту площадей открытых песков (Шинкаренко, Барталев, 2020а, 2021), последствия которых сказывались и в 2021–2022 гг. (Шинкаренко и др., 2022). В 2021 г. была велика роль однолетников на перевейанных песках, но в то же время из-за весенней засухи эфемероиды были в угнетённом состоянии, сильно снизилось обилие многолетних злаков на пастбищах северной пустыни. Нормальная по гидротермическим условиям весна 2022 г. привела к доминированию эфемероидов даже на площадках, где в 2021 г. преобладали полукустарнички.

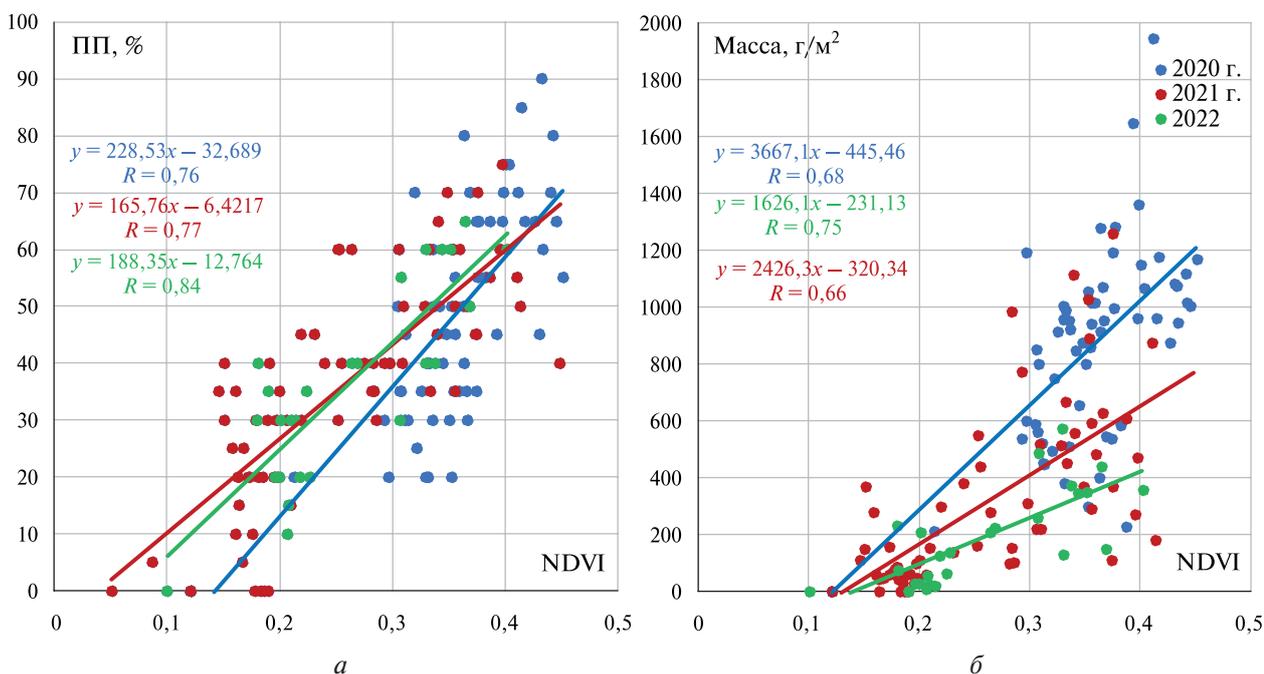


Рис. 4. Связь проективного покрытия (а) и фитомассы (б) с NDVI по данным Sentinel-2 в разные годы исследований

Высокое пространственное разрешение спутниковых данных Sentinel-2 позволяет минимизировать влияние неоднородности почвенно-растительного покрова на его спектрально-отражательные характеристики. Тем не менее, относительно низкое временное разрешение не всегда позволяет получить данные близкие к датам проводимых полевых измерений из-за повышенной облачности в весенний период. Особенно это критично в случае с быстроразвивающимися эфемерами и эфемероидами, вегетация которых может быть завершена в промежутке между датами наземных измерений и получения спутниковых изображений, что снизит значения NDVI при тех же величинах проективного покрытия и сухой фитомассы. Этим можно объяснить значительный разброс величин проективного покрытия при значениях NDVI до 0,2 (см. рис. 3). Решением подобной проблемы может стать использование композитных изображений с устранённым влиянием облачности как по данным более низкого пространственного разрешения, например MODIS (Миклашевич и др., 2019), так и по данным Sentinel-2 (Кашницкий и др., 2022). При использовании композитных изображений, полученных по данным съёмки Sentinel-2 в мае, сила корреляционной связи NDVI и проективного покрытия существенно не изменяется ($R = 0,73$ для всех площадок), в то время как связь NDVI и фитомассы становится значительно слабее ($R = 0,58$). Это свидетельствует о том, что фитомасса в течение месяца меняется быстрее проективного покрытия за счёт прироста в вы-

соту. Поэтому для картографирования проективного покрытия применение композитных изображений оправдано, но при анализе фитомассы преимущество следует отдавать данным, полученным в даты близкие к датам сбора наземной информации.

