

УДК 631.1: 631.4:631.6:581.5: 528.7:528.8:574.46

## СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОПУСТЫНЕННЫХ ПАСТБИЩ ЧЕРНЫХ ЗЕМЕЛЬ

© 2022 г. В.Г. Юферев, Н.А. Ткаченко, К.П. Синельникова

Федеральный научный центр агроэкологии, комплексных мелиораций  
и защитного лесоразведения РАН

Россия, 400062, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 97.

E-mail: vyuferev1@rambler.ru, sinelnikova-k@vifanc.ru

Поступила в редакцию 04.09.2021. После доработки 13.10.2021. Принята к публикации 14.10.2021

Современные геосистемы опустыненных территорий Калмыкии функционируют в условиях увеличения антропогенной нагрузки и интенсивности негативных погодных явлений, в том числе под воздействием пыльных бурь, что часто приводит к значительному снижению продуктивности пастбищ, уменьшению кормовой базы и значительному сокращению численности скота. В связи с этим является актуальным определение спектральных характеристик опустыненных пастбищ наземными методами, обеспечивающее не только выявление распределения отраженной энергии по частотам спектра, что само по себе важно для последующей верификации данных дистанционного зондирования пастбищ, но и возможности получения значений нормализованных индексов как для растительных сообществ, так и для конкретных растений и типов почв с формированием базы пространственных данных. Объекты исследований – естественные фитоценозы опустыненных пастбищ Черных Земель на полигонах «Смушковое», «Молодежный», «Привольный», «Длинные Саги» и «Тавн-Гашун». На полигонах были проведены геоботанические, спектрометрические исследования и получены пространственно-определенные данные по спектральным характеристикам их растительных сообществ. Спектрометрические исследования фитоценозов проводят для оценки их состояния на основе спектральной съемки, как наземной, так и дистанционной. Для представления результатов оценки спектрометрических характеристик растительного покрова сбитых пастбищ были выбраны преобладающие сообщества на полигоне «Тавн-Гашун»: мятликовое с участием дескурии Софии (*Poa bulbosa*+*Descurainia sophia*), с проективным покрытием 45%, мятликово-ковыльное (*Poa bulbosa*–*Stipa capillata*) с проективным покрытием 40% и открытая почва (слабогумусированный песок). Исследования проведены с использованием полевого спектрометра PSR-1100. Результаты исследований спектра отраженного излучения растительных сообществ и подстилающих почв позволили установить характерные особенности распределения отраженной и поглощенной энергии, составить для них каталог индивидуальных спектров и нормализованных индексов. Установлены индивидуальные спектральные характеристики для фитоценоза *Poa bulbosa*+*Descurainia sophia*: среднее значение отраженной энергии по всем диапазонам спектра составило 20.2 мВт/(м<sup>2</sup>·ср·нм), стандартное отклонение отраженной энергии – 9.90, вегетационный индекс NDVI=0.208. Для *Stipa capillata* среднее значение отраженной энергии по всем диапазонам спектра – 20.5 мВт/(м<sup>2</sup>·ср·нм), стандартное отклонение отраженной энергии – 12.36, вегетационный индекс NDVI=0.316. Для *Calligonum aphyllum* среднее значение отраженной энергии по всем диапазонам спектра – 47.2 мВт/(м<sup>2</sup>·ср·нм), стандартное отклонение отраженной энергии – 9.81, вегетационный индекс NDVI=0.354. Для верхнего слоя почвы среднее значение отраженной энергии по всем диапазонам спектра – 30.3 мВт/(м<sup>2</sup>·ср·нм), стандартное отклонение отраженной энергии – 9.28, вегетационный индекс NDVI=0.106. Наибольшее среднее значение NDVI отмечено для *Calligonum aphyllum*.

**Ключевые слова:** геосистема, опустынивание, деградация земель, спектрометрия, космические снимки, фитоценозы, вегетационные индексы.

**DOI:** 10.24412/1993-3916-2022-1-65-72

Республика Калмыкия – уникальная аридная территория России. Ее почвенный покров разнообразен, включает черноземы, каштановые почвы, бурые полупустынные почвы и пески. Это связано с ландшафтной структурой территории, где присутствуют как Ергенинская возвышенность с отметками максимальных высот более 200 м н.у.м. БС, на которой представлены черноземы и каштановые почвы, Сарпинско-Даванская впадина со светло-каштановыми, бурыми полупустынными почвами, солонцами и песками с отметками минимальных высот до 28 м н.у.м. БС, так и долины рек Волга, Маныч и Кума с аллювиальными почвами.

Территория Республики Калмыкия по своим почвенно-климатическим условиям типична для всей аридной зоны юга Европейской части России. Анализ природных и социально-экономических условий позволяет выявить ведущие факторы опустынивания, определить интенсивность их воздействия на окружающую среду и наметить эффективные пути по их ослаблению и предотвращению. Основными факторами опустынивания на территории Калмыкии являются биоклиматические условия (в качестве природного фактора) и нерациональное природопользование (в качестве антропогенного), которые привели к нарушению природного равновесия в пастбищных ландшафтах, к изменению почвенного и растительного покрова. Результатом стало увеличение площади опустыненных земель, что привело к катастрофическим пыльным бурям в 2020 и 2021 гг. (Шинкаренко и др., 2020).

