Анализ влияния видового состава, проективного покрытия и фитомассы растительности аридных пастбищных ландшафтов на их спектрально-отражательные свойства по данным наземных измерений

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев

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

Проблема интенсификации деградации пастбищ юга европейской части России, вызванная неблагоприятными гидротермическими условиями и нерегулируемым поголовьем домашнего скота, требует разработки подходов к определению ёмкости кормовых угодий методами дистанционного зондирования Земли. Спектрально-отражательные свойства растительности определяются её видовыми, структурными, фенологическими, биофизическими и биохимическими характеристиками. При этом закономерности влияния этих показателей на спектральный отклик имеют региональную специфику, во многом определяемую почвенным покровом. В этой связи важно расширение регионального охвата исследований спектрально-отражательных свойств различных типов растительности. Данное исследование посвящено определению спектрально-отражательных свойств растительности естественных зональных пастбищ юга европейской России на основе геоботанических исследований и полевого спектрометрирования прибором PSR-1100f диапазона 320–1100 нм. Наземные работы выполнялись в мае (период максимальной зелёной массы растительности) 2020–2022 гг. на территории естественных зональных пастбищ Астраханской, Волгоградской областей, Ставропольского края, республик Дагестан и Калмыкия. Установлены значимые различия между дерновинными злаками, полукустарничками и однолетниками в видимой и ближней ультрафиолетовой областях спектра. Изменение проективного покрытия при прочих равных условиях наиболее существенно изменяет спектральные свойства в диапазоне 660–670 нм, что согласуется с результатами других исследователей. Выявлены вегетационные индексы, наиболее подходящие для определения проективного покрытия и надземной биомассы пастбищных фитоценозов с доминированием различных видов. Продолжение исследований позволит перейти от точечных измерений спектрально-отражательных и структурных характеристик растительности к спутниковым данным различного пространственного разрешения.

Ключевые слова: аридные ландшафты, пастбищная растительность, спектрометрирование, вегетационные индексы

Одобрена к печати: 15.05.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192

Введение

Естественные пастбищные ландшафты имеют большую ценность, поскольку не только служат источником корма для домашнего скота, но и позволяют сохранять биоразнообразие. При правильном использовании пастбища становятся практически неистощимым источником кормовых ресурсов. На территории России естественные пастбища в большей степени представлены на юге страны, где из-за климатических условий земледелие экономически не оправдано. В последние годы из-за неблагоприятных гидротермических условий и нерегулируемого поголовья домашнего скота интенсифицировались процессы деградации пастбищных ландшафтов вплоть до полного лишения растительного покрова (Шинкаренко, Барталев, 2021; Kulik et al., 2015; 2020). Это актуализирует проблему оценки состояния пастбищ, включающей определение их продуктивности. Кроме расчёта пастбищной ёмкости сведения о фитомассе и её динамике важны для понимания циклов углерода в травянистых экосистемах.

Для картографирования фитомассы пастбищ достаточно широко используются методы дистанционного зондирования Земли на основе спутниковых систем (Wang et al., 2022)

или аэросъёмки (Bazzo et al., 2023). В то же время такие исследования должны опираться на достаточное количество наземных измерений проективного покрытия и фитомассы (Виноградов, 1996). Сопоставление показателей измеренной фитомассы, спектрально-отражательных характеристик, различных вегетационных индексов, определяемых по данным дистанционного зондирования, позволяет разработать модели их связи (Барталев и др., 2016). Спектрально-отражательные свойства растительного покрова могут выступать в качестве признаков не только структурных показателей (проективное покрытие, биомасса), но и видового состава, фенологических фаз и других характеристик (Брейдо и др., 1989; Ерошенко и др., 2018; Рачкулик, Ситникова, 1981). Например, широко применяемый вегетационный индекс NDVI (*англ*. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), определяемый как нормализованная разница коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в ближней инфракрасной и красной областях спектра, коррелирует с величиной фотосинтезирующей фитомассы и наиболее часто используется для оценок фитомассы по спутниковым данным (Wang et al., 2022). Сочетание наземных данных о видовом составе, фитомассе, проективном покрытии растительности с информацией о спектрально-отражательных свойствах и вегетационных индексах позволяет получить модели взаимосвязи этих характеристик (Thornley et al., 2023).

Большая часть исследований связи спектрально-отражательных характеристик с продуктивностью, содержанием хлорофилла, воды и элементов питания в листьях как по наземным, так и дистанционным данным относится к сельскохозяйственной (например, (Андрианова, Тарчевский, 2000; Ерошенко и др., 2016; Терехин, 2021; Sid'ko et al., 2017)) и древесной (Thornley et al., 2023) растительности. Исследования естественной пастбищной растительности, как правило, ограничены по территории и количеству видов (например, (Кононова и др., 2019; Yuferev et al., 2022)) либо проводятся на уровне отдельных листьев (в том числе контактными методами), что не даёт представления о спектрально-отражательных характеристиках растительного покрова в целом с учётом влияния отражения почвы (Кремнева и др., 2020; Thornley et al., 2022).

Спектрально-отражательные свойства растительности существенно зависят не только от её видового состава и биохимических характеристик, но и от структурных и фенологических особенностей, а также специфики почвенного покрова (Peng et al., 2019). Из-за этого задача установления связей между свойствами растительного покрова и его спектрально-отражательными характеристиками представляется многофункциональной проблемой, решения которой обладают региональной спецификой и зачастую имеют более низкую точность при переносе в другие почвенно-климатические условия (Guo et al., 2023; Lu et al., 2018). Отмечается недостаток исследований спектрально-отражательных характеристик пастбищной растительности засушливых регионов (Thornley et al., 2023). Одним из методов определения связей между структурными и спектрально-отражательными характеристиками разных видов растений выступает полевое наземное спектрометрирование, преимущество которого состоит в возможности измерений отражённого излучения растительного и почвенного покрова различного проективного покрытия и видового состава. При этом исследования *in situ* позволяют точно идентифицировать растения, провести измерения проективного покрытия и фитомассы непосредственно при спектрометрировании.

Цель исследований заключается в определении закономерностей спектрально-отражательных характеристик наиболее распространённых растительных сообществ пастбищ юга европейской России в зависимости от их проективного покрытия и фитомассы на основе наземных измерений с использованием полевого спектрометра.

Объект, материалы и методы исследования

Полевые исследования проводились в 2020–2022 гг. в мае — в период максимального развития зелёной фитомассы растений-эдификаторов, когда вегетация большинства эфемеров и эфемероидов заканчивается (Шинкаренко, Барталев, 2020б). В 2020 г. в южных регионах

территории исследований из-за засухи на пастбищах практически отсутствовала вегетирующая растительность (Титкова, Золотокрылин, 2022; Шинкаренко, Барталев, 2020а), поэтому в этот год исследования проективного покрытия и продуктивности растительного покрова проводились только в волгоградском Заволжье. В 2021 и 2022 гг. территория исследований включала Астраханскую обл., республики Калмыкия и Дагестан, Ставропольский край. Расположение тестовых полигонов показано на *рис. 1.*