Использование ежедневных данных MODIS с устранённым влиянием облачности дало возможность получить значения NDVI непосредственно на дни проведения наземных исследований (рис. 5, б).

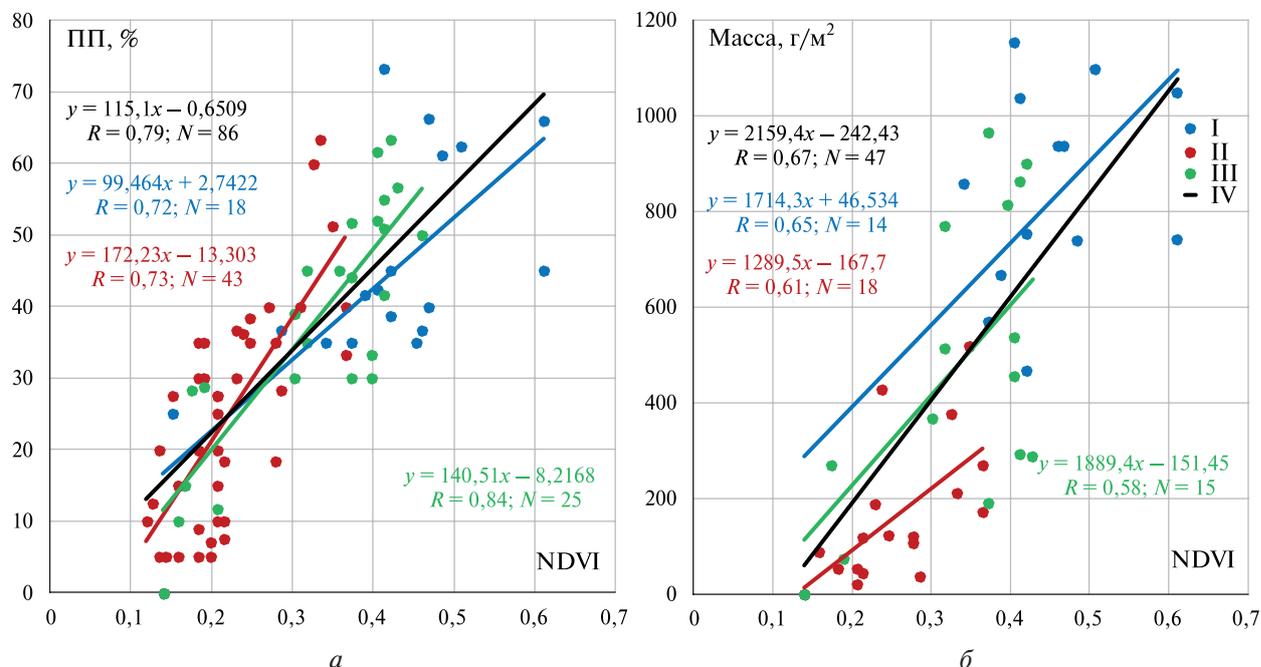


Рис. 5. Связь проективного покрытия (а) и фитомассы (б) с NDVI по данным MODIS для различных типов растительных сообществ: I — многолетние злаки; II — однолетники и эфемероиды; III — полукустарнички; IV — все измерения