Актуальность исследований обусловлена ухудшением условий функционирования природных экосистем, определенное резкими колебаниями температуры, увеличением частоты пыльных бурь (Золотокрылин, Титкова 2004; Куст и др., 2020), наличием очагов опустынивания (Кулик и др., 2015; Kulik et al., 2018; Yuferev et al., 2019) и фитомелиорации (Kulik et al., 2010). Значение картографирования состояния растительных сообществ по данным дистанционного зондирования приведено в работе I. Klein с соавторами (2012).

Спектрометрические исследования фитоценозов в настоящее время получили широкое применение (Cavender-Bares et al., 2017) как для оценки их состояния по различным индексам, получаемых по результатам спектральной съемки, в том числе с использованием дистанционного спектрометра MODIS (Drolet et al., 2008; Huete et al., 2002; Lu et al., 2014), так и для разработки эталонов (Grigor'ev, Shilin, 2013), анализа и дешифрирования изображения космоснимков (Крутских, Кравченко, 2018; Drusch et al., 2012). В связи с развитием спектрометрии и возможностей аппаратуры расширились возможности дистанционной оценки состояния и уровня деградации природных растительных сообществ (Ерошенко и др., 2018; Трофимов и др., 2015).

Особо необходимо подчеркнуть влияние ландшафтных пожаров растительные сообщества, что приводит к изменению спектрально-отражательных свойств как растительных сообществ, так и почв (Шинкаренко, 2021). Так как пожары на рассматриваемых территориях – явление довольно распространенное, то при проведении исследований необходимо учитывать фактор пирогенного воздействия и выделять пирогенные сукцессии в отдельные группы.

### Материалы и методы

Исследования спектральных характеристик растительных сообществ были проведены на сбитых пастбищах Республики Калмыкия на территории Черных Земель на полигонах «Смушковое», «Молодежный», «Привольный», «Длинные Саги» и «Тавн-Гашун», где было обследовано более 150 тестовых участков, включающих как растительные сообщества, так и почвы под ними. Всего проведено более 400 замеров. Полигон «Тавн-Гашун», выбранный для представления полученных результатов, расположен на территории Яшкульского района республики, с географическими координатами 46.09705° с.ш. и 46.01976° в.д. Абсолютная высота над уровнем мирового океана – 12 м.

На песчаных почвах преобладают фитоценозы (с доминированием *Agropyron fragile*<sup>1</sup>, *A. desertorum*, *Festuca valesiaca*, *Stipa capillata*, *S. sareptana*, на суглинках – *Artemisia lercheana*, *Poa bulbosa*, *Tanacetum achilleifolium*. Велики площади солонцов и солончаков с галофитной растительностью (*Artemisia pauciflora*, *Camphorosma monspeliaca*, *Kochia prostrata* и др.; Горяев, 2019). При усилении пастбищных нагрузок, когда бобовые и злаки стравливаются в первую

<sup>1</sup> Названия видов сосудистых растений приводятся по работе С.К. Черепанова (Cherepanov, 2007).

очередь, растет роль полыней, эфемеров (например, *Eremopyrum triticeum*, *E. orientalis*, *Anisanta tectorum*, *Ceratocarpus arenarius*) и эфемероидов (*Poa bulbosa*; Бананова, Лазарева, 2014; Власенко и др., 2019), что приводит к изменению видового состава растительных сообществ. На значительной части песчаных земель территории исследований было произведено закрепление подвижных песков кустарником *Calligonum aphyllum*.

В результате перевыпаса скота в ходе регрессионных сукцессий в районе исследований в настоящее время доминируют сообщества из мятлики (*Poa bulbosa*) и однолетников (например, *Ceratocarpus arenarius*, *Alyssum turkestanicum*), пришедшие на смену мятливо-лерхопопынным (*Artemisia lerchiana*+*Poa bulbosa*) и лерхопопынно-мятливоковым (*Poa bulbosa*+*Artemisia lerchiana*) сообществам (Лазарева и др., 2020).

Кроме выпаса скота в исследуемом регионе существенным фактором динамики состояния растительного покрова являются ландшафтные пожары. Только на территории заповедника «Черные земли» в 2001-2019 гг. в среднем каждый год выгорало более 130 км<sup>2</sup> в ядре и более 230 км<sup>2</sup> в охранной зоне. В результате на данной особо охраняемой природной территории не осталось площадей, не затронутых огнем (Шинкаренко и др., 2020). Регулярные пожары приводят к резкому снижению обилия полыней и других полукустарничков (Тереножкин, 1936) и замещению злаковыми ассоциациями сообществ с доминированием полыней (Родин, 1981).