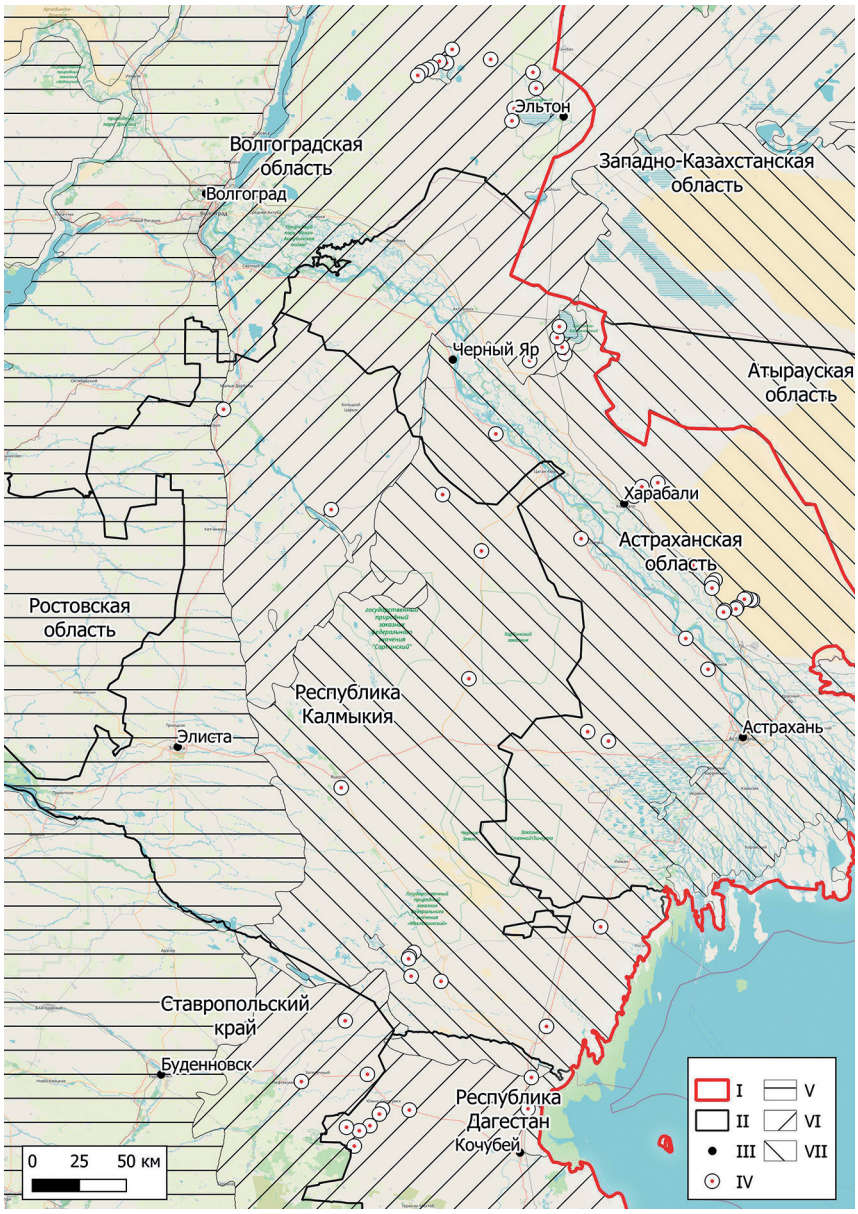

Рис. 1. Расположение тестовых полигонов. I — государственная граница РФ, II — границы регионов, III — населённые пункты, IV — геоботанические площадки; ландшафты: V — степные, VI — полупустынные, VII — пустынные

Территория исследования расположена в зоне полупустынь (опустыненных степей) и северных пустынь. Растительный покров представлен сообществами с доминированием дерновинных злаков (житняков (*Agropyron desertorum*, *A. fragile*), ковылей (*Stipa lessingiana*, *S. capillata*, *S. sareptana*), типчака (*Festuca valesiaca*)), полукустарничков и полукустарников (например, полыней (*Artemisia lercheana*, *A. pauciflora*, *A. taurica*, *A. arenaria*), прутняка (*Bassia prostrata*), верблюжьей колючки (*Alhagi pseudalhagi*)), эфемероидов (мятлик луковичный (*Poa bulbosa*)),

многолетних трав (пижма (ромашник) тысячелистниколистная (*Tanacetum achilleifolium*), гармала (*Peganum harmala*) и др.) и однолетников (солянки сорной (*Salsola tragus*), рогача песчаного (*Ceratocarpus arenarius*), ржи дикой (*Secale sylvestre*), неравноцветника (*Anisantha tectorum*), мортука (*Eremopyrum triticeum*, *E. orientale*), полевички (*Eragrostis minor*), некоторых галофитов (климакоптера мясистая (*Climacoptera crassa*), пьянковия супротиволистная (*Pyankovia brachiate*) и др.) (Лазарева и др., 2017; Manaenkov, Rybashlykova, 2020; Vlasenko et al., 2019).

Геоботанические исследования выполнялись по стандартной методике на площадках 10×10 м и включали: определение видового состава, ярусности, высоты, проективного покрытия, фенологической фазы, аспекта, обилия растительности и укосы в 3–5-кратной повторности на площадках размера 0,5×0,5 м. Каждая укосная площадка была сфотографирована камерой Canon 600D с фокусным расстоянием 50 мм (80 мм в пересчёте в эквивалент 35 мм кадра) с высоты 1 м в надир, что примерно соответствует углу обзора линзы использованного спектрометра (*рис. 2*). Далее по цветовым признакам на фотографиях выделялась вегетирующая растительность и определялось её проективное покрытие с шагом 5 %. Скошенная растительная масса разделялась на сухую и зелёную фракции, взвешивание которых производилось по отдельности в день скашивания, что позволяет получить более точные оценки связи сырой фитомассы и спектральных характеристик (Marabel, Alvarez-Taboada, 2013). Также в дальнейшем определялась масса укосов в воздушно-сухом состоянии. Всего было осуществлено 712 измерений проективного покрытия и 247 измерений фитомассы.

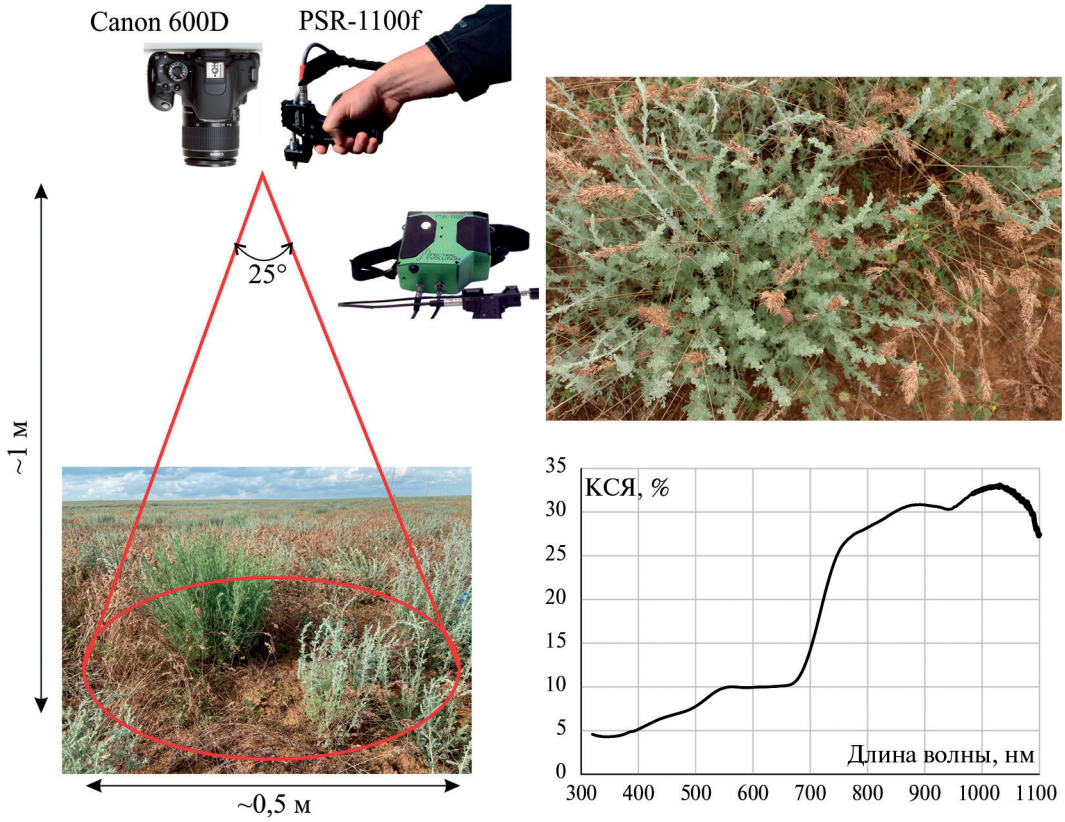

Рис. 2. Схема полевого спектрометрирования и фотофиксации укосных площадок

Спектрально-отражательные свойства укосных площадок определялись с помощью полевого спектрометра PSR-1100f, имеющего диапазон 320–1100 нм, спектральное разрешение 3 нм и шаг сканирования 1,5 нм. На выходе получаются файлы со значениями отражённой и приходящей энергии и их отношения в процентах (КСЯ) с шагом 1 нм. Перед каждым измерением осуществлялась калибровка спектрометра с помощью отражательной панели с 95%-м альбедо. Спектрометрирование проводилось в период с 10:00 до 14:00 мест-

ного времени в надир с высоты 1 м. Использовалась линза с углом обзора 25°; таким образом, пятно сканирования на земле имело диаметр 45–50 см, что соответствует размеру укосных площадок. Поверхность почвы в период исследований находилась в воздушно-сухом состоянии. Обработка данных спектрометрирования проводилась с помощью программы DARWin SP, поставляемой вместе с прибором. Программа позволяет получать кривые КСЯ по всему спектру длин волн (см. *рис. 2*), а также, используя спектральные диапазоны различных спутниковых систем, рассчитывать вегетационные индексы (ВИ): NDVI, SAVI (*англ.* Soil-Adjusted Vegetation Index — индекс растительности с коррекцией по почве), EVI (*англ.* Enhanced Vegetation Index — усовершенствованный вегетационный индекс), IPVI (*англ.* Infrared Percentage Vegetation Index — инфракрасный вегетационный индекс), MSAVI2 (*англ.* Modified Soil-Adjusted Vegetation Index — модифицированный индекс растительности с коррекцией по почве) и др. В данной работе ВИ рассчитывались по спектральным диапазонам Sentinel-2A.