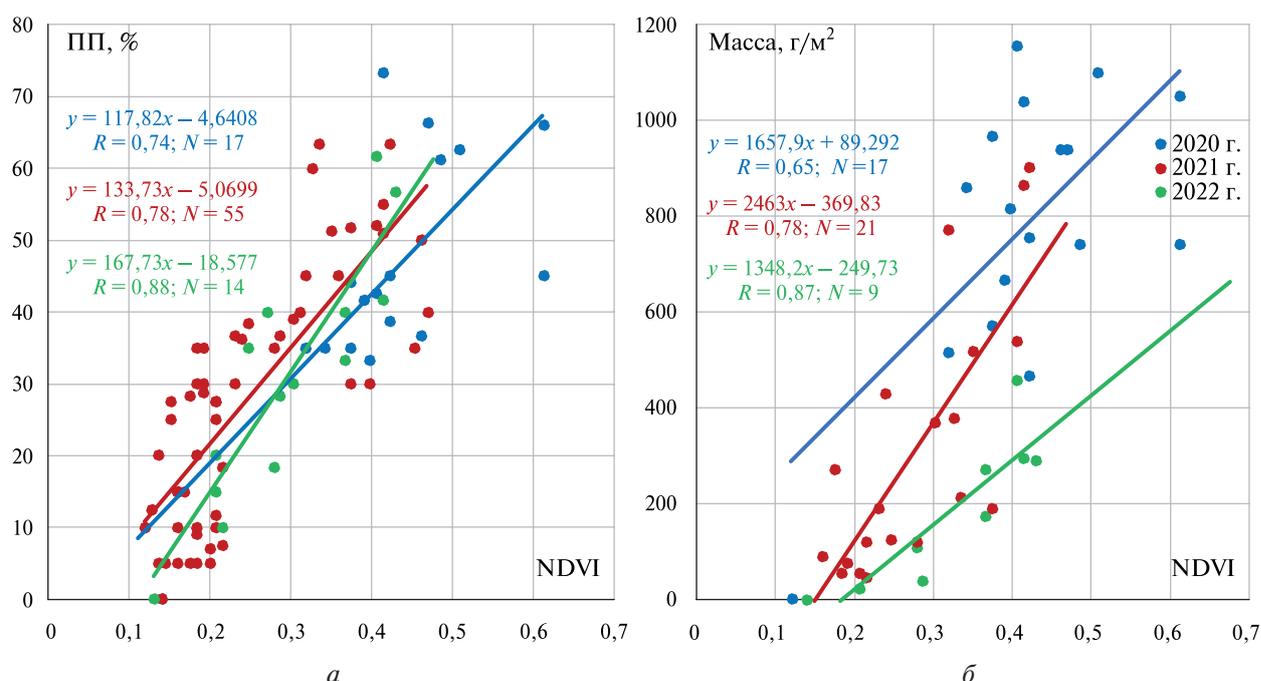


Рис. 6. Связь проективного покрытия (а) и фитомассы (б) с NDVI по данным MODIS в разные годы исследований

Это позволило увеличить силу корреляционной связи проективного покрытия и NDVI на уровне выделенных групп растительного покрова, но в случае с фитомассой существенной разницы по сравнению с использованием данных Sentinel-2 не было выявлено. Такой результат может быть связан со значительной неоднородностью растительного покрова в границах пикселей MODIS, что усугубляется большой межгодовой и сезонной изменчивостью растительности. При анализе по отдельным годам сила связи NDVI и проективного покрытия по данным MODIS практически не меняется по сравнению с Sentinel-2, но существенно растёт в случае с фитомассой однолетников и полукустарничков, доминировавших на геоботанических площадках в 2021 и 2022 гг. (см. *рис. 4, 6*).

Сила связи между структурными и спектрально-отражательными характеристиками растительности аридных пастбищных ландшафтов, а значит, и точность оценки проективного покрытия и фитомассы по спутниковым данным, зависит как от типов растительности, так и от гидротермических условий, антропогенных нагрузок, их сезонной и многолетней динамики. Это требует регулярного обновления опорных наземных данных для получения достоверных оценок при спутниковом картографировании структурных характеристик пастбищной растительности. В случае необходимости определения годовой продукции фитомассы проблему может решить проведение наземных измерений после окончания вегетации и определение сухой массы растительности с последующим сопоставлением с усреднённым или максимальным значением ВИ за вегетационный сезон (Yan et al., 2022). Тем не менее это не снимает вопрос отчуждения растительной массы домашними и дикими животными в течение вегетации, а также проблему ландшафтных пожаров. В целом точность оценок проективного покрытия и фитомассы на основе ДДЗ аридных пастбищ ниже, чем в случае с луговыми экосистемами, в том числе горными (Wang et al., 2019), что может быть связано со значительной внутригодовой изменчивостью, пространственной неоднородностью состояния травянистой растительности и её более низкой сомкнутостью в засушливых условиях (Шинкаренко, Барталев, 2020б).

В аналогичных исследованиях по определению связи структурных характеристик растительности с ДДЗ точность полученных результатов существенно различается в зависимости от территории исследований, применяемых методов и данных. Как правило, чем меньше территория исследований и больше наземных измерений, тем выше точность получаемых оценок. Например, в результате исследования, проведённого в охранной зоне Ростовского заповедника, получена связь фитомассы и NDVI при значениях коэффициента корреляции $R = 0,87$ в апреле 2009 г. и $R = 0,75$ в июне 2009 г. (Немцева и др., 2018). В работе А. Н. Золотокрылина с соавторами (Zolotokrylin et al., 2013) связь надземной фитомассы с NDVI в заповеднике «Чёрные земли» в Калмыкии характеризуется коэффициентом корреляции $R = 0,63$ по данным Landsat-7 и $R = 0,35$ по данным MODIS. В Оренбургской обл. связь между сырой фитомассой и NDVI по данным Landsat-8 умеренная: от $R = 0,38$ в мае до $R = 0,64$ и $0,67$ в июне и августе соответственно (Хорошев и др., 2023). В результате сопоставления наземных измерений фитомассы пастбищной растительности альпийских лугов Тибетского плато с ВИ получены зависимости с $R = 0,6–0,72$ по данным Landsat-8 (Quang et al., 2020) и $R = 0,72$ по данным MODIS (Chu, 2020). Аналогичные оценки приводятся и для засушливых пастбищ Ирана, где коэффициент корреляции фитомассы и NDVI составил $R = 0,75$ (Pordel et al., 2018), при этом авторы отмечают сильную связь между проективным покрытием и фитомассой. По данным работы (Wang et al., 2022), полученным для региона Внутренней Монголии в Китае, максимальная точность определения фитомассы на основе ВИ достигается аппроксимацией логарифмической функцией значений NDVI ($R^2 = 0,70$); коэффициент корреляции NDVI и фитомассы в этом исследовании составил $R = 0,80$.