В исследуемом регионе разновременные гари представлены мятливоковыми (*Poa bulbosa*), житняково-мятливоковыми (*Poa bulbosa*–*Agropyron* spp.), мятливо-житняковыми (*Agropyron* spp.–*Poa bulbosa*), мятливо-ковыльными (*Stipa capillata*–*Poa bulbosa*) и ковыльно-мятливоковыми сообществами (*Poa bulbosa*–*Stipa capillata*).

В соответствии с тенденциями динамики растительного покрова сбитых пастбищ на полигоне «Тавн-Гашун» для проведения полевого спектрометрирования были выделены участки, не пройденные пожаром, со следующими доминирующими сообществами: мятливое с участием декурании Софии (*Poa bulbosa*+*Descurainia sophia*) с проективным покрытием 45%, мятливо-ковыльное (*Stipa capillata*–*Poa bulbosa*) с проективным покрытием 40%, а также подстилаящая их открытая почва (слабогумусированный песок). *Poa bulbosa* на момент исследований находился в фазе отмирания надземных частей, *Descurainia sophia* – в фазе плодоношения, *Stipa capillata* – в фазе цветения.

Исследования проведены с использованием полевого спектрометра PSR-1100. Спектрометр применяется для верификации данных дистанционного зондирования и при наземных исследованиях структуры отраженного спектра ландшафтных объектов (Ollinger, 2011). По спектрограмме просматривается неравномерное распределение спектральной энергетической яркости (СЭЯ) в видимом спектре излучения с включением ультрафиолетового и ближнего инфракрасного диапазона длины волны. Для определения распределения величины СЭЯ по спектральным диапазонам были выделены следующие участки спектра: ультрафиолетовый и фиолетовый – 320-440 нм, синий – 441-485 нм, голубой – 486-500 нм, зеленый – 501-565 нм, желтый – 566-590 нм, оранжевый – 591-625 нм, красный – 626-780 нм, инфракрасный – 780-1100 нм, с суммированием энергетической яркости в каждом диапазоне. Такой прием дает возможность сравнивать наземные результаты спектрометрических исследований со спектрально-космическими и авиационными снимками, расширяя возможности идентификации объектов на этих снимках, включая как фитоценозы, так и фенологические фазы их развития. Верификация данных дистанционного зондирования проводится путем сравнения нормированных значений отраженной энергии в значимых диапазонах съемки спектрально-космических снимков (для растений это красный 626-780 нм и инфракрасный 780-1100 нм диапазоны). При совпадении индивидуальных характеристик отраженной энергии можно с определенной вероятностью отнести выделенную область снимка к тому или иному растительному сообществу.

Оценка распределения приходящей, отраженной и поглощенной энергии проводилась с оценкой спектральной энергетической яркости, измеряемой в мВт/(м<sup>2</sup>·ср·нм) в диапазоне от 320 до 1100 нм, включающем видимый, ультрафиолетовый (320-380 нм) и инфракрасный (781-1100 нм) диапазоны.

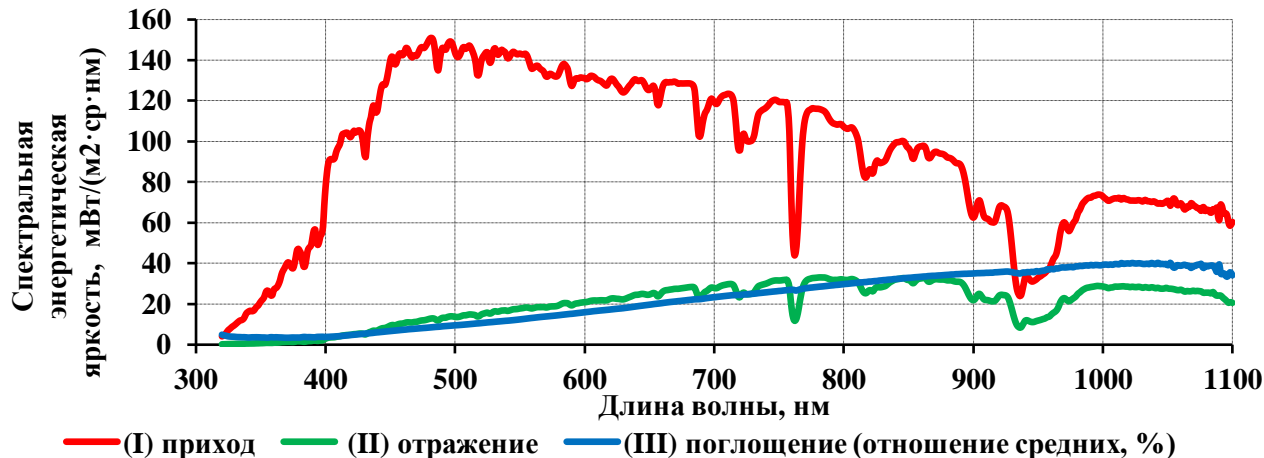
Для анализа результатов исследований было использовано программное обеспечение DARWin SP Data Acquisition, которое позволяет определять спектральные характеристики излучения, а также 19 индексов растительности, включая нормализованный относительный вегетационный индекс

NDVI. DARWin SP позволяет сопоставлять несколько спектров на одном и том же графике для удобства анализа с использованием встроенных программ. Перед съемкой проводится калибровка прибора на эталонном белом диске с 95% альбедо, при этом прибор по величине практически полной отраженной энергии устанавливает величину приходящей. Прибор оборудован встроенным приемником геопозиционирования на местности по четырем глобальным системам – GPS, ГЛОНАС, Байду и Galileo, что дает возможность определения координат с точностью до 1 м.