Влияние видового состава растительности на спектрально-отражательные характеристики пастбищ

Для анализа спектрально-отражательных характеристик разных видов растений были выбраны измерения площадок с проективным покрытием более 50 %, чтобы снизить влияние почвенного покрова. Также для этих целей была проведена группировка по тестовым полигонам. Использовались данные, полученные с разницей не более 1–2 дней, чтобы минимизировать влияние фенологических изменений и погоды. Растительный покров пустынной зоны характеризуется значительно меньшей сомкнутостью по сравнению с полупустынной: без учёта эфемеров и эфемероидов проективное покрытие здесь редко превышает 50–55 %, из-за чего различия в спектральных свойствах почвенного покрова могут быть более существенны, чем растительного (Gunin et al., 2019). Поэтому было отобрано 96 спектрограмм в Заволжье Волгоградской (26–28 мая 2020 г., пастбища в природном парк «Эльтонский» и окрестностях, полупустыня) и Астраханской (27–29 мая 2021 г., пастбища в окрестностях заповедника «Богдинско-Баскунчакский», переход от полупустыни к северной пустыне) областей. Среднее проективное покрытие растительности на проанализированных площадках составило 65 %, зелёная фитомасса — от 200 до 800 г/м^2; отбирались измерения, проведённые преимущественно в безоблачную погоду.

Наиболее сильно разница между растительностью выражена в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах, достигая 30–35 % у полыни Лерхе и дерновинных злаков (*рис. 3а*, см. с. 181) и более 60 % у однолетнего рогача песчаного и дерновинных злаков (*рис. 3б*). При этом значимые различия КСЯ между дерновинно-злаковой растительностью двух тестовых полигонов наблюдаются только в диапазоне 320–400 нм, а между полукустарничками различия не выражены. Таким образом, несовпадение дат проведённых полевых измерений на тестовых полигонах не вызвало значимых различий между ними в видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Различия КСЯ разных жизненных форм растений также подтверждаются исследованием (Hacker et al., 2022), проведённым в пастбищно-лесных ландшафтах Северной Америки: на уровне КСЯ отдельных листьев виды одной жизненной формы не различаются между собой по сравнению с разными. По данным работы (Peng et al., 2019), на песчаных пастбищах Северного Китая наиболее сильно с видовым разнообразием сообществ связаны КСЯ в диапазонах спектра 420–480 и 760–900 нм, тем не менее достоверность полученных моделей на уровне $R^2 = 0{,}2–0{,}3$ свидетельствует о достаточно слабой связи. На юго-востоке Австралии более сильная связь спектрально-отражательных свойств по данным гиперспектральной спутниковой системы DESIS (*англ.* DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer, DLR — *нем.* Deutsches Zentrum für Luft — und Raumfahrt e.V.) и видового разнообразия характерна для синего, красного диапазонов и красного края спектра ($r = 0{,}62–0{,}71$), в то время как в зелёной и ближней инфракрасной областях связь выражена хуже (Guo et al., 2023).

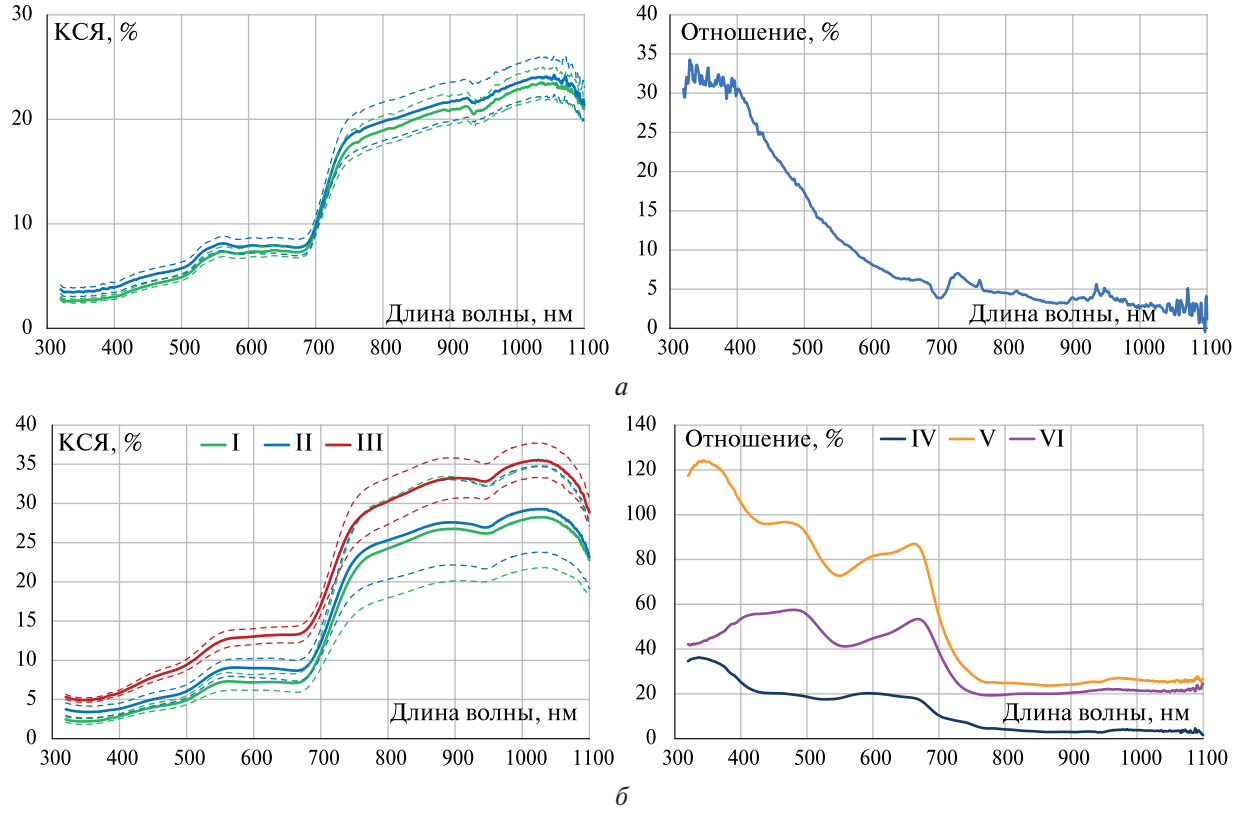

Рис. 3. Спектрально-отражательные характеристики растительности разных жизненных форм и отношение их КСЯ: *а* — природный парк «Эльтонский»; *б* — окрестности заповедника «Богдинско-Баскунчакский». I — дерновинные злаки, II — полукустарнички, III — однолетники, IV — отношение КСЯ полукустарничков и злаков, V — отношение КСЯ однолетников и злаков, VI — отношение однолетников и полукустарничков; пунктиром показан доверительный интервал при $p < 0{,}05$

Хлорофилл наиболее сильно поглощает излучение в диапазонах 400–450 и 640–710 нм (Scheer, 2022), также на спектрально-отражательные характеристики оказывают влияние и другие пигменты. Интенсивность фотосинтеза может зависеть от температуры воздуха, энергии солнечного излучения, доступности влаги и минерального питания. Так, КСЯ на длине волны 680 нм злака бутелуа изящной (*Bouteloua gracilis*) снижается при росте содержания воды и хлорофилла в листьях, достаточно быстро достигая насыщения на уровне 5–6 %, в то время как КСЯ на длине волны 775 нм увеличивается и не достигает насыщения даже после превышения значений концентрации воды и хлорофилла 28–30 % (Tucker, 1977).

На спектрально-отражательные характеристики растений существенно влияет их светоотражающая способность, так как растения с более блестящими листьями сильнее отражают, особенно в видимой области (Thornley et al., 2022). Растительность пустынного типа, к которой относятся исследованные полукустарнички и однолетник рогач песчаный, имеют ряд морфологических и физиологических приспособлений для защиты от чрезмерной инсоляции и высокой температуры: светлую окраску, опушение и изменения морфологии листьев, возможность их ориентации параллельно солнечным лучам (Культиасов, 1982). Также на спектрально-отражательных свойствах может сказываться затенение, особенно выраженное у более высокостебельных дерновинных злаков в сравнении с исследованными полукустарничками и многими однолетниками. На *рис. 4а* (см. с. 182) показаны фотографии ковыля Лессинга, рогача песчаного и полыни Лерхе, иллюстрирующие указанные приспособления к засушливым условиям.

Значимые различия КСЯ растительности разных жизненных форм, установленные по данным полевого спектрометрирования, открывают перспективы для картографирования этих типов растений по данным дистанционного зондирования Земли. На *рис. 4* (см. с. 182)

показаны КСЯ по наземным данным, приведённые к диапазонам каналов Sentinel-2A. Наиболее информативны для разделения растительности каналы видимого (каналы 2–4) и ближнего ультрафиолетового (канал 1) диапазонов. При этом в инфракрасном диапазоне (каналы 8, 8A, 9) и красном крае (*англ.* Red Edge, каналы 5–7) отличия полукустарничков и дерновинных злаков от однолетников выражены достаточно, в то время как между собой они разделяются хуже.

