

Результаты классификации спектров, полученных видеоспектральной системой с борта МКС в рамках космического эксперимента «Ураган»

Б. И. Беляев¹, М. Ю. Беляев², Л. В. Катковский¹, А. О. Мартинов¹,
И. В. Рассказов², Л. А. Смоленцева²

¹ *Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко БГУ
Минск, 220045, Беларусь*

E-mail: antonmartenov@gmail.com

² *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва
Королёв, 141070, Россия*

E-mail: post@rsce.ru

Представлены результаты планирования и обработки данных тестовых включений новой модификации спектрометрической научной аппаратуры видеоспектральной системы (НА ВСС) с борта Международной космической станции (МКС) в рамках космического эксперимента «Ураган». Предложен способ обработки спектров высокого спектрального разрешения, основанный на уменьшении размерности и кластеризации данных, позволяющий классифицировать спектры схожих объектов. При помощи метода главных компонент создаётся трёхмерная система координат, в которой отображается исследуемая спектральная выборка. Данные в полученных осях классифицируются без обучения при помощи метода иерархической кластеризации. Проанализированы однородные преимущественно песчаные территории различных пустынь (Намибской, Ливийской, Аравийской). В результате двухэтапной кластеризации получены чёткие кластеры и соответствующие спектры песков пустынь разных регионов, которые занесены в базу данных и могут быть использованы для целевого поиска и тематической классификации таких объектов по спутниковым данным.

Ключевые слова: космический эксперимент, МКС, видеоспектральная аппаратура, классификация, метод главных компонент, подспутниковый полигон, спектральная плотность энергетической яркости

Одобрена к печати: 02.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-51-63

Введение

Космический эксперимент «Ураган» (Беляев, 2021; Беляев и др., 2014а, б, 2015а, б, 2019) представляет собой научный проект, включающий в себя мониторинг и анализ потенциально опасных и уже возникших чрезвычайных ситуаций на Земле с борта российского сегмента (РС) Международной космической станции (МКС). Одна из задач космического эксперимента заключается в отработке научной аппаратуры и методов изучения Земли, что позволяет проводить комплексные исследования различных объектов и явлений на поверхности планеты и в её атмосфере. Важной составляющей эксперимента является использование аппаратуры, способной работать в различных областях спектра электромагнитного излучения, что обеспечивает получение детальных данных о состоянии изучаемых объектов.

Одним из ключевых элементов эксперимента является научная аппаратура видеоспектральной системы (НА ВСС) (Беляев и др., 2014а, 2016), разработанная НИИПФП им. А. Н. Севченко БГУ по заказу и техническому заданию ПАО «РКК «Энергия». Научная аппаратура ВСС конструктивно выполнена в виде компактного переносного автономного моноблока, предназначенного для проведения измерений через иллюминаторы МКС. Новая модификация НА ВСС была доставлена на МКС в мае 2023 г. В этом же году в рамках тестовых включений НА ВСС проведена съёмка международных подспутниковых полигонов сети RadCalNet (*англ.* Radiometric Calibration Network) и других объектов с целью верификации данных.

Научная аппаратура ВСС позволяет получать данные одновременно с пяти датчиков: блока изображения (БИ), электронного видеоискателя (обзорной видеокамеры) (ЭВИ), трёх матричных спектрометров, что необходимо для анализа и верификации данных о земной поверхности.

Данные НА ВСС представляют собой (рис. 1):

- фотоизображения БИ (11600×8700 пикселей) в видимом и ближнем ИК-диапазоне длин волн с полем зрения 31,6×44,5 км с высоты 400 км в надир;
- фотоизображения обзорной видеокамеры в видимом диапазоне длин волн с полем зрения 156×120 км с высоты 400 км в надир;
- 6132 (по количеству строк трёх спектральных матриц) спектра отражённого излучения (из них 126 пространственно независимых с учётом ширины аппаратной функции) подстилающих поверхностей трёх матричных спектрометров в диапазоне 400–950 нм с разрешением 2–5 нм, поле зрения которых «привязано» к каждому изображению БИ.