При проведении спектральных исследований энергетических характеристик компонентов ландшафтов были получены статистические характеристики, позволяющие определить индивидуальные особенности отражения по диапазонам спектра, спектральные индексы, а также средние значения и стандартное отклонение. Сравнимость полученных результатов зависит как от количества приходящей энергии солнца, так и от условий съемки. Для выполнения требования сравнимости необходимо отсутствие облачности, затенения объекта съемки и периодическая калибровка прибора. Для достоверности статистической обработки результатов малых выборок необходимо обеспечить минимум пятикратную повторность съемки.

### Результаты и обсуждение

Анализ результатов исследований спектрального излучения верхнего слоя почв, в нашем случае слабогумусированных песков, а также фитоценозов на выбранных объектах исследований, позволяет определить характерные особенности компонентов, составить каталог индивидуальных спектров и индексов для выбранных условий съемки. На рисунке 1 приведена спектрограмма средних значений спектральной энергетической яркости по результатам 10 измерений СЭЯ растительного фитоценоза (*Poa bulbosa*+*Descurainia sophia*). Средние значения СЭЯ определялись для каждой длины волны в диапазоне от 0.2 до 29.9 мВт/(м<sup>2</sup>·ср·нм), соответственно, стандартные отклонения от среднего тоже. Получены фактические значения стандартных отклонений для каждой длины волны, которые находятся в диапазоне от 0.014 до 2.07 и в относительных величинах составляют около 7% от средних значений СЭЯ.



**Рис. 1.** Спектрограмма распределения энергетической яркости приходящей (I), отраженной (II) и поглощенной (III) энергии для растительного фитоценоза *Poa bulbosa*, *Descurainia sophia* по длине волны.

На дату проведения исследований *Poa bulbosa* находился на фазе отмирания побегов, а *Descurainia sophia* закончила вегетацию и плодоносила. У *Stipa capillata* только начиналась фаза колошения. Соответственно этому, должны отличаться и спектрально-отражательные характеристики растительных сообществ, что необходимо учитывать при сравнении величин отраженной и поглощенной энергии. Для фотосинтезирующей растительности характерен максимум поглощения в красной области спектра и максимум отражения в ближней инфракрасной области. Особый интерес представляет сравнение спектров отраженного излучения у высохшей растительности и открытой почвы. Многолетние злаки, эфемеры и эфемероиды заканчивают вегетацию в начале-середине лета,

в это же время отмечаются минимумы вегетационного индекса (Шинкаренко, Барталев, 2020). Разделение высохшей растительности и открытой почвы представляет собой важную задачу при определении земель, лишенных растительного покрова. Спектрометрия высохшей растительности показала, что значения отражённой энергии для нее отличаются в меньшую сторону: в красном диапазоне суммарная отраженная энергия составляет  $1933 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм})$ , в инфракрасном –  $3767 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм})$ . По сравнению с открытыми почвами ( $6824$  и  $11205 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм})$ ) эти значения практически в 3 раза меньше, что свидетельствует о том, что высохшая растительность активно использует энергию для разложения органики. Для фитоценоза *Poa bulbosa*+*Descurainia sophia* стандартное отклонение отраженной энергии составляет 1.36, вегетационный индекс  $\text{NDVI}=0.208$ . Для *Stipa capillata* стандартное отклонение – 3.94,  $\text{NDVI}=0.316$ . Для *Calligonum aphyllum* стандартное отклонение – 9.81,  $\text{NDVI}=0.354$ . Для верхнего слоя почвы стандартное отклонение – 9.28,  $\text{NDVI}=0.106$ . Наибольшее среднее значение  $\text{NDVI}$  отмечено для *Calligonum aphyllum*, т.к. на момент проведения исследования он находился в активном вегетационном периоде.