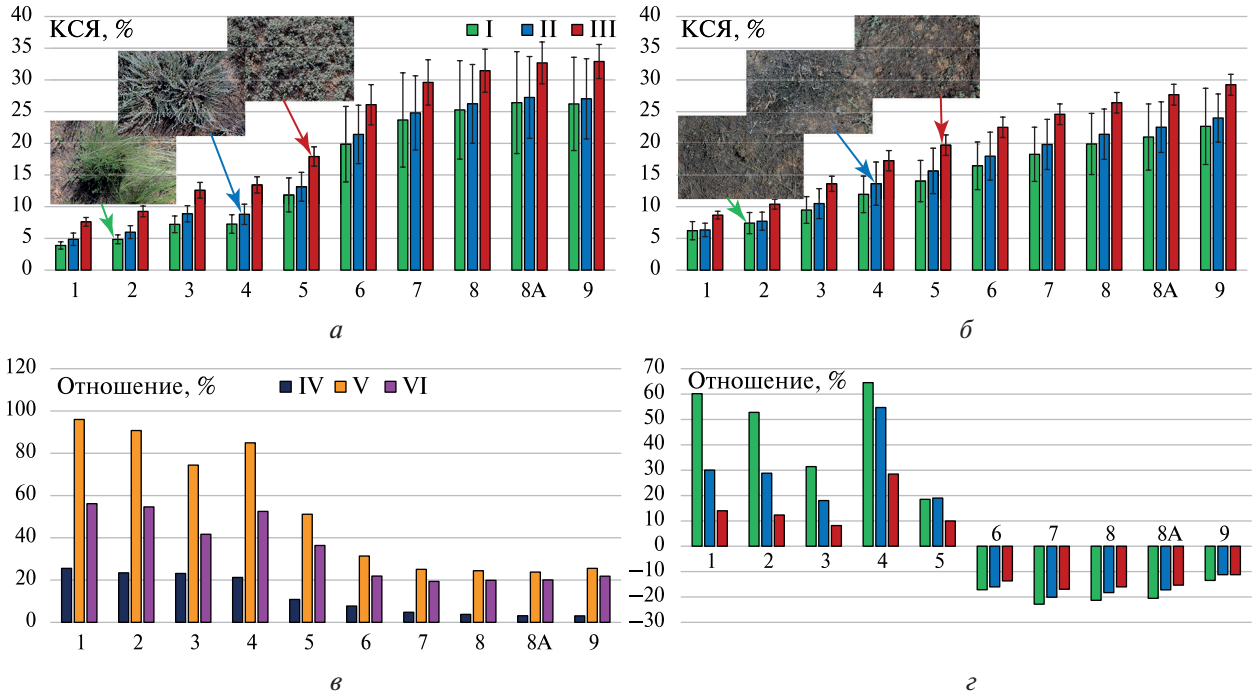

Рис. 4. КСЯ растительности разных жизненных форм по спектральным диапазонам Sentinel-2 до (*а*) и после (*б*) скашивания, отношение их КСЯ (*в*) и изменение КСЯ после скашивания (*г*) (окрестности заповедника «Богдинско-Баскунчакский»). I — дерновинные злаки, II — полукустарнички, III — однолетники, IV — отношение КСЯ полукустарничков и злаков, V — отношение КСЯ однолетников и злаков, VI — КСЯ отношение однолетников и полукустарничков; планками показано стандартное отклонение

Для участков с дерновинными злаками и полукустарничками характерно значимое увеличение КСЯ в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах после отчуждения фитомассы (*рис. 4б*, *г*), при этом все типы растительности демонстрируют снижение КСЯ на длинах волн более 733 нм (каналы 6–9). Повышение альбедо в видимом диапазоне при деградации растительного покрова выступает одним из индикаторов опустынивания (Zolotokrylin, Titkova, 2011), что подтверждают данные наземного спектрометрирования. Также к росту альбедо в пустынных ландшафтах приводит пирогенное воздействие, поскольку при этом возрастает влияние отражения почв (Шинкаренко, 2021; Шинкаренко и др., 2022б). Почвенный покров под фитоценозом с доминированием однолетнего рогача песчаного обладает высокими значениями КСЯ во всех диапазонах (см. *рис. 4б*), что может быть связано с более лёгким гранулометрическим составом (преобладанием песчаной фракции). Кроме того, под однолетниками остаётся значительно меньше ветоши, перекрывающей почву, что также может увеличивать значения КСЯ. Помимо этих факторов могла сказаться и разница в высоте и фитомассе растений при равном проективном покрытии всех площадок на уровне 60–70 %, так как высота рогача песчаного составила 10–15 см и сырая масса в среднем 250 г/м^2, в то время как дерновинные злаки и полукустарнички имели высоту 30–40 см и фитомассу до 800 г/м^2.

Учёт сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик позволяет существенно увеличить возможности разделения видов травянистой растительности (Thornley

et al., 2022). Вместе с тем по мере развития растений в течение вегетационного сезона увеличивается их фитомасса и проективное покрытие, что также существенно изменяет их спектральный отклик, усложняя этим дифференциацию видов (Thornley et al., 2023). По данным исследования (Conti et al., 2021), усложнение вертикальной структуры растительных сообществ и увеличение высоты растений (следовательно, и фитомассы) снижает спектральные различия между фитоценозами пастбищ с разным количеством видов. В исследовании, проведённом в Канаде для 103 видов растений на уровне отдельных листьев, установлено, что удельная плотность поверхности листьев и содержание в них сухого вещества значительно сильнее связаны со спектрально-отражательными характеристиками в сравнении с большинством химических признаков, включающих концентрации пигментов, фракций углерода и различных элементов питания (Kothari et al., 2023). Точность определения содержания азота и воды в отдельных листьях растений по спектральным признакам существенно снижается при смешении листьев разных видов, в то время как на точности определения концентрации хлорофилла и удельной плотности поверхности листьев такое смешение сказывается в значительно меньшей степени (Hacker et al., 2022).

В ряде исследований (например, (Conti et al., 2021; Fassnacht et al., 2021)) отмечено, что гипотеза спектральной изменчивости (*англ*. The Spectral Variability Hypothesis — SVH, пространственная изменчивость спектрально-отражательных характеристик растительности связана с разнообразием её видов) ошибочна и требует уточнения, поскольку пространственная неоднородность спектрально-отражательных свойств в большей мере зависит от структурных характеристик фитоценозов, а не от количества входящих в них видов. При этом проведение разновременных исследований и учёт фенологических изменений лишь отчасти решают проблему повышения точности разделения растительных сообществ и определения видового разнообразия по спектральным признакам, поскольку, как было сказано выше, в течение вегетационного сезона меняются и структурные характеристики растительного покрова.

Влияние проективного покрытия и надземной фитомассы растительного покрова на спектрально-отражательные характеристики пастбищ

Различия спектрально-отражательных свойств растительности с разными структурными характеристиками создают предпосылки для определения влияния сомкнутости и фитомассы на значения КСЯ и ВИ пастбищ (*рис. 5*, см. с. 184). При этом после скашивания спектрально-отражательные характеристики пастбищ выравниваются, что свидетельствует о том, что наблюдаемые различия вызваны разной сомкнутостью растительного покрова, а не почвами. Возможность использования точных количественных параметров (проективное покрытие, фитомасса) для построения моделей их связи с КСЯ и ВИ представляется огромным преимуществом перед оценкой разнообразия растительности, которое обычно выражают в виде количества видов и индексов сходства/различия/богатства, в полной мере не учитывающих структурные характеристики (Conti et al., 2021; Fassnacht et al., 2021).

Наиболее сильно значения КСЯ растительности разного проективного покрытия различаются в области 600–700 нм, достигая максимума на длинах волн 660–670 нм в красном диапазоне спектра. Красный канал спутниковых изображений успешно применяется в сочетании с NDVI для картографирования деградированных аридных пастбищ (Шинкаренко и др., 2022а). На песчаных пастбищах Китая наибольшая разница КСЯ полынных сообществ разного проективного покрытия отмечена в диапазонах 520–600 и 720–900 нм, а также в окрестностях 680 нм (Peng et al., 2019), что согласуется с полученными результатами (см. *рис. 5*). По данным исследования (Bayat et al., 2016), первые признаки стресса у растений, вызванного дефицитом влаги, отмечаются в красной (675 нм) и инфракрасной (1440, 1930 нм) областях. Это может усложнять определение проективного покрытия по спектральным данным, так как отличия могут быть обусловлены угнетённым состоянием растительности.