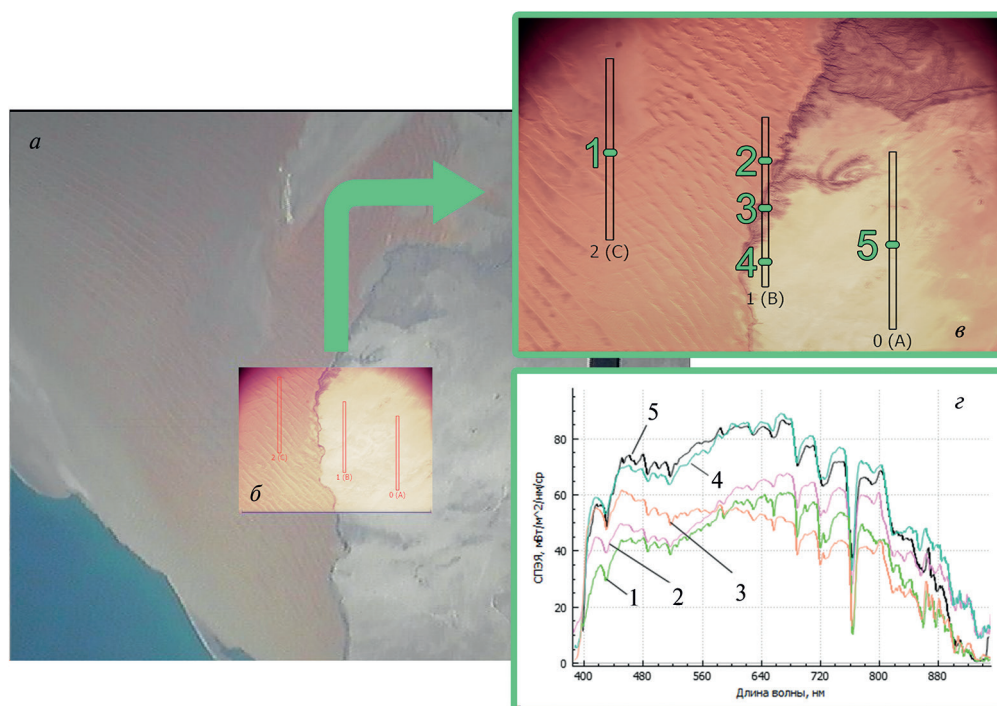


Рис. 1. Получаемые НА ВСС данные: совмещённое изображение электронного видеоискателя (а) и блока изображения с проекцией входных щелей (б, в); спектры песчаных поверхностей (СПЭЯ — спектральная плотность энергетической яркости) (г). Три чёрных прямоугольника в области в — проекции входных щелей трёх спектрометров на поверхность Земли

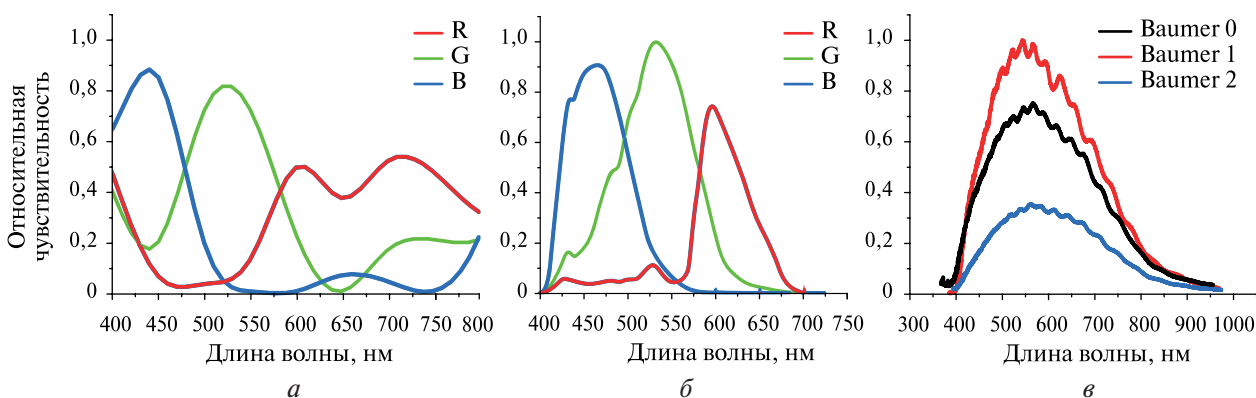


Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность сенсора блока изображения (а), сенсора ЭВИ (б), трёх матричных спектрометров Baumer (в)