На рисунке 2 приведены диаграммы распределения суммарной энергетической яркости в выбранных диапазонах длины волны для фитоценоза *Poa bulbosa*+*Descurainia sophia*, для *Stipa capillata*, *Calligonum aphyllum* и для почвы (песок слабогумусированный), которые показывают различия характеристик СЭЯ растительности и почв. Так, рассматривая соотношение поглощённой и отраженной энергии в инфракрасной области спектра, можно отметить, что вегетирующая растительность (*Stipa capillata*, *Calligonum aphyllum*) поглощает меньше энергии, чем отражает, в 2 и 1.2 раза соответственно, а почва и прекративший вегетацию мятлик (*Poa bulbosa*) отражает больше, чем поглощает, в 1.2 и 1.8 раза соответственно. Таким образом, особенности отражения вегетирующих растений и прекративших вегетацию дают возможность сделать выводы о стадии их развития. Пески слабогумусированные на полигоне исследований отличаются меньшим значением поглощенной энергии в ультрафиолетовом и большим в инфракрасном диапазоне спектра по сравнению с растительным фитоценозом. Среднее значение альbedo верхнего слоя почвы по всему диапазону спектра – 0.33 со стандартным отклонением 0.097, при этом максимальное альbedo в ближней инфракрасной области спектра – 0.51, а минимальное – 0.06 в ультрафиолетовой.

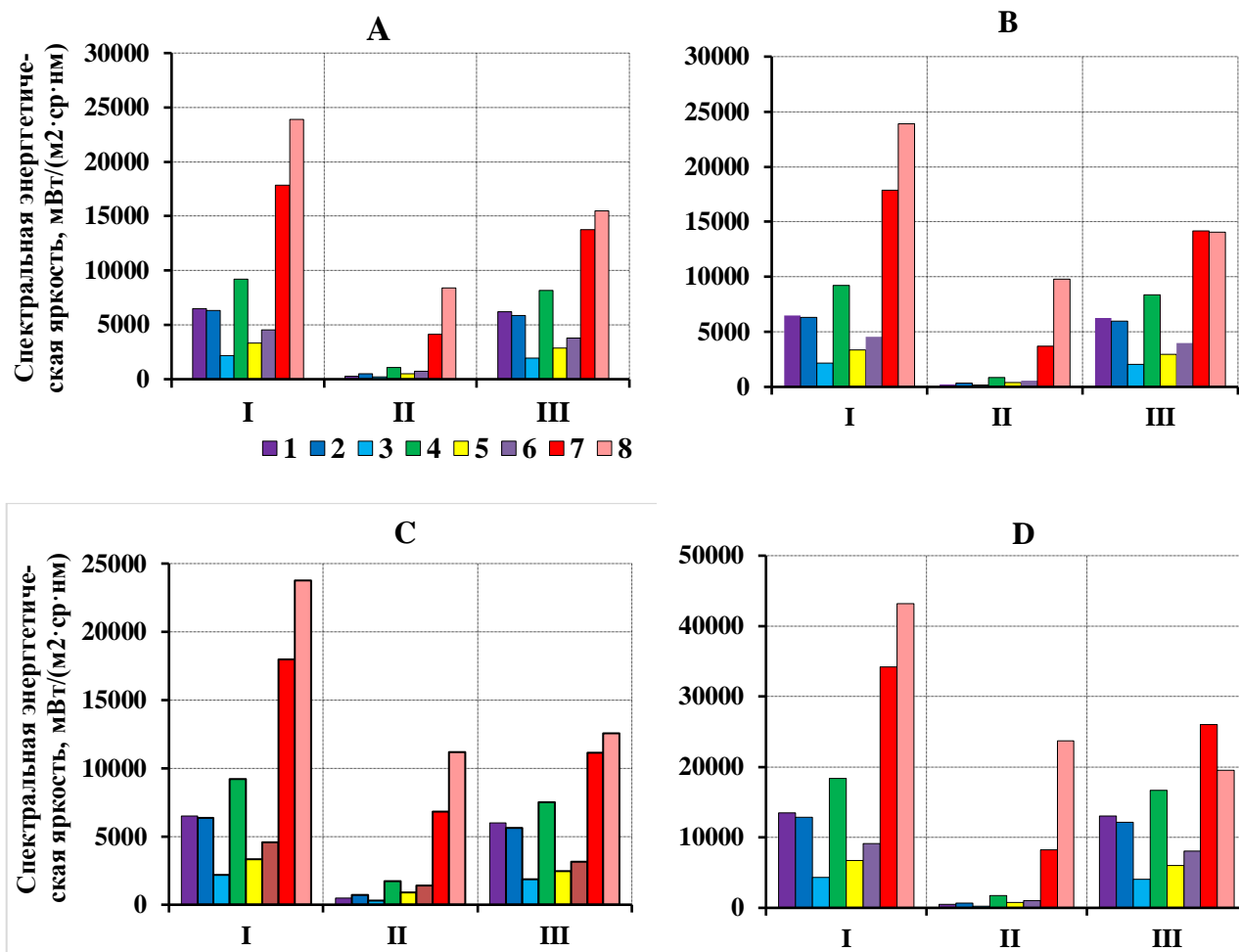
На рисунке 3 приведены диаграммы распределения альbedo по длине волны для фитоценозов *Poa bulbosa*+*Descurainia sophia*, *Stipa capillata*, *Calligonum aphyllum* и для альbedo верхнего слоя почвы. По полученным результатам можно сделать вывод о том, что наименьшая отражательная способность для всех элементов естественных ландшафтов отмечается в коротковолновом диапазоне и наибольшая – в инфракрасном. Установлено, что у верхнего слоя почвы стандартное отклонение средних – 0.16, при максимуме 0.33 и минимуме 0.06. Для фитоценоза *Poa bulbosa*+*Descurainia Sophia* (среднее – 0.23, максимальное – 0.40, минимальное – 0.03) стандартное отклонение составляет 0.13, что ниже значений для фитоценоза *Stipa capillata*, где стандартное отклонение – 0.12 (среднее – 0.24, максимальное – 0.49, минимальное – 0.02), за исключением ультрафиолетового и фиолетового диапазонов, что показывает большее поглощение приходящей энергии в инфракрасном диапазоне. Для *Calligonum aphyllum* значения альbedo выше: среднее – 0.30, максимальное – 0.57, минимальное – 0.03, стандартное отклонение – 0.23.