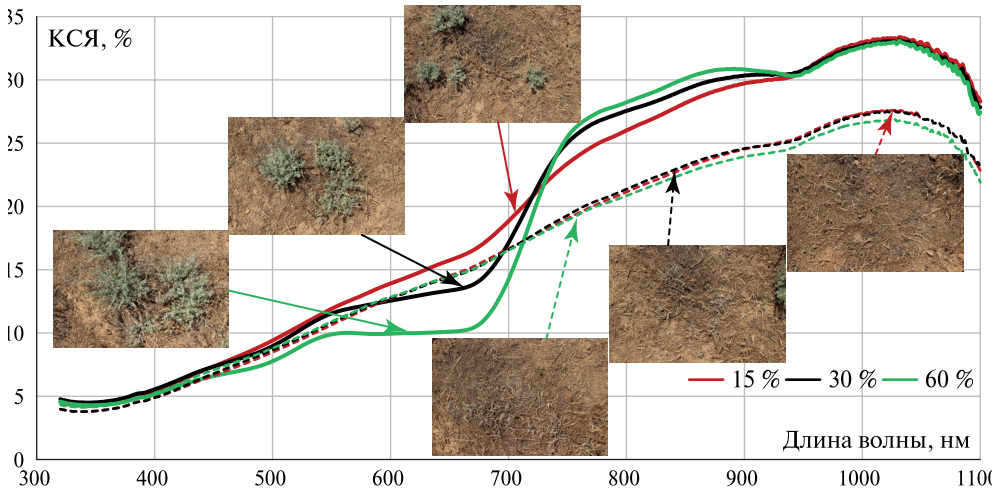

Рис. 5. Спектрально-отражательные характеристики мятликово-полынной растительности с разным проективным покрытием до (сплошные линии) и после (пунктирные линии) скашивания; Калмыкия, пос. Комсомольский, май 2022 г.

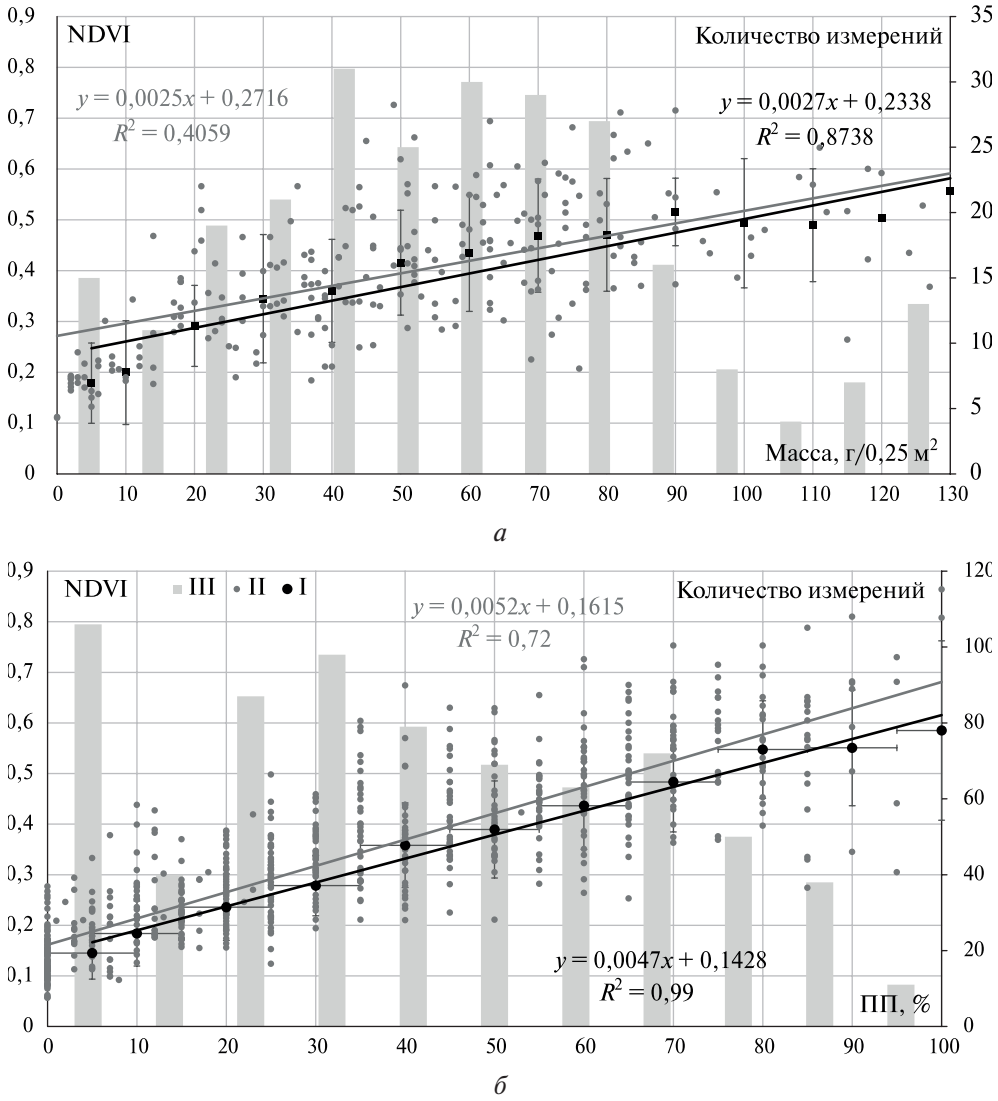

Рис. 6. Значения NDVI для растительности с разной фитомассой (*а*) и проективным покрытием (*б*): I — средние по диапазонам значения NDVI, II — значения NDVI, III — количество измерений в диапазоне; планками показано стандартное отклонение

Одним из наиболее распространённых вегетационных индексов для картографирования фитомассы и проективного покрытия пастбищ считается NDVI (Wang et al., 2022). На *рис. 6* (см. с. 184) показана зависимость NDVI от фитомассы и проективного покрытия по всем измерениям спектрально-отражательных характеристик без разделения по видовому составу растительности, датам и тестовым полигонам. Связь NDVI с проективным покрытием ($r = 0,85$; $p < 0,001$) значительно сильнее выражена, чем с фитомассой ($r = 0,64$; $p < 0,001$). Это может быть связано с различием структурных характеристик растительного покрова: при одной и той же фитомассе проективное покрытие может существенно различаться в зависимости от видового состава фитоценозов. Низкорослые растения могут быть распределены достаточно равномерно (например, рогач песчаный и другие эфемеры), в то время как более высокорослые полукустарнички и дерновинные злаки растут довольно разреженно, за счёт чего проективное покрытие уменьшается при равной фитомассе, следовательно, возрастает влияние спектрально-отражательных характеристик почвенного покрова.

Также на точность связи фитомассы и КСЯ могло повлиять неполное соответствие размеров пятна сканирования полевого спектрометра укосным площадкам, поскольку последние имели форму квадрата, в который вписан круг пятна сканирования. Таким образом, растительность, не попавшая в область измерения спектрально-отражательных характеристик, не влияет на них, но учитывается в общей фитомассе укосной площадки. Решением этой проблемы в дальнейших исследованиях может стать использование для обозначения укосных площадок кольца с диаметром, соответствующим пятну сканирования.

Коэффициент корреляции фитомассы и проективного покрытия по всем укосным площадкам составил 0,68 ($p < 0,001$). Самая тесная связь этих показателей характерна для прутняка ($r = 0,88$; $p < 0,05$), рогача ($r = 0,76$; $p < 0,05$) и пижмы тысячелистниколистной ($r = 0,73$; $p < 0,05$). Связь между проективным покрытием и фитомассой дерновинных злаков типчака и житняков отсутствует, как и для длиннокорневищной травы полыни австрийской. Это подтверждает предположение о большем влиянии на спектральные свойства проективного покрытия, а не фитомассы: прутняк (бассия простёртая) имеет стелющиеся побеги, что увеличивает проективное покрытие при той же фитомассе по сравнению с прямостоячими побегами, например у полыни австрийской.

В *таблице* показаны коэффициенты корреляции значений вегетационных индексов, проективного покрытия и фитомассы фитоценозов с разными доминирующими видами. Для большинства растительных сообществ наиболее сильная связь отмечена с NDVI и IPVI, который близок к NDVI, так как вычисляется как отношение КСЯ в ближнем инфракрасном канале к сумме КСЯ в ближнем инфракрасном и красном каналах (Crippen, 1990). Для всех измерений коэффициент корреляции составил 0,85 ($p < 0,001$), наиболее сильная связь проективного покрытия и ВИ — у фитоценозов с доминированием галофитов, ковылей, пижмы тысячелистниколистной (ромашника) и однолетников (мортук, полевичка малая, рогач песчаный, рожь дикая, солянка сорная).