Спектральная чувствительность БИ, ЭВИ и трёх спектрометров на матрицах Baumer представлена на *рис. 2* (см. с. 52). Как видно по *рис. 2а*, особенности чувствительности сенсора БИ приводят к увеличению относительного вклада красного канала в результирующее изображение.

Области исследования, планирование наблюдений и данные

Тестовые съёмки НА ВСС было решено проводить в основном над однородными песчаными территориями пустынь. Этот выбор обусловлен следующими факторами:

- спектральные характеристики этих объектов почти не зависят от времени года;
- песчаные поверхности обладают высокой отражательной способностью и хорошо подходят в качестве калибровочных полигонов;
- в одной из выбранных пустынь находится международный калибровочный полигон сети RadCalNet, на котором постоянно проводятся наземные измерения;
- орбита МКС позволяет чаще снимать экваториальные широты, чем северные/южные;
- съёмка пустынь экваториальных широт ведётся в надир, что более предпочтительно в сравнении с наклонным визированием.

Для проведения съёмок земной поверхности научной аппаратурой с борта российского сегмента МКС важно не только учитывать прогноз облачности, время года, но и сделать правильно расчёт времени пролёта над исследуемым объектом, угла съёмки, определить тип подстилающей поверхности, освещённость района наблюдений и подобрать параметры спектральной съёмки.

После расчётов и выбора всех необходимых условий проведения съёмки, настроек оборудования отделом-куратором разрабатываются исходные данные. Далее они передаются в главную оперативную группу управления (ГОГУ) для создания радиограмм и внесения сеанса в план полёта. Во время сеанса на российском сегменте МКС с научной аппаратурой (*рис. 3*) задействованы специалисты Центра управления полётами, ГОГУ и отдела-куратора ПАО «РКК «Энергия» для прояснения вопросов по радиограмме или по работе самой аппаратуры.



Рис. 3. Работа с НА ВСС на борту РС МКС

После сеанса проводится анализ не только результатов, полученных в ходе выполнения съёмки, но и самой радиограммы на основе вопросов и замечаний космонавтов. Таким образом, результатами тестовых сеансов становятся стабильная работа аппаратуры, получение результатов требуемого качества и отлаженная радиограмма по работе с аппаратурой.

Подбор стратегии и параметров съёмки достаточно длительный процесс, так как требует анализа результатов после каждой съёмки. Поэтому выбор наиболее подходящих параметров возможен только опытным путём в рамках серии тестовых включений. Для первого тестового включения были подобраны параметры по результатам наземных испытаний.

В ходе проведения тестовых съёмок было выявлено следующее:

- из-за конструкции НА ВСС есть ограничения по съёмке объектов с установочным кронштейном, поэтому съёмку возможно проводить в надир с небольшим отклонением до 10° ;
- при съёмке без помощи установочного кронштейна происходит смазывание фотографий и области спектрометрирования;
- съёмку объекта предпочтительно проводить в серийном режиме, предварительно наведя научную аппаратуру в позицию пролёта над исследуемым объектом;

- при серийной съёмке необходимо заранее сделать единичный тестовый снимок до времени пролёта над объектом, параметры для съёмки выставляются перед запуском серии;
- при сравнении результатов с доступными наземными выявлено небольшое различие, обусловленное скорее всего пропускной способностью иллюминатора, которое надо учитывать при оценке и сравнении данных.

Для верификации спектрометров в качестве тестового объекта была выбрана пустыня Намиб из-за благоприятной климатической обстановки.