### Выводы

В результате исследований установлено, что пески слабогумусированные на полигоне отличаются меньшим значением поглощенной энергии в ультрафиолетовом и большим в инфракрасном диапазоне спектра по сравнению с растительным фитоценозом. Среднее значение альbedo верхнего слоя почвы по всему диапазону спектра – 0.33. Среднее альbedo фитоценоза *Poa bulbosa*+*Descurainia sophia* – 0.23, что ниже среднего значения альbedo фитоценоза *Stipa capillata* – 0.24, кроме ультрафиолетового и фиолетового диапазонов, что показывает большее поглощение приходящей энергии. Для *Calligonum aphyllum* значение среднего альbedo – 0.30.

Установлены индивидуальные спектральные характеристики фитоценозов: для *Poa bulbosa*+*Descurainia sophia*, среднее значение отраженной энергии по всем диапазонам спектра –  $20.2 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм})$ , стандартное отклонение отраженной энергии – 9.90, вегетационный индекс  $\text{NDVI}=0.208$ ; для *Stipa capillata* среднее значение отраженной энергии по всем диапазонам спектра –  $20.5 \text{ мВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{ср} \cdot \text{нм})$ , стандартное отклонение отраженной энергии – 12.36, вегетационный индекс  $\text{NDVI}=0.316$ ; для *Calligonum aphyllum* среднее значение отраженной энергии по всем диапазонам

спектра – 47.2 мВт/(м<sup>2</sup>·ср·нм), стандартное отклонение отраженной энергии – 9.81, вегетационный индекс NDVI=0.354. Для почвы среднее значение отраженной энергии по всем диапазонам спектра – 30.3 мВт/(м<sup>2</sup>·ср·нм), стандартное отклонение отраженной энергии – 9.28, вегетационный индекс NDVI=0.106. Наибольшее среднее значение NDVI отмечено для *Calligonum aphyllum*, т.к. он находился в вегетационном периоде.

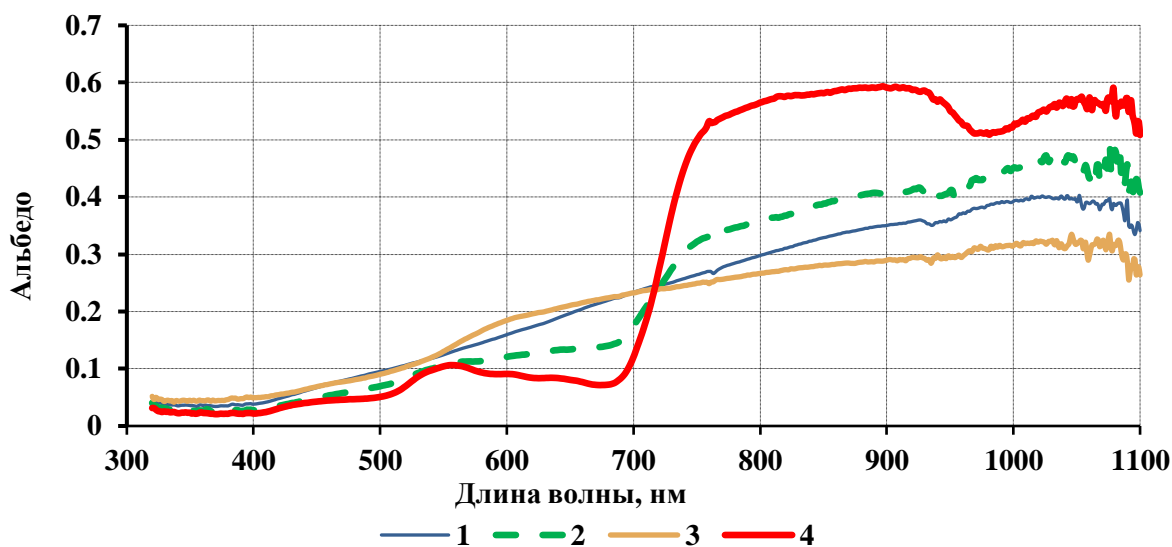


**Рис. 2.** Распределение суммарной энергетической яркости приходящей (I), отраженной (II) и поглощенной (III) энергии для растительного фитоценоза *Poa bulbosa*+*Descurainia sophia* (A), *Stipa capillata* (B), почвы (C) и *Calligonum aphyllum* (D) по диапазонам длины волны. Условные обозначения: 1 – ультрафиолетовый и фиолетовый (320-440 нм), 2 – синий (441-485 нм), 3 – голубой (486-500 нм), 4 – зеленый (501-565 нм), 5 – желтый (566-590 нм), 6 – оранжевый (591-625 нм), 7 – красный (626-780 нм), 8 – инфракрасный А (780-1100 нм).