Для некоторых растительных сообществ связь ВИ с сырой фитомассой оказалась сильнее, чем с проективным покрытием. Например, у житняковых ($r = 0,72$; $p < 0,01$), мятликовых ($r = 0,89$; $p < 0,001$), типчаковых ($r = 0,43$; $p < 0,05$) фитоценозов связь наиболее сильная с индексами EVI и SAVI, более устойчивыми к влиянию почвенного покрова. Для фитомассы в воздушно-сухом состоянии значимой связи с ВИ не установлено. Исследование спектрально-отражательных свойств разных типов пастбищной растительности на Тибетском плато также показало, что ВИ EVI, SAVI, MSAVI имеют более тесную связь с фитомассой разреженной растительности, в то время как NDVI даёт лучшие результаты с более густой (Shen et al., 2008). Исследование, проведённое Л. Д. Немцевой с соавторами (2018) в сухих степях Ростовской обл., показало в 2009 г. связь между фитомассой и NDVI по данным Landsat-5 TM на уровне $r = 0,75–0,85$. Сопоставление наземных измерений фитомассы пастбищной растительности альпийских лугов Тибетского плато с ВИ по данным Landsat-8 характеризуется связью $r = 0,6–0,72$ (Quang et al., 2020), что соответствует полученным оценкам.

Коэффициенты корреляции ВИ, проективного покрытия (числитель) и фитомассы (знаменатель)

Доминант	Количество измерений	Коэффициент корреляции*						Лучший ВИ
		NDVI	SAVI	EVI	IPVI	MSAVI2	Максимум	
Галофиты	32	*0,92*	*0,83*	*0,82*	*0,93*	*0,79*	*0,93*	IPVI
	14	*0,63*	*0,56*	*0,56*	*0,63*	*0,54*	*0,63*	IPVI
Житняк	35	*0,61*	0,32	0,29	*0,61*	0,28	*0,61*	NDVI
	19	*0,58*	*0,70*	*0,72*	*0,58*	*0,72*	*0,72*	EVI
Ковыли	38	*0,88*	*0,77*	*0,75*	*0,88*	*0,72*	*0,88*	IPVI
	29	*0,63*	*0,54*	*0,53*	*0,63*	*0,50*	*0,63*	IPVI
Прутняк	18	*0,65*	*0,50*	*0,51*	*0,65*	*0,49*	*0,65*	NDVI
	6	*0,85*	0,60	0,63	*0,85*	*0,55*	*0,85*	IPVI
Мятлик	94	*0,67*	*0,60*	*0,58*	*0,67*	*0,58*	*0,67*	IPVI
	31	*0,79*	*0,88*	*0,89*	*0,79*	*0,88*	*0,89*	EVI
Полевичка	13	*0,84*	*0,87*	*0,87*	*0,84*	*0,87*	*0,87*	MSAVI2
	11	0,30	0,40	0,38	0,30	0,42	0,42	MSAVI2
Полынь австрийская	14	*0,63*	*0,52*	*0,53*	*0,63*	*0,50*	*0,63*	IPVI
	14	0,02	–0,07	0,07	0,02	–0,09	0,02	NDVI
Полынь Лерхе	139	*0,74*	*0,68*	*0,69*	*0,74*	*0,65*	*0,74*	NDVI
	49	*0,58*	*0,71*	*0,71*	*0,57*	*0,72*	*0,72*	MSAVI2
Полынь чёрная	30	*0,82*	*0,77*	*0,76*	*0,82*	*0,75*	*0,82*	NDVI
	10	0,27	0,37	0,35	0,27	0,38	0,38	MSAVI2
Пырей	21	*0,76*	*0,62*	*0,61*	*0,76*	*0,59*	*0,76*	NDVI
	21	*0,55*	*0,49*	*0,48*	*0,55*	*0,47*	*0,55*	IPVI
Рогач	27	*0,86*	*0,84*	*0,84*	*0,86*	*0,50*	*0,86*	NDVI
	8	0,64	*0,85*	*0,82*	0,63	*0,82*	*0,85*	SAVI
Ромашник	29	*0,82*	*0,80*	*0,79*	*0,82*	*0,79*	*0,82*	IPVI
	10	0,45	0,59	0,55	0,46	0,60	0,60	MSAVI2
Типчак	25	0,13	0,08	0,08	0,13	0,07	0,13	NDVI
	25	*0,40*	*0,43*	*0,42*	*0,40*	*0,42*	*0,43*	SAVI
Мортук	27	*0,95*	*0,94*	*0,94*	*0,95*	*0,94*	*0,95*	IPVI
	–	–	–	–	–	–	–	–
Разнотравье	27	*0,91*	*0,87*	*0,87*	*0,91*	*0,86*	*0,91*	IPVI
	–	–	–	–	–	–	–	–
Рожь дикая	18	*0,84*	*0,70*	*0,71*	*0,84*	*0,66*	*0,84*	IPVI
	–	–	–	–	–	–	–	–
Солянка сорная	15	*0,93*	*0,90*	*0,90*	*0,93*	*0,90*	*0,93*	IPVI
	–	–	–	–	–	–	–	–
Все измерения	712	*0,85*	*0,75*	*0,74*	*0,84*	*0,71*	*0,85*	NDVI
	247	*0,64*	*0,61*	*0,60*	*0,64*	*0,59*	*0,64*	NDVI

П р и м е ч а н и е: значимые коэффициенты при $p < 0,05$ выделены курсивным начертанием, прочерк — нет данных.

Заключение

В результате проведённых исследований на основе полевого спектрометрирования установлены особенности спектрально-отражательных свойств пастбищной растительности опустыненных степей и северных пустынь юга России. На уровне жизненных форм и экологических групп выявлены значимые различия в спектральной яркости в видимом и ближнем ультрафиолетовом диапазонах, обусловленные структурными и физиологическими различиями. Внутри видов одной жизненной формы значимых различий спектрально-отражательных характеристик не выявлено.

Изменения проективного покрытия пустынной растительности при одном и том же почвенном покрове приводят к значимым различиям спектрально-отражательных свойств в диапазоне 660–670 нм, что подтверждает возможности использования красного канала для мониторинга деградации пастбищ наряду с вегетационными индексами.

Для большинства растительных сообществ характерна значимая корреляционная связь фитомассы и проективного покрытия с вегетационными индексами, что даёт возможность использовать их для картографирования продуктивности пастбищ. Требуются дальнейшие исследования для разработки методов совместного использования выборочных наземных измерений проективного покрытия, фитомассы и спектрально-отражательных характеристик пастбищной растительности со спутниковыми данными дистанционного зондирования Земли различного пространственного разрешения.

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» (рег. № 123030300031-6). Полевое спектрометрирование проводилось при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта № 19-35-60007.

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. *Андрианова Ю. Е.*, *Тарчевский И. А.* Хлорофилл и продуктивность растений. М.: Наука, 2000. 135 с.
2. *Барталев С. А.*, *Егоров В. А.*, *Жарко В. О.*, *Лупян Е. А.*, *Плотников Д. Е.*, *Хвостиков С. А.*, *Шабанов Н. В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. *Брейдо М. Д.*, *Жирин В. М.*, *Барталев С. А.*, *Бахтинова Е. В.* Определение некоторых характеристик кормовых ресурсов пустынных пастбищ по аэрокосмической информации // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 3. С. 66–76.
4. *Виноградов Б. В.* Исследование индикаторов при мониторинге опустынивания юга России // Аридные экосистемы. 1996. Т 2. № 4. С. 38–54.
5. *Ерошенко Ф. В.*, *Барталев С. А.*, *Сторчаг И. Г.*, *Плотников Д. Е.* Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 99–112. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-23-99-112.
6. *Ерошенко Ф. В.*, *Барталев С. А.*, *Лапенко Н. Г.*, *Самофал Е. В.*, *Сторчак И. Г.* Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 7. С. 53–66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66.
7. *Кононова Н. А.*, *Ларько А. А.*, *Емельянов Д. В.*, *Ботвич И. Ю.* Оценка состояния сенокосных земель Красноярского края на основе наземной спектрометрии // Вестн. Красноярского гос. аграр. ун-та. 2019. № 2(143). С. 31–37.