В ходе съёмок 09.06.2023 и 19.07.2023 с борта МКС были получены данные по различным по типу и составу песчаным поверхностям. Спектрометрируемые участки находятся на территории пустыни Намиб (калибровочный полигон Гобабеб), Ливийской пустыни, Объединённых Арабских Эмиратов (г. Дубай и окрестности) и Замбии. Помимо этого, в анализ включены данные, полученные НА ВСС 04.10.2023 во время съёмки растительного покрова Воронежской области Российской Федерации. Кроме описанных поверхностей в данных присутствуют воды Средиземного моря и Персидского залива. Песчаные поверхности разных регионов отличаются друг от друга составом, а значит, и спектрами отражения.

Намибская пустыня, Гобабеб

Намибская пустыня — одна из самых сухих и жарких пустынь в мире, расположенная на юго-западном побережье Африки. Её пески имеют разнообразные оттенки от красного до белого, в зависимости от содержания железа и минералов. Преимущественно северная часть пустыни Намиб представляет собой каменную пустыню с голыми скальными плато и долинами с редкими полями песчаных дюн и рассеянными по местности выветренными горными породами. Более или менее интенсивным оранжевым цветом пустынный песок обязан богатым железом грунтовым водам и морскому воздуху. Каждая оранжевая песчинка «обёрнута» в оксид железа Fe_2O_3 (<https://earthobservatory.nasa.gov/images/146138/sandscapes-of-the-namib-desert>).

Таким образом, более красный барханный песок был образован путём выветривания горных пород, но приобрёл отличные от них свойства из-за оксида железа.

Ливийская пустыня

Ливийская пустыня занимает большую территорию и состоит из разных типов песка, которые имеют разную форму, цвет и размер. Один из самых распространённых типов песка — это кварцевый песок, который образуется из разрушения гранитных пород. Кварцевый песок, который может образовывать дюны, имеет светло-жёлтый или бежевый цвет и мелкую структуру. Другой тип песка — это корундовый песок, образующийся путём разрушения базальтовых пород. Он имеет тёмно-красный или коричневый цвет и крупную структуру. Корундовый песок может сформировать острые гряды или холмы, которые называются эргами. Третий тип песка — это гипсовый песок, образующийся из осадков солей в засоленных озёрах или водоёмах. Он имеет белый или серый цвет и мягкую структуру.

Снятый НА ВСС участок находится в пустыне Сахара. Он является смесью регов и сери-ров. Реги — это галечниковые пустыни, в которых песчаный материал вымыт водой или вынесен ветром. Сериры — это глинистые равнины с солончаками (называются шоттами), они лежат в наиболее низких участках областей опускания.

Аравийская пустыня

Геология песков северного побережья Аравийского полуострова характеризуется высокой сложностью и разнообразием. Пески образовались в результате эрозии и дефляции скальных пород, а также переноса и осаждения морскими течениями и ветрами. Пески имеют раз-

личную минеральную составляющую, размер зёрен, форму и окраску. В зависимости от этих факторов, пески делятся на несколько типов, таких как кварцевые, карбонатные, гипсовые, силикатные и др. Пески также отличаются по своим свойствам, таким как проницаемость, пористость, плотность, упругость и др. Эти свойства влияют на способность песков к накоплению и сохранению подземных вод, нефти и газа.

Песчаные отложения пустыни перекрывают коренные эоценовые и меловые породы, часто сочетаются с участками галечниковых отложений (регами) (Бабаев и др., 1986). Важным элементом рельефа являются сухие русла (вади), в которых формируется, как правило, подрусловой водоток, имеющий большое значение для водоснабжения. В работе (Рахимова и др., 2020) была отобрана проба песков на территории Дубая (Объединённые Арабские Эмираты) в 50 км от Персидского залива. Пески тёмно-бежевого цвета. По результатам рентгенофазового анализа пески состоят из кварца (43,1 %), кальцита (42,3 %), альбита (7,8 %), анортита (2,2 %), доломита (1,9 %), ортоклаза (1,7 %), биотита (0,7 %), анкерита (0,4 %), единичных амфиболов.