Можно отметить, что наименьшая отражательная способность для всех элементов естественных ландшафтов характерна для коротковолнового диапазона, а наибольшая – для инфракрасного.

Таким образом, использование статистической оценки результатов спектрометрических измерений позволило установить распределение отраженной энергии основных фитоценозов и почв по длине волны и по диапазонам длин волн на тестовых участках опустыненных территорий, расположенных на территории Черных Земель. Эти данные обеспечивают возможность создания энергетических (спектральных) эталонов фактического состояния как отдельных компонентов ландшафтов (растений, их сообществ, находящихся на разных стадиях развития и почв), так и ландшафтных комплексов в целом. Исследования СЭЯ при помощи спектрометра выявили ряд проблем, связанных с изменением абсолютных значений приходящей энергии при изменении

условий съемки (положение солнца, облачность и др.), что вызывает необходимость перехода на нормированные величины (отношение отраженной или поглощенной энергии к приходящей), дающие возможность получать стабильные относительные результаты. Такие эталоны повышают точность идентификации спектрональных данных дистанционного зондирования и являются основой для проведения их автоматизированного дешифрирования и картографирования.



**Рис. 3.** Распределения альбедо для растительного фитоценоза *Poa bulbosa*+*Descurainia sophia* (1), *Stipa capillata* (2), верхний слой почвы (3), *Calligonum aphyllum* (4) по длине волны.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках Госзадания ФНЦ агроэкологии РАН НИР № 0713-2019-0001 по теме «Провести теоретическое и геоинформационное моделирование, мониторинг, прогноз процессов деградации компонентов агролесоландшафтов на основе аэрокосмических исследований в лесостепной, степной и пустынной зонах и разработать способы управления противодеградационными агролесомелиоративными технологиями предотвращения опустынивания земель, повышения их плодородия и формирования экологического каркаса» (№ госрегистрации – АААА-А-116122010038-9).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бананова В.А., Лазарева В.Г. 2014. Тенденции изменения ботанического разнообразия под влиянием опустынивания в республике Калмыкия // Аридные экосистемы. Т. 20. № 2 (59). С. 87-96. [Bananova V.A., Lazareva V.G. 2014. Trends of Changes in the Botanical Diversity under the Influence of Desertification in the Republic of Kalmykia // Arid Ecosystems. Vol. 4. No. 2. P. 119-126.]
- Власенко М.В., Кулик А.К., Салугин А.Н. 2019. Оценка экологического состояния и потерь продуктивности аридных пастбищных экосистем Сарпинской низменности // Аридные экосистемы. Т. 25. № 4 (81). С. 71-81. [Vlasenko M.V., Kulik A.K., Salugin A.N. 2019. Evaluation of the Ecological Status and Loss of Productivity of Arid Pasture Ecosystems of the Sarpa Lowland // Arid Ecosystems. Vol. 9. No. 4. P. 273-281.]
- Горяев И.А. 2019. Галофитные полыньники на Прикаспийской низменности (в пределах Калмыкии) // Ботанический журнал. Т. 104. № 1. С. 93-106.
- Ерошенко Ф.В., Барталев С.А., Лапенко Н.Г., Самофал Е.В., Сторчак И.Г. 2018. Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15. № 7. С. 53-66.
- Золотокрылин А.Н., Титкова Т.Б. 2004. Природная переходная зона на Прикаспийской низменности // Известия РАН. Серия Географическая. № 2. С. 92-99.
- Крутских Н.В., Кравченко И.Ю. 2018. Использование космоснимков Landsat для геоэкологического мониторинга урбанизированных территорий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 15. № 2. С. 159-168.
- Кулик К.Н., Рулев А.С., Юферев В.Г. 2015. Геоинформационный анализ динамики опустынивания на территории Астраханской области // Аридные экосистемы. Т. 21. № 3 (64). С. 23-32. [Kulik K.N., Rulev A.S., Yuferev V.G. 2015. Geoinformation Analysis of Desertification Dynamics in the Territory of Astrakhan Oblast //