8. *Кремнева О. Ю.*, *Тутубалина О. В.*, *Середа И. И.*, *Данилов Р. Ю.*, *Зимин М. В.*, *Курилов А. А.* Исследования изменения спектральных характеристик сортов озимой пшеницы в зависимости от степени инфицирования возбудителями болезней // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 149–161. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-149-161.
9. *Культиасов И. М.* Экология растений. М.: Изд-во МГУ, 1982. 381 с.
10. *Лазарева В. Г.*, *Бананова В. А.*, *Нгуен В. З.* Картирование растительности Сарпинской низменности в пределах Республики Калмыкия методами дистанционного зондирования и ГИС // Успехи современного естествознания. 2017. № 12. С. 178–183.
11. *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.
12. *Рачкулик В. И.*, *Ситникова М. В.* Отражательные свойства и состояние растительного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1981. 287 с.
13. *Терехин Э. А.* Оценка пространственно-временных изменений в зелёной фитомассе аграрной растительности с использованием спектрально-отражательных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 1. С. 138–148. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-138-148.
14. *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.
15. *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.
16. *Шинкаренко С. С.*, *Барталев С. А.* (2020а) Последствия пыльных бурь 2020 года на юге европейской части России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 7. С. 270–275.
17. *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.
18. *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.
19. *Шинкаренко С. С.*, *Барталев С. А.* *Берденгалиева А. Н.*, *Дорошенко В. В.* (2022а) 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.
20. *Шинкаренко С. С.*, *Дорошенко В. В.*, *Берденгалиева А. Н.* (2022б) Динамика площади гарей в зональных ландшафтах юго-востока европейской части России // Изв. Российской акад. наук. Сер. географ. 2022. Т. 86. № 1. С. 122–133. DOI: 10.31857/S2587556622010113.
21. *Bayat B.*, *Van der Tol C.*, *Verhoef W.* Remote Sensing of Grass Response to Drought Stress Using Spectroscopic Techniques and Canopy Reflectance Model Inversion // Remote Sensing. 2016. V. 8. No. 7. Art. No. 557. DOI: 10.3390/rs8070557.
22. *Bazzo C. O. G.*, *Kamali B.*, *Hütt C.*, *Bareth G.*, *Gaiser T.* A Review of Estimation Methods for Aboveground Biomass in Grasslands Using UAV // Remote Sensing. 2023. V. 15. No. 3. Art. No. 639. DOI: 10.3390/rs15030639.
23. *Conti L.*, *Malavasi M.*, *Galland T.*, *Komarek J.*, *Lagner O.*, *Carmona C. P.*, *de Bello F.*, *Rocchini D.*, *Simova P.* The relationship between species and spectral diversity in grassland communities is mediated by their vertical complexity // Applied Vegetation Science. 2021. V. 24. Art. No. e12600. DOI: 10.1111/avsc.12600.
24. *Crippen R. E.* Calculating the vegetation index faster // Remote Sensing of Environment. 1990. V. 34. Iss. 1. P. 71–73. DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-Z.
25. *Fassnacht F. E.*, *Mullerova J.*, *Conti L.*, *Malavasi M.*, *Schmidtlein S.* About the link between biodiversity and spectral variation // Applied Vegetation Science. 2021. V. 24. Art. No. e126643. DOI: 10.1111/avsc.12643.
26. *Gunin P. D.* *Danzhalova E. V.*, *Bazha S. N.*, *Dedkov V. P.*, *Zolotokrylin A. N.*, *Kazantseva T. I.* NDVI for Monitoring of the State of Steppe and Desert Ecosystems of the Gobi // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. No. 3. P. 179–186. DOI: 10.1134/S207909611903003X.
27. *Guo Y.*, *Mokany K.*, *Ong C.*, *Moghadam P.*, *Ferrier S.*, *Levick S. R.* Plant species richness prediction from DESIS hyperspectral data: A comparison study on feature extraction procedures and regression models // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2023. V. 1. P. 120–133. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.12.028.

28. *Hacker P. W.*, *Coops N. C.*, *Laliberte E.*, *Michaletz S. T.* Variations in accuracy of leaf functional trait prediction due to spectral mixing // Ecological Indicators. 2022. V. 136. Art. No. 108687. DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108687.
29. *Kothari S.*, *Beauchamp-Rioux R.*, *Blanchard F.*, *Crofts A. L.*, *Girrd A.*, *Guilbeault-Mayers X.*, *Hacker P. W.*, *Pardo J.*, *Schweiger A. K.*, *Demers-Thibeault S.*, *Bruneau A.*, *Coops N. C.*, *Kalacska M.*, *Vellend M.*, *Laliberte E.* Predicting leaf traits across functional groups using reflectance spectroscopy // New Phytologist. 2023. V. 238. P. 549–566. DOI: 10.1111/nph.18713.
30. *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.
31. *Kulik K. N.*, *Petrov V. I.*, *Yuferev V. G.*, *Tkachenko N. A.*, *Shinkarenko S. S.* Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. No. 2. P. 98–105. DOI: 10.1134/S2079096120020080.
32. *Lu S.*, *Lu F.*, *You W.*, *Wang Z.*, *Liu Yu.*, *Omasa K.* A robust vegetation index for remotely assessing chlorophyll content of dorsiventral leaves across several species in different seasons // Plant Methods. 2018. V. 14. Art. No. 15. DOI: 10.1186/s13007-018-0281-z.
33. *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.
34. *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.
35. *Peng Y.*, *Fan M.*, *Bai L.*, *Sang W.*, *Feng J.*, *Zhao Z.*, *Tao Z.* Identification of the Best Hyperspectral Indices in Estimating Plant Species Richness in Sandy Grasslands // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 5. Art. No. 588. DOI: 10.3390/rs11050588.
36. *Quang Q.*, *Yuan Qz.*, *Han Jc.*, *Leng R.*, *Wang Yu.*, *Zhu K.*, *Lin S.*, *Ping R.* 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.
37. *Scheer H.* Chlorophylls: A Personal Snapshot // Molecules. 2022. V. 27. No. 3. Art. No. 1093. DOI: 10.3390/molecules27031093.
38. *Shen M.*, *Tang Y.*, *Klein J.*, *Zhang P.*, *Gu S.*, *Shimono A.*, *Chen J.* Estimation of aboveground biomass using in situ hyperspectral measurements in five major grassland ecosystems on the Tibetan Plateau // J. Plant Ecology. 2008. V. 1. Iss. 4. P. 247–257. DOI: 10.1093/jpe/rtn025.
39. *Sid'ko A. F.*, *Botvich I. Y.*, *Pis'man T. I.*, *Shevyrnogov A. P.* Estimation of the chlorophyll content and yield of grain crops via their chlorophyll potential // Biophysics. 2017. V. 62. No. 3. P. 456–459. DOI: 10.1134/S0006350917030198.
40. *Thornley R. H.*, *Verhoef A.*, *Gerard F. F.*, *White K.* The Feasibility of Leaf Reflectance-Based Taxonomic Inventories and Diversity Assessments of Species-Rich Grasslands: A Cross-Seasonal Evaluation Using Waveband Selection // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 10. Art. No. 2310. DOI: 10.3390/rs14102310.
41. *Thornley R. H.*, *Gerard F. F.*, *White K.*, *Verhoef A.* Prediction of Grassland Biodiversity Using Measures of Spectral Variance: A Meta-Analytical Review // Remote Sensing. 2023. V. 15. Art. No. 668. DOI: 10.3390/rs15030668.
42. *Tucker J.* Asymptotic nature of grass canopy spectral reflectance // Applied Optics. 1977. V. 16. P. 1151–1156. DOI: 10.1364/AO.16.001151.
43. *Vlasenko M. V.*, *Kulik A. K.*, *Salugin A. N.* Evaluation of the Ecological Status and Loss of Productivity of Arid Pasture Ecosystems of the Sarpa Lowland // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. No. 1. P. 273–281. DOI: 10.1134/S2079096119040097.
44. *Wang Z.*, *Ma Y.*, *Zhang Y.*, *Shang J.* Review of Remote Sensing Applications in Grassland Monitoring // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 12. Art. No. 2903. DOI: 10.3390/rs14122903.
45. *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
46. *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.

Analysis of the influence of species composition, projective cover, and phytomass of arid landscape pasture vegetation on spectral reflectance properties based on ground measurements

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

The intensification of pasture degradation in the southern European part of Russia in recent years, caused by unfavorable hydrothermal conditions and unregulated livestock numbers, requires development of methods for determining the capacity of forage lands using remote sensing techniques. Spectral reflectance properties of vegetation are determined by its species, structural, phenological, biophysical, and biochemical characteristics. However, the influence of these indicators on spectral response has regional specificity, as soil cover plays a significant role. Therefore, it is important that studies of spectral reflectance properties cover many types of vegetation. This study is dedicated to determining the spectral reflectance properties of vegetation in natural zonal pastures in the southern European part of Russia based on geobotanical research and field spectrometry using the PSR-1100f instrument in the range of 320–1100 nm. Ground-based work was carried out in May (the period of maximum green vegetation mass) from 2020–2022 in the natural zonal pastures of the Astrakhan, Volgograd regions, Stavropol Krai, the Republics of Dagestan and Kalmykia. Significant differences were found between sod-forming grasses, semi-shrubs, and annual plants in the visible and near-ultraviolet ranges of the spectrum. Changes in projective cover under other equal conditions significantly affect spectral properties in the range of 660–670 nm, which is consistent with the results of other researchers. Vegetation indices were identified that are most suitable for determining projective cover and above-ground biomass of pasture phytocenoses dominated by different species. Further research will allow for the transition from point measurements of spectral reflectance and structural characteristics of vegetation to satellite data of various spatial resolutions.