Для анализа отобрано 10 снимков НА ВСС. Для каждого изображения для трёх спектрометров взяты значения спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) спектров с прореживанием вдоль пространственной координаты приёмных матриц для уменьшения обрабатываемого объёма данных (взят каждый 50-й спектр из матрицы с 2044 спектрами, начиная с 300-го до 1800-го, чтобы исключить спектры на краях матрицы с более низкой чувствительностью). Всего использовано 607 спектров СПЭЯ НА ВСС, приведённых к единому зенитному углу Солнца и скорректированных на пропускание иллюминатора МКС.

Коррекция на угол Солнца проводится посредством деления значений спектра на косинус зенитного угла Солнца. Таким образом происходит перерасчёт спектра СПЭЯ к нулевому зенитному углу.

Анализ можно проводить в полном либо в суженном спектральном диапазоне. В данном случае он был проведён в диапазоне 450–800 нм, чтобы исключить значения на краях спектрального диапазона НА ВСС, где выше уровень шума.

Метод анализа

Спектры СПЭЯ НА ВСС в исследуемом диапазоне 450–800 нм представляют собой числовые значения СПЭЯ в 350 спектральных каналах, полученные с использованием лабораторных калибровок, что в десятки раз превышает количество каналов мультиспектральных изображений. При анализе данных большой размерности хорошо работает метод главных компонент PCA (*англ.* Principal Components Analysis) (Jolliffe, 2002). Метод PCA — это один из способов уменьшить размерность данных в исследуемых данных при сохранении как можно большей информативности. Данные с меньшим количеством переменных легче изучать, визуализировать и использовать для дальнейшей классификации. Главные компоненты — это новые переменные, с помощью которых описываются исследуемые спектры. Метод PCA преобразовывает 350-мерные данные в 350-мерные данные в пространстве главных компонент, однако свойство главных компонент в том, что вдоль первой главной компоненты выборочная дисперсия данных максимальна, а выборочная дисперсия данных вдоль каждой последующей главной компоненты максимальна при условии ортогональности к предыдущей главной компоненте. Перед использованием PCA спектры НА ВСС проходят процедуру автошкалирования, которая включает в себя центрирование и нормирование. Для этого для каждой длины волны из значения спектра вычитается среднее значение всей выборки спектров на этой длине волны и результат делится на среднеквадратическое отклонение (СКО) всей выборки спектров на этой длине волны:

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_i}{\sigma(X_i)},$$

где X' — автошкалированная спектральная матрица; X — исходная спектральная матрица; i — номер спектрального канала; j — номер спектра в матрице; $\bar{X}_i$ — среднее всех значений

спектров в i -м спектральном канале; $\sigma(X_i)$ — СКО всех значений спектров в i -м спектральном канале.

Для исследуемых в работе данных первые две главные компоненты описывают 96,7 % дисперсии, а три главные компоненты — 98,8 % дисперсии. Таким образом, каждый спектр СПЭЯ НА ВСС может быть представлен в виде точки в трёхмерной системе координат с минимальной потерей информативности.

Далее представленные таким образом спектры можно классифицировать без обучения для выделения кластеров схожих объектов (Беляев и др., 2015а, б). Для кластеризации в работе использовался иерархический агломеративный метод (Лагутин, 2007; Мартинов, 2022). Преимуществом иерархических методов кластеризации является их наглядность. Также при анализе особенностей полученного дерева классификации (дендрограммы) (<https://wiki.loginom.ru/articles/dendrogram.html>) можно попытаться определить оптимальное количество задаваемых кластеров. С такой структурой (поддеревьями) удобно работать при поиске кластеров. Важными элементами алгоритма кластеризации являются метрика связывания кластеров (*англ.* Linkage) и метрика определения степени сходства спектров (*англ.* Distance).