Использование методов машинного обучения для установления связей между структурными и спектрально-отражательными признаками растительности, как правило, даёт более высокую точность по сравнению с аппроксимацией различными функциями, множественной линейной регрессией, методом главных компонент и другими (Wang et al., 2022). По данным исследования (Zeng et al., 2021), алгоритм Random forest имеет наибольшую точность при определении фитомассы ($R^2 = 0,70$) по сравнению с нейронными сетями, моделями

опорных векторов и алгоритмом Cubist. В исследовании наземной фитомассы Тибетского плато на основе метода Random forest и ВИ (Zeng et al., 2019) получена близкая точность ($R^2 = 0,69$), но дополнение признаков морфометрическими и гидротермическими характеристиками позволило существенно её увеличить ($R^2 = 0,86$). Использование комбинации оптических данных Sentinel-2 и радарных Sentinel-1 в исследовании пастбищ на юго-западе Китая дало точность определения фитомассы на уровне $R^2 = 0,75$ (Liu et al., 2023). Связь фитомассы и NDVI по данным MODIS на аридных пастбищах Китая в исследовании (Zhang et al., 2023) характеризуется коэффициентом корреляции $R = 0,61$. Добавление в качестве признаков вегетационных индексов SAVI и OSAVI (англ. Optimized SAVI) для регрессора Random forest позволило повысить точность определения фитомассы до $R^2 = 0,61$ на луговых и $R^2 = 0,44$ на пустынных пастбищах.

Тем не менее методы машинного обучения требуют значительно большего объёма опорных данных. В настоящем исследовании была предпринята попытка использовать алгоритм Random forest для построения модели регрессии структурных и спектрально-отражательных характеристик по данным Sentinel-2, что позволило несколько повысить точность по сравнению с линейной регрессией для фитомассы ($R^2 = 0,62$), но не для проективного покрытия ($R^2 = 0,45$). Добавление данных о суммах осадков за предшествующий наземным исследованиям период, коэффициентов обратного рассеяния на вертикально-вертикальной и вертикально-горизонтальной поляризации по данным Sentinel-1, их отношения и нормализованной разницы в качестве признаков не дало увеличения точности ни по одному из показателей. Наибольший вес при определении проективного покрытия методом Random forest имеют значения NDVI и КСЯ в голубом и красном каналах. Для определения фитомассы наиболее важны NDVI и КСЯ красного диапазона. При этом индексы PVI и SAVI, которые считаются более подходящими для картографирования разреженной растительности в условиях значительного влияния отражения почвенного покрова (Wang et al., 2019), не дают значительной прибавки точности и имеют слабый вес. Это также подтверждается и полученными значениями коэффициентов корреляции (табл. 2).

Заключение

В результате проведённого исследования определены закономерности спектрального отклика пастбищной растительности аридных ландшафтов юга Европейской части России в зависимости от их проективного покрытия и фитомассы по данным Sentinel-2 и ежедневным данным MODIS. Установлены статистически значимые корреляционные связи между этими структурными характеристиками, а также яркостью в красном диапазоне, индексами NDVI и SAVI. Для всех выделенных типов растительности (многолетние злаки, полукустарнички, однолетники и эфемероиды) наиболее информативным представляется вегетационный индекс NDVI. В условиях северных пустынь при меньшей сомкнутости полукустарничков, однолетников и эфемероидов по сравнению с многолетними злаками, преобладающими в степной зоне, при формировании спектрального отклика возрастает роль почвенного покрова. При этом для всех типов растительности характерна отрицательная связь яркости в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах, обусловленная более яркой относительно растительного покрова почвой. Таким образом, спектрально-отражательные характеристики определяются не только фотосинтезирующей фитомассой, но и степенью перекрытия почв растительностью, в том числе высохшей или угнетённой. Это может приводить к неопределённости и уменьшать силу связи между структурными и спектрально-отражательными характеристиками. В пользу этого свидетельствует бóльшая сила связи вегетационных индексов, фитомассы и проективного покрытия, полученная другими исследователями в условиях более сомкнутых луговых экосистем, по отношению к нашим результатам для условий аридных пастбищ.

Видовые различия растительности оказывают меньшее влияние на её спектрально-отражательные свойства по сравнению со структурными характеристиками, что подтверждается

результатами проведённого ранее наземного спектрометрирования. Межгодовые и внутрисезонные изменения проективного покрытия и особенно фитомассы влияют на спектрально-отражательные характеристики сильнее, чем видовые особенности растений. Использование ежедневных данных MODIS непосредственно на даты проведения наземных измерений позволило получить более сильную связь фитомассы и спектрально-отражательных характеристик по сравнению с данными Sentinel-2, которые могли быть получены через 1–12 дней. Несмотря на значительно более низкое пространственное разрешение спутниковых изображений MODIS по сравнению с Sentinel-2, в условиях значительной неоднородности растительного покрова более высокое временное разрешение является крайне важным при определении фитомассы. Также зависимость результатов от многолетних и сезонных изменений состояния растительного покрова под влиянием природных и антропогенных факторов требует регулярного обновления опорных наземных данных.