Keywords: arid landscapes, pasture vegetation, spectrometry, vegetation indices

Accepted: 15.05.2023
DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-176-192

References

1. Andrianova Yu. E., Tarchevskii I. A., *Khlorofill i produktivnost' rastenii* (Chlorophyll and plant productivity), Moscow: Nauka, 2000, 135 p. (in Russian).
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Lupyan 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. (in Russian).
3. Breido M. D., Zhirin V. M., Bartalev S. A., Bakhtinova E. V., Identification of forage resources features in desert grazing from aerospace data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1989, No. 3, pp. 66–76 (in Russian).
4. Vinogradov B. V., Study of indicators for monitoring desertification in the South of Russia, *Aridnye ekosistemy*, 1996, Vol. 2, No. 4, pp. 38–54 (in Russian).
5. Eroshenko F. V., Bartalev S. A., Storchak I. G., Plotnikov D. E., The possibility of winter wheat yield estimation based on vegetation index of photosynthetic potential derived from remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 99–112 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-23-99-112.
6. Eroshenko F. V., Bartalev S. A., Lapenko N. G., Samofal E. V., Storchak I. G., 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 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66.
7. Kononova N. A., Larko A. A., Emelyanov D. V., Botvich I. Yu., Assessment of hay lands based on ground-based spectrometry (on the example of agricultural land of the Krasnoyarsk region), *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, No. 2(143), pp. 31–37 (in Russian).
8. Kremneva O. Yu., Tutubalina O. V., Sereda I. I., Danilov R. Yu., Zimin M. V., Kurilov A. A., Studies of changes in the spectral characteristics of winter wheat varieties depending on the degree of infection with

pathogens, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 3, pp. 149–161 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-149-161.
9. Kul'tiasov I. M., *Ekologiya rastenii* (Ecology of plants), Moscow: MGU Publ. House, 1982, 381 p. (in Russian).
10. Lazareva V. G., Bananova V. A., Nguen V. D., Mapping the vegetation of the plain of the Sarpinsky lowland (Kalmykia) using remote sensing and GIS, *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*, 2017, No. 12, pp. 178–183 (in Russian).
11. Nemtseva L. D., Bespalova 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.
12. Rachkulik V. I., Sitnikova M. V., *Otrazhatel'nye svoistva i sostoyanie rastitel'nogo pokrova* (Reflective properties and the state of vegetation cover), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1981, 287 p. (in Russian).
13. Terekhin E. A., Assessment the spatial-temporal changes in green phytomass of agricultural vegetation using spectral response, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 1, pp. 138–148 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-138-148.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Shinkarenko S. S., Berdengalieva A. N., Bartalev S. A., Doroshenko V. V. (2022a), 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.
20. Shinkarenko S. S., Doroshenko V. V., Berdengalieva A. N. (2022b), Burned areas dynamics in zonal landscapes of the South-East of The European part of Russia, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. geograficheskaya*, 2022, Vol. 86, No. 1, pp. 122–133 (in Russian), DOI: 10.31857/S2587556622010113.
21. Bayat B., Van der Tol C., Verhoef W., Remote Sensing of Grass Response to Drought Stress Using Spectroscopic Techniques and Canopy Reflectance Model Inversion, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 7, Art. No. 557, DOI: 10.3390/rs8070557.
22. Bazzo C. O. G., Kamali B., Hütt C., Bareth G., Gaiser T., A Review of Estimation Methods for Aboveground Biomass in Grasslands Using UAV, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, No. 3, Art. No. 639, DOI: 10.3390/rs15030639.
23. Conti L., Malavasi M., Galland T., Komarek J., Lagner O., Carmona C. P., de Bello F., Rocchini D., Simova P., The relationship between species and spectral diversity in grassland communities is mediated by their vertical complexity, *Applied Vegetation Science*, 2021, Vol. 24, Art. No. e12600, DOI: 10.1111/avsc.12600.
24. Crippen R. E., Calculating the vegetation index faster, *Remote Sensing of Environment*, 1990, Vol. 34, Iss. 1, pp. 71–73, DOI: 10.1016/0034-4257(90)90085-Z.
25. Fassnacht F. E., Mullerova J., Conti L., Malavasi M., Schmidtlein S., About the link between biodiversity and spectral variation, *Applied Vegetation Science*, 2021, Vol. 24, Art. No. e126643, DOI: 10.1111/avsc.12643.
26. Gunin P. D., Danzhalova E. V., Bazha S. N., Dedkov V. P., Zolotokrylin A. N., Kazantseva T. I., NDVI for Monitoring of the State of Steppe and Desert Ecosystems of the Gobi, *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 9, No. 3, pp. 179–186, DOI: 10.1134/S207909611903003X.
27. Guo Y., Mokany K., Ong C., Moghadam P., Ferrier S., Levick S. R., Plant species richness prediction from DESIS hyperspectral data: A comparison study on feature extraction procedures and regression models, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2023, Vol. 1, pp. 120–133, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2022.12.028.
28. Hacker P. W., Coops N. C., Laliberte E., Michaletz S. T., Variations in accuracy of leaf functional trait prediction due to spectral mixing, *Ecological Indicators*, 2022, Vol. 136, Art. No. 108687, DOI: 10.1016/j.ecolind.2022.108687.

29. Kothari S., Beauchamp-Rioux R., Blanchard F., Crofts A. L., Girrd A., Guilbeault-Mayers X., Hacker P. W., Pardo J., Schweiger A. K., Demers-Thibeault S., Bruneau A., Coops N. C., Kalacska M., Vellend M., Laliberte E., Predicting leaf traits across functional groups using reflectance spectroscopy, *New Phytologist*, 2023, Vol. 238, pp. 549–566, DOI: 10.1111/nph.18713.
30. 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.
31. Kulik K. N., Petrov V. I., Yuferev V. G., Tkachenko N. A., Shinkarenko S. S., Geoinformational Analysis of Desertification of the Northwestern Caspian, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, No. 2, pp. 98–105, DOI: 10.1134/S2079096120020080.
32. Lu S., Lu F., You W., Wang Z., Liu Yu., Omasa K., A robust vegetation index for remotely assessing chlorophyll content of dorsiventral leaves across several species in different seasons, *Plant Methods*, 2018, Vol. 14, Art. No. 15, DOI: 10.1186/s13007-018-0281-z.
33. 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.
34. 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.
35. Peng Y., Fan M., Bai L., Sang W., Feng J., Zhao Z., Tao Z., Identification of the Best Hyperspectral Indices in Estimating Plant Species Richness in Sandy Grasslands, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, No. 5, Art. No. 588, DOI: 10.3390/rs11050588.
36. Quang Q., Yuan Qz., Han Jc., Leng R., Wang Yu., Zhu K., Lin S., Ping R., 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.
37. Scheer H., Chlorophylls: A Personal Snapshot, *Molecules*, 2022, Vol. 27, No. 3, Art. No. 1093, DOI: 10.3390/molecules27031093.
38. Shen M., Tang Y., Klein J., Zhang P., Gu S., Shimono A., Chen J., Estimation of aboveground biomass using in situ hyperspectral measurements in five major grassland ecosystems on the Tibetan Plateau, *J. Plant Ecology*, 2008, Vol. 1, Issue 4, pp. 247–257, DOI: 10.1093/jpe/rtn025.
39. Sid'ko A. F., Botvich I. Y., Pis'man T. I., Shevyrnogov A. P., Estimation of the chlorophyll content and yield of grain crops via their chlorophyll potential, *Biophysics*, 2017, Vol. 62, No. 3, pp. 456–459, DOI: 10.1134/S0006350917030198.
40. Thornley R. H., Verhoef A., Gerard F. F., White K., The Feasibility of Leaf Reflectance-Based Taxonomic Inventories and Diversity Assessments of Species-Rich Grasslands: A Cross-Seasonal Evaluation Using Waveband Selection, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 10, Art. No. 2310, DOI: 10.3390/rs14102310.
41. Thornley R. H., Gerard F. F., White K., Verhoef A., Prediction of Grassland Biodiversity Using Measures of Spectral Variance: A Meta-Analytical Review, *Remote Sensing*, 2023, Vol. 15, Art. No. 668, DOI: 10.3390/rs15030668.
42. Tucker J., Asymptotic nature of grass canopy spectral reflectance, *Applied Optics*, 1977, Vol. 16, pp. 1151–1156, DOI: 10.1364/AO.16.001151.
43. Vlasenko M. V., Kulik A. K., Salugin A. N., Evaluation of the Ecological Status and Loss of Productivity of Arid Pasture Ecosystems of the Sarpa Lowland, *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 9, No. 1, pp. 273–281, DOI: 10.1134/S2079096119040097.
44. Wang Z., Ma Y., Zhang Y., Shang J., Review of Remote Sensing Applications in Grassland Monitoring, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 12, Art. No. 2903, DOI: 10.3390/rs14122903.
45. 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.
46. 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.