Для анализа данных разработано программное обеспечение, реализующее описанные методы работы с ними, а также позволяющее при помощи графического пользовательского интерфейса проводить манипуляции со спектрами, настраивать параметры классификации и отображения (Мартинов, 2022).

Результаты

Для анализируемых спектров СПЭЯ в диапазоне 450–800 нм описанных выше подстилающих поверхностей проведена предобработка данных: центрирование и нормирование. Затем к данным применён PCA и получена трёхмерная система координат с осями первых трёх главных компонент с отображёнными в ней точками-спектрами. В качестве метрики связывания кластеров выбран центроид, метрики определения степени сходства спектров — стандартизированное евклидово расстояние. Число кластеров задано равным девяти.

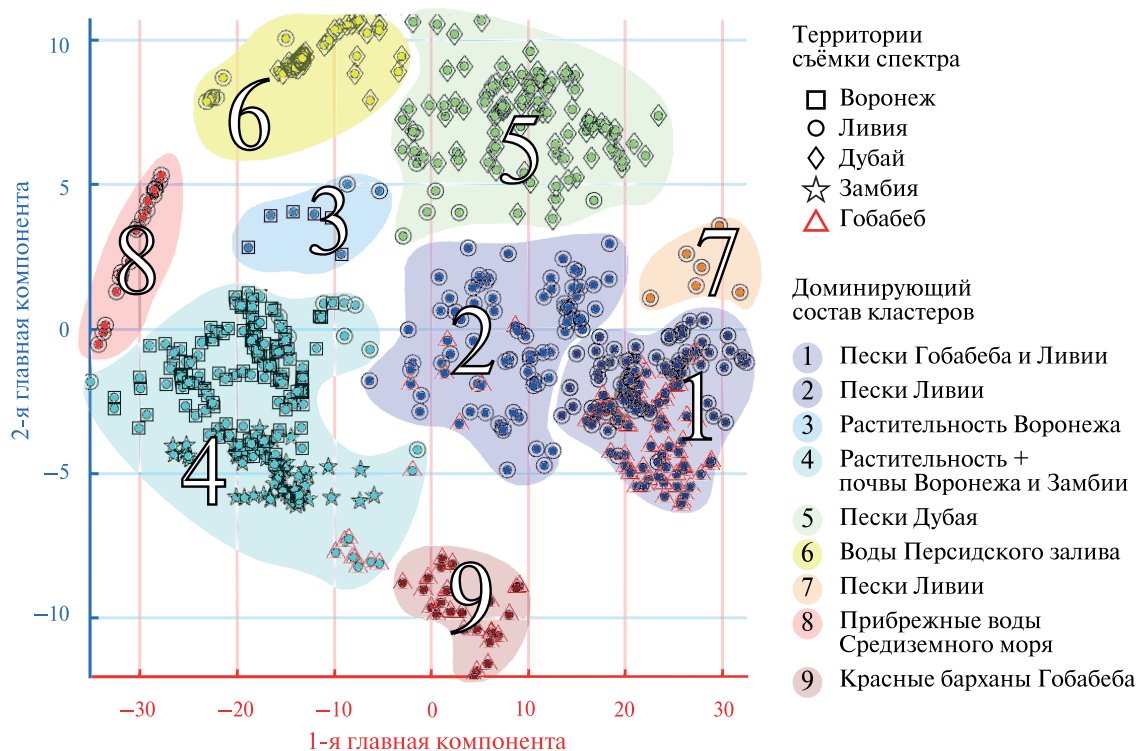


Рис. 4. Классификация всех спектров в осях первых двух главных компонент

На *рис. 4* (см. с. 56) в осях первых двух главных компонент представлен результат классификации. Цветом обозначены разные автоматически выделенные кластеры, их номер указан в центре кластера.

Для того чтобы судить о результатах классификации без обучения и о том, какие спектры объединяются в кластеры, добавлено ещё одно обозначение-символ в виде геометрической фигуры вокруг точки. В настоящей работе используются данные пяти регионов, съёмка которых проводилась при помощи НА ВСС. Каждому такому региону присвоено определённое обозначение: □ — Воронежская область, Российская Федерация; ○ — Ливия; ◇ — Дубай, Аравийская пустыня; ☆ — Замбия; Δ — Намибская пустыня, Гобабеб.