Применение метода непараметрической регрессии Random forest позволило получить более точное соотношение фитомассы и NDVI по сравнению с линейной аппроксимацией ($R^2 = 0,62$ против $R^2 = 0,55$). Но увеличения точности определения проективного покрытия с помощью этого метода достичь не удалось. Использование суммы осадков за предшествующий наземным исследованиям период и радарных данных в качестве предикторов не дало возможности увеличить точность регрессии. Ограничением для применения этого и других методов машинного обучения становится необходимость использования выборки существенно большего объёма. Таким образом, недостаточное количество наземных данных о фитомассе растительности является ограничивающим фактором для дальнейшего развития методов спутникового картографирования структурных характеристик на основе как технологий машинного обучения, так и традиционных статистических методов.

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (госрегистрация № 124060500032-7). Полевые исследования проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-35-60007). Обработка данных ДЗЗ осуществлялась с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015), развиваемого и поддерживаемого в рамках темы «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8).

Авторы благодарят за помощь в сборе наземных данных сотрудников Федерального научного центра агроэкологии, комплексных мелиораций и защитного лесоразведения РАН: В. В. Балынову, А. Н. Берденгалиеву, А. А. Васильченко, А. А. Выприцкого, Ш. Матвеева, А. В. Мелихову, С. И. Петрова, К. П. Синельникову.

Литература

1. Барталев С. А., Хвостиков С. А. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023666251 РФ. FORS-MachLearn № 2023664950. Заявл. 14.07.2023. Оpubл. 27.07.2023.
2. Гасанов Г. Н., Асварова Т. А., Гаджиев К. М. и др. Концентрация и запасы азота в почвах и травяных экосистемах Северо-Западного Прикаспия // Юг России: экология, развитие. 2023. Т. 18. № 2. С. 33–43. DOI: 10.18470/1992-1098-2023-2-33-43.
3. Золотокрылин А. Н., Черенкова Е. А., Титкова Т. Б. Аридизация засушливых земель Европейской части России и связь с засухами // Изв. Российской акад. наук. Сер. геогр. 2020. Т. 84. № 2. С. 207–217. DOI: 10.31857/S258755662002017X.
4. Кашицкий А. В., Бурцев М. А., Прошин А. А. Технология создания безоблачных композитных изображений по данным спутников серии Sentinel 2 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 76–85. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
5. 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., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллек-

- тивного 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.
6. Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Плотников Д. Е. Интерполяционный алгоритм длинных временных рядов спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. Р. 143–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
 7. Немцева Л. Д., Беспалова Л. А., Голубева Е. И., Михайлов С. И. Оценка состояния растительного покрова сухостепных ландшафтов в условиях выпаса с применением методов дистанционного зондирования Земли // Тр. Южного науч. центра Российской акад. наук. 2018. Т. 7. С. 151–164. DOI: 10.23885/1993-6621-2018-7-151-164.
 8. 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.
 9. 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.
 10. Хорошев А. В., Калмыкова О. Г., Дусаева Г. Х. Оценка индекса NDVI как источника информации о наземной фитомассе в степях // Исслед. Земли из космоса. 2023. № 3. С. 27–43. DOI: 10.31857/S020596142303003X.
 11. Шинкаренко С. С. Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 192–206. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.
 12. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. (2020а) Последствия пыльных бурь 2020 года на юге Европейской части России в сентябре–октябре 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 270–275.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Многолетняя динамика NDVI аридных пастбищных ландшафтов Европейской России и сопредельных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 108–123. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-108-123.
 16. Шинкаренко С. С., Барталев С. А. Анализ влияния видового состава, проективного покрытия и фитомассы растительности аридных пастбищных ландшафтов на их спектрально-отражательные свойства по данным наземных измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 176–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192.
 17. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Дорошенко В. В. Спутниковый мониторинг процессов опустынивания на юге Европейской России в 2019–2022 гг. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 5. С. 319–327. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327.
 18. Akagi S. K., Yokelson R. J., Wiedinmyer C. et al. Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models // Atmospheric Chemistry and Physics. 2011. V. 11. P. 4039–4072. DOI: 10.5194/acp-11-4039-2011.
 19. Andreae M. O. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning — an updated assessment // Atmospheric Chemistry and Physics. 2019. V. 19. P. 8523–8546. DOI: 10.5194/acp-19-8523-2019.
 20. Bondur V. G., Gordo K. A., Zima A. A. Satellite research of the effects of wildfires on various vegetation-cover types in Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2022. V. 58. No. 12. P. 1570–1580. DOI: 10.1134/S0001433822120076.
 21. Chu D. Aboveground biomass estimates of grassland in the North Tibet using MODIS remote sensing approaches // Applied ecology and environmental research. 2020. V. 18. No. 6. P. 7655–7672. DOI: 10.15666/aeer/1806_76557672.
 22. Golubyatnikov L. L., Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O. Estimation of carbon balance in steppe ecosystems of Russia // Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics. 2023. V. 59. No. 1. P. 63–77. DOI: 10.1134/S0001433823010048.
 23. Kulik K. N., Rulev A. S., Yuferev V. G. Geoinformation analysis of desertification dynamics in the territory of Astrakhan oblast // Arid Ecosystems. 2015. V. 5. No. 3. P. 134–141. DOI: 10.1134/S2079096115030087.