- Arid Ecosystems. Vol. 5. No. 3. P. 134-141.]
- Куст Г.С., Андреева О.В., Лобковский В.А.* 2020. Нейтральный баланс деградации земель – современный подход к исследованию засушливых регионов на национальном уровне // Аридные экосистемы. Т. 26. № 2 (53). С. 3-9. [*Kust G.S., Andreeva O.V., Lobkovskiy V.A.* 2020. Land Degradation Neutrality: the Modern Approach to Research on Arid Regions at the National Level // *Arid Ecosystems*. Vol. 10. No. 2. P. 87-92.]
- Лазарева В.Г., Бананова В.А., Нгуен В.З.* 2020. Динамика современной растительности при пастбищном использовании в Северо-Западном Прикаспии // Аридные экосистемы. Т. 26. № 4 (85). С. 26-34. [*Lazareva V.G., Bananova V.A., Nguyen Z.V.* 2020. Dynamics of Modern Vegetation for Pasture Use in the Northwestern Pre-Caspian Region // *Arid Ecosystems*. Vol. 10. No. 4. P. 276-283.]
- Родин Л.Е.* 1981. Пирогенный фактор и растительность аридной зоны // Ботанический журнал Т. 66. №.12. С. 1673-1684.
- Тереножкин И.И.* 1936. О влиянии пожаров на растительность полупустыни // Природа. № 9. С. 45-59.
- Трофимов И.А., Трофимова Л.С., Яковлева Е.П.* 2015. Дистанционные индикаторы опустынивания земель // Аридные экосистемы. 2015. Т. 21. № 1. С. 36-40. [*Trofimov I.A., Trofimova L.S., Yakovleva E.P.* 2015. Remote Indicators of Desertification // *Arid Ecosystems*. Vol. 5. No. 1. P. 24-27.]
- Шинкаренко С.С.* 2021. Изменение спектрально-отражательных характеристик зональных ландшафтов Северного Прикаспия при пирогенном воздействии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 18. № 3. С. 179-193.
- Шинкаренко С.С., Барталев С.А.* 2020. Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 17. № 5. С. 179-194.
- Шинкаренко С.С., Ткаченко Н.А., Барталев С.А., Юферева В.Г., Кулик К.Н.* 2020. Пыльные бури на юге европейской части России в сентябре-октябре 2020 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 17. № 5. С. 291-296.
- Cherepanov S.K.* 2007. *Vascular Plants of Russia and Adjacent States (the Former USSR)*. Cambridge: Cambridge University Press. 517 p.
- Cavender-Bares J., Gamon J.A., Hobbie S.E., Madritch M.D., Meireles J.E., Schweiger A.K., Townsend P.A.* 2017. Harnessing Plant Spectra to Integrate the Biodiversity Sciences across Biological and Spatial Scales // *American Journal of Botany*. No. 104. P. 966-969.
- Drolet G.G., Middleton E.M., Huemmrich K.F., Hall F.G., Amiro B.D., Barr A., Black T.A., McCaughey H., Margolis H.A.* 2008. Regional Mapping of Gross Light-Use Efficiency Using MODIS Spectral Indices // *Remote Sensing of Environment*. No. 112. P. 3064-3078.
- Drusch M., Del Bello U., Carlier S., Colin O., Fernandez V., Gascon F., Hoersch B., Isola C., Laberinti P., Martimort P., Meygret A., Spoto F., Sy O., Marchese F., Bargellini P.* 2012. Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services // *Remote Sensing of Environment*. No. 120. P. 25-36.
- Grigor'ev A.N., Shilin B.V.* 2013. Analysis of Seasonal Variations of the Spectral Characteristics of Landscape Components, Using the Data of the Hyperion Space Video Spectrometer // *Journal of Optical Technology*. Vol. 80. Is. 6. P. 360-362.
- Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G.* 2002. Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the MODIS Vegetation Indices // *Remote Sensing of Environment*. No. 83. P. 195-213.
- Klein I., Gessner U., Kuenzer C.* 2012. Regional Land Cover Mapping in Central Asia Using MODIS Time Series // *Applied Geography*. No. 35. P. 1-16.
- Kulik K.N., Petrov V.I., Rulev A.S., Kosheleva O.Y., Shinkarenko S.S.* 2018. On the 30th Anniversary of the "General Plan to Combat Desertification of Black Lands and Kizlyar Pastures" // *Arid Ecosystems*. Vol. 8. No. 1. P. 5-20.
- Kulik K.N., Rulev A.S., Yuferev V.G.* 2010. Aerospace Monitoring of Pastures in Conditions of Dry Steppe and Semi-Desert // *Science, Technique and Innovation Technologies in an Epoch of Great Revival: Abstracts of Reports, International Scientific Conference, June 12-14, 2010*. Ashgabat. P. 406-407.
- Lu L., Kuenzer C., Guo H., Li Q., Long T., Li X.* 2014. A Novel Land Cover Classification Map Based on MODIS Time-series in Nanjing, China // *Remote Sensing*. No. 6. P. 3387-3408.
- Ollinger S.V.* 2011. Sources of Variability in Canopy Reflectance and the Convergent Properties of Plants // *New Phytologist*. No. 189. P. 375-394.
- Yuferev V.G., Zavalin A.A., Pleskachev Y.N., Vdovenko A.V., Fomin S.D., Vorontsova E.S.* 2019. Degradation of Landscapes in the South of the Privolzhsky Upland // *Journal of Forest Science*. No. 65. P. 195-202.