В *таблице* представлены проанализированные данные по привязанным изображениям НА ВСС, карте местности и литературе с описанием песчаных поверхностей соответствующих регионов. Результаты анализа в кратком виде представлены в виде легенды «Доминирующий состав кластеров» на *рис. 4*.

Результаты анализа кластеров

№ кластера	Преимущественная территория	Выделенный тип поверхности	Комментарий
1	Гобабеб 50 % Ливия 50 %	Пески (светлые)	1, 2, 7-й кластеры — схожие пески. Кварцевые пески, окисленные железом
2	Ливия	Пески (светлые)	1, 2, 7-й кластеры — схожие пески. Известняковые и гипсовые породы
3	Леса Воронежа	Растительность (осенняя)	Угнетённая смешанная растительная поверхность
4	Леса Воронежа Замбия	Растительность (осенняя) Пески и растительность	Угнетённая смешанная растительная поверхность Разреженный кустарник на песчаной поверхности
5	Дубай	Пески (светлые)	Кварцево-кальцитные пески
6	Ливия 10 %, Дубай 90 %	Вода	Персидский залив, прибрежные воды
7	Ливия	Пески (светлые)	1, 2, 7-й кластеры — схожие пески
8	Ливия	Вода	Средиземное море, прибрежные воды
9	Гобабеб	Пески (красные барханы)	Песок, богатый оксидом железа

Большие кластеры 1, 2 и маленький 7 находятся в непосредственной близости друг от друга на *рис. 4*, что говорит об их схожести. Всё это пески светло-жёлтого цвета, однако их геология несколько отличается. Согласно описаниям песков регионов в 1-м кластере песок несколько окислен железом, во 2-м присутствуют известняковые и гипсовые породы. Кластер 7 (из шести спектров) включает спектры разных областей и не может быть выделен в отдельный класс. Пески побережья Аравийского полуострова (рядом с г. Дубаем) представляют собой кластер 5 и, согласно проведённым пробам (Рахимова, 2020), образуются кварцево-кальцитными песками. Особый интерес представляет кластер 9, который находится на большом расстоянии от всех остальных кластеров с песочной поверхностью. Он образован песками, богатыми оксидом железа, который придаёт песку красный цвет.

Помимо песчаных поверхностей имеются кластеры 6 и 8 водных поверхностей, прибрежные воды Персидского залива и Средиземного моря соответственно. Прибрежные воды Персидского залива (рядом с Дубаем) обладают более светлым, лазурным цветом за счёт небольшой глубины (глубина всего Персидского залива не превышает 102 м).

Кластер 3, небольшой, сформирован растительностью Воронежской области в осенний период. Кластер 4 образован как растительностью Воронежской области в осенний период, так и разреженной растительностью на песчаной поверхности на территории Замбии.

На *рис. 5* представлены спектры СПЭЯ центров кластеров.