24. Kulik K. N., Petrov V. I., Yuferev V. G. et al. Geoinformational Analysis of desertification of the Northwestern Caspian // *Arid Ecosystems*. 2020. V. 10. No. 2. P. 98–105. DOI: 10.1134/S2079096120020080.
25. Liu W., Xu C., Zhang Zh. et al. Machine learning-based grassland aboveground biomass estimation and its response to climate variation in Southwest China // *Frontiers in Ecology and Evolution*. 2023. V. 11. Article 1146850. DOI: 10.3389/fevo.2023.1146850.
26. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
27. Manaenkov A. S., Rybashlykova L. P. Increasing the efficiency of plant-cover restoration in the modern focus of deflation on pastures of the Northwestern Caspian region // *Arid Ecosystems*. 2020. V. 10. No. 4. P. 358–367. DOI: 10.1134/S2079096120040149.
28. Marabel M, Alvarez-Taboada F. Spectroscopic determination of aboveground biomass in grasslands using spectral transformations, support vector machine and partial least squares regression // *Sensors*. 2013. V. 13. No. 8. P. 10027–10051. DOI: 10.3390/s130810027.
29. Pordel F., Ebrahimi A., Azizi Z. Canopy cover or remotely sensed vegetation index, explanatory variables of above-ground biomass in an arid rangeland, Iran // *J. Arid Land*. 2018. V. 10. P. 767–780. DOI: 10.1007/s40333-018-0017-y.
30. Quang Q., Yuan Qz., Han Jc. et al. A remote sensing monitoring method for alpine grasslands desertification in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau // *J. Mountain Science*. 2020. V. 17. P. 1423–1437 DOI: 10.1007/s11629-020-5986-6.
31. Wang G., Liu Sh., Liu T. et al. Modelling above-ground biomass based on vegetation indexes: a modified approach for biomass estimation in semi-arid grasslands // *Intern. J. Remote Sensing*. 2019. V. 40. Iss. 10. P. 3835–3854. DOI: 10.1080/01431161.2018.1553319.
32. Wang Z., Ma Y., Zhang Y., Shang J. Review of Remote Sensing Applications in Grassland Monitoring // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. No. 12. Article 2903. DOI: 10.3390/rs14122903.
33. Wiedinmyer C., Akagi S. K., Yokelson R. J. et al. The Fire INventory from NCAR (FINN): a high-resolution global model to estimate the emissions from open burning // *Geoscientific Model Development*. 2011. V. 4. P. 625–641. DOI: 10.5194/gmd-4-625-2011.
34. 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. Article 108611. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108611.
35. Yuferev V. G., Tkachenko N. A., Sinelnikova K. P. Spectral Characteristics of Desertified Black-Earth Pastures // *Arid Ecosystems*. 2022. V. 12. No. 1. P. 54–60. DOI: 10.1134/S2079096122010152.
36. Zeng N., Ren X., He H. et al. Estimating grassland aboveground biomass on the Tibetan Plateau using a random forest algorithm // *Ecological Indicators*. 2019. V. 102. P. 479–487. DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.02.023.
37. Zeng N., Ren X., He H. et al. Estimating the grassland aboveground biomass in the Three-River Headwater Region of China using machine learning and Bayesian model averaging // *Environmental Research Letters*. 2021. V. 16. No. 11. Article 114020. DOI: 10.1088/1748-9326/ac2e85.
38. Zhang R. P., Zhou J. H., Guo J. et al. Inversion models of aboveground grassland biomass in Xinjiang based on multisource data // *Frontiers in Plant Science*. 2023. V. 14. Article 1152432. DOI: 10.3389/fpls.2023.1152432.
39. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B. A new approach to the monitoring of desertification centers // *Arid Ecosystems*. 2011. V. 1. No. 3. P. 125–140. DOI: 10.1134/S2079096111030127.
40. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Ulanova S. S., Fedorova N. L. Ground-based and satellite investigation of production of pastures in Kalmykia that vary in degree of vegetation degradation // *Arid Ecosystems*. 2013. V. 3. No. 4. P. 212–219. DOI: 10.1134/S2079096113040136.