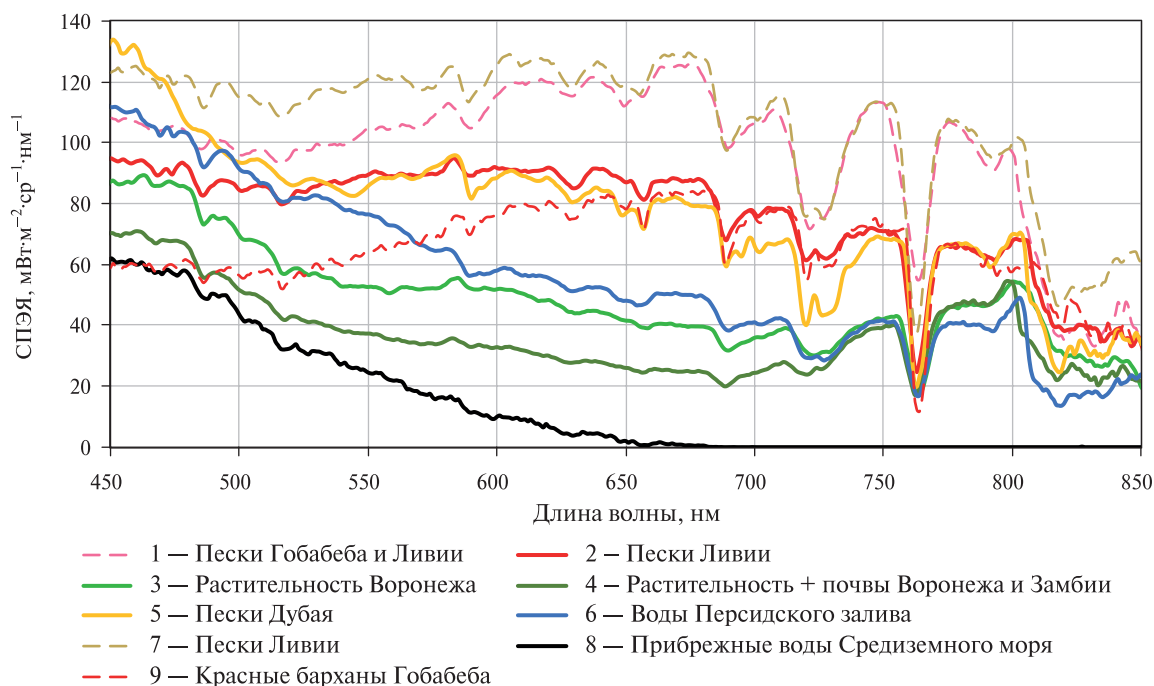


Рис. 5. Спектры центров кластеров

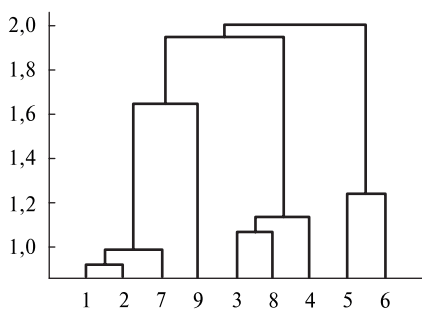


Рис. 6. Дендрограмма классов

На *рис. 6* отображена дендрограмма проведенной кластеризации. Дендрограмма — это визуализатор, используемый для представления результатов иерархической кластеризации. Она показывает степень близости отдельных объектов и кластеров, а также наглядно демонстрирует в графическом виде последовательность их объединения или разделения. Количество уровней дендрограммы соответствует числу шагов слияния или разделения кластеров. На вертикальной оси расположена шкала, на которой откладывается расстояние между объектами в пространстве признаков (Мartiнов, 2022).

Приведенная дендрограмма даёт информацию о процессе формирования кластеров и об их близости. Так, на *рис. 4* рядом расположенные кластеры 1 и 2 с большим числом спектров максимально схожи между собой (горизонтальная линия, связывающая кластеры 1 и 2 на *рис. 6* находится ниже всех остальных подобных линий). То есть спектры в этих кластерах отличаются друг от друга незначительно. Рассмотрим их более внимательно.

Второй кластер формируется песками Ливийской пустыни, а первый — и Ливийской, и Намибской (Гобабеб). Если выделить только спектры этих двух кластеров и повторить кластеризацию и построение диаграммы распределения спектров в осях главных компонент, то полученная диаграмма (*рис. 7*, см. с. 59) будет учитывать все особенности именно этой спектральной выборки схожих песков. Отсутствие спектров других типов поверхностей улучшает классификацию. Все параметры классификации были оставлены теми же, изменено только число кластеров на два. Таким образом, классификация позволила разделить спектры песков разных пустынь.

Средние спектры двух пустынь отображены на одном графике (*рис. 8*, см. с. 59). Помимо самих средних спектров на графике показано СКО для каждого спектра в виде полупрозрачной полосы того же цвета. Синий график — средний спектр Намибской пустыни (Гобабеба).