Analysis of the relationship between structural and spectral-reflective characteristics of vegetation in arid grassland landscapes

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

Email: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

The article presents the results of comparing structural (canopy, above-ground phytomass) and spectral reflectance characteristics of pasture vegetation in arid landscapes of the southern European part of Russia using Sentinel-2 and MODIS data. Ground data were obtained in May 2020–2022 in the Astrakhan and Volgograd regions, Stavropol Krai, Republics of Kalmykia and Dagestan using standard geobotanical methods on 10×10 m plots. A significant correlation was found between the structural characteristics and brightness of 10-meter spatial resolution Sentinel-2 data, as well as vegetation indices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil-Adjusted Vegetation Index), PVI (Perpendicular Vegetation Index) and EVI (Enhanced Vegetation Index). The strongest significant correlation was observed between phytomass ($R = 0.74$, $p < 0.001$) and projective cover ($R = 0.76$, $p < 0.001$) with NDVI values. The division of vegetation into life forms of dominant species in phytocenoses, such as perennial grasses, subshrubs, annuals, and ephemerals, did not increase the strength of the correlation between structural and spectral reflectance characteristics. The separation of data by years of study allowed establishing a closer relationship between NDVI, canopy, and phytomass. The use of the non-parametric regression Random forest method increased the accuracy of phytomass determination ($R^2 = 0.62$ and $R^2 = 0.55$) rather than projective cover. Adding such features as precipitation sums for the period preceding the obtained ground data and coefficients of VV- and VH-polarization backscatter from Sentinel-1 data did not improve the accuracy. Additionally, daily MODIS NDVI data with cloudiness influence removed were used in the study, thus helping to obtain NDVI values directly on the dates of field research. This provided a stronger correlation between structural and spectral reflectance characteristics compared to Sentinel-2 data, which had a time difference of up to 12 days compared to ground data. For all types of vegetation, a negative correlation with brightness in the visible and near-infrared ranges was observed, for the soil was brighter than the vegetation cover. Thus, spectral reflectance characteristics are determined not only by photosynthesizing phytomass but also by the degree of soil overlap with vegetation, including dried-up one. This may lead to uncertainties and weaken the correlation between structural and spectral reflectance characteristics.

Keywords: arid landscapes, pasture vegetation, spectrometry, vegetation indices, MODIS, Sentinel-2

Accepted: 20.05.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-171-187

References

1. Bartalev S. A., Khvostikov S. A., *Certificate of state registration of a computer program No. 2023666251 Russian Federation, FORS-MachLearn*, No. 2023664950, statement 07.14.2023, publ. 07.27.2023.
2. Gasanov G. N., Asvarova T. A., Gadzhiev K. M. et al., Concentration and reserves of nitrogen in soils and plant matter in blocks of grass ecosystems of the North-Western Precaspian region, Russia, *South of Russia: ecology, development*, 2023, Vol. 18, No. 2, pp. 33–43 (in Russian), DOI: 10.18470/1992-1098-2023-2-33-43.
3. 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.
4. Kashnitskii A. V., Burtsev M. A., Proshin A. A., Technology to create cloud-free composites from Sentinel-2 satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 76–85 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-76-85.
5. 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).

6. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Interpolation algorithm for the recovery of long satellite data time series of vegetation cover observation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 143–154 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
7. Nemtseva L. D., Bepalova L. A., Golubeva E. I., Mikhailov S. I., Assessment of the status of vegetation cover of dry steppe landscapes under the conditions of cattle grazing applying the methods of remote sensing of The Earth, *Trudy Yuzhnogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*, 2018, Vol. 7, pp. 151–164 (in Russian), DOI: 10.23885/1993-6621-2018-7-151-164.
8. 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.
9. 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.
10. Khoroshev A. V., Kalmykova O. G., Dusaeva G. Kh., Evaluation of the NDVI index as a source of information on aboveground phytomass in steppes, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2023, No. 3, pp. 27–43 (in Russian), DOI: 10.31857/S020596142303003X.
11. Shinkarenko S. S., Changes in spectral reflectance characteristics of the Northern Caspian zonal landscapes under pyrogenic influence, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 192–206 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-192-206.
12. 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 zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 7, pp. 270–275 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-7-270-275.
13. 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.
14. 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.
15. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Long-term arid pasture landscapes NDVI dynamics in European Russia and adjacent territories, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 6, pp. 108–123 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-108-123.
16. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Analysis of the influence of species composition, projective cover, and phytomass of arid landscape pasture vegetation on spectral reflectance properties based on ground measurements, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 3, pp. 176–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192.
17. Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., Bartalev S. A., Doroshenko V. V., Satellite monitoring of desertification processes in the south of European Russia in 2019–2022, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 5, pp. 319–327 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-5-319-327.
18. Akagi S. K., Yokelson R. J., Wiedinmyer C. et al., Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2011, Vol. 11, pp. 4039–4072, DOI: 10.5194/acp-11-4039-2011.
19. Andreae M. O., Emission of trace gases and aerosols from biomass burning — an updated assessment, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, Vol. 19, pp. 8523–8546, DOI: 10.5194/acp-19-8523-2019.
20. Bondur V. G., Gordo K. A., Zima A. A., Satellite research of the effects of wildfires on various vegetation-cover types in Russia, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2022, Vol. 58, No. 12, pp. 1570–1580, DOI: 10.1134/S0001433822120076.
21. Chu D., Aboveground biomass estimates of grassland in the North Tibet using MODIS remote sensing approaches, *Applied Ecology and Environmental Research*, 2020, Vol. 18, No. 6, pp. 7655–7672, DOI: 10.15666/aer/1806_76557672.
22. Golubyatnikov L. L., Kurganova I. N., Lopes de Gerenyu V. O., Estimation of Carbon Balance in Steppe Ecosystems of Russia, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2023, Vol. 59, No. 1, pp. 63–77, DOI: 10.1134/S0001433823010048.
23. Kulik K. N., Rulev A. S., Yuferev V. G., Geoinformation analysis of desertification dynamics in the territory of Astrakhan oblast, *Arid Ecosystems*, 2015, Vol. 5, No. 3, pp. 134–141, DOI: 10.1134/S2079096115030087.
24. Kulik K. N., Petrov V. I., Yuferev V. G. et al., Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, No. 2, pp. 98–105, DOI: 10.1134/S2079096120020080.
25. Liu W., Xu C., Zhang Zh. et al., Machine learning-based grassland aboveground biomass estimation and its response to climate variation in Southwest China, *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2023, Vol. 11, Article 1146850, DOI: 10.3389/fevo.2023.1146850.

26. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
27. Manaenkov A. S., Rybashlykova L. P., Increasing the efficiency of plant-cover restoration in the modern focus of deflation on pastures of the Northwestern Caspian Region, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, No. 4, pp. 358–367, DOI: 10.1134/S2079096120040149.
28. Marabel M., Alvarez-Taboada F., Spectroscopic determination of aboveground biomass in grasslands using spectral transformations, support vector machine and partial least squares regression, *Sensors*, 2013, Vol. 13, No. 8, pp. 10027–10051, DOI: 10.3390/s130810027.
29. Pordel F., Ebrahimi A., Azizi Z., Canopy cover or remotely sensed vegetation index, explanatory variables of above-ground biomass in an arid rangeland, Iran, *J. Arid Land*, 2018, Vol. 10, pp. 767–780, DOI: 10.1007/s40333-018-0017-y.
30. Quang Q., Yuan Qz., Han Jc. et al., A remote sensing monitoring method for alpine grasslands desertification in the eastern Qinghai-Tibetan Plateau, *J. Mountain Science*, 2020, Vol. 17, pp. 1423–1437, DOI: 10.1007/s11629-020-5986-6.
31. Wang G., Liu Sh., Liu T. et al., Modelling above-ground biomass based on vegetation indexes: a modified approach for biomass estimation in semi-arid, *Intern. J. Remote Sensing*, 2019, Vol. 40, Issue 10, pp. 3835–3854, DOI: 10.1080/01431161.2018.1553319.
32. Wang Z., Ma Y., Zhang Y., Shang J., Review of Remote Sensing Applications in Grassland Monitoring, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 12, Article 2903, DOI: 10.3390/rs14122903.
33. Wiedinmyer C., Akagi S. K., Yokelson R. J. et al., The Fire INventory from NCAR (FINN): a high-resolution global model to estimate the emissions from open burning, *Geoscientific Model Development*, 2011, Vol. 4, pp. 625–641, DOI: 10.5194/gmd-4-625-2011.
34. 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, Article 108611, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108611.
35. Yuferev V. G., Tkachenko N. A., Sinelnikova K. P., Spectral Characteristics of Desertified Black-Earth Pastures, *Arid Ecosystems*, 2022, Vol. 12, No. 1, pp. 54–60, DOI: 10.1134/S2079096122010152.
36. Zeng N., Ren X., He H. et al., Estimating grassland aboveground biomass on the Tibetan Plateau using a random forest algorithm, *Ecological Indicators*, 2019, Vol. 102, pp. 479–487, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.02.023.
37. Zeng N., Ren X., He H. et al., Estimating the grassland aboveground biomass in the Three-River Headwater Region of China using machine learning and Bayesian model averaging, *Environmental Research Letters*, 2021, Vol. 16, No. 11, Article 114020, DOI: 10.1088/1748-9326/ac2e85.
38. Zhang R. P., Zhou J. H., Guo J. et al., Inversion models of aboveground grassland biomass in Xinjiang based on multisource data, *Frontiers in Plant Science*, 2023, Vol. 14, Article 1152432, DOI: 10.3389/fpls.2023.1152432.
39. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., A new approach to the monitoring of desertification centers, *Arid ecosystems*, 2011, Vol. 1, No. 3, pp. 125–140, DOI: 10.1134/S2079096111030127.
40. Zolotokrylin A. N., Titkova T. B., Ulanova S. S., Fedorova N. L., Ground-based and satellite investigation of production of pastures in Kalmykia that vary in degree of vegetation degradation, *Arid Ecosystems*, 2013, Vol. 3, No. 4, pp. 212–219, DOI: 10.1134/S2079096113040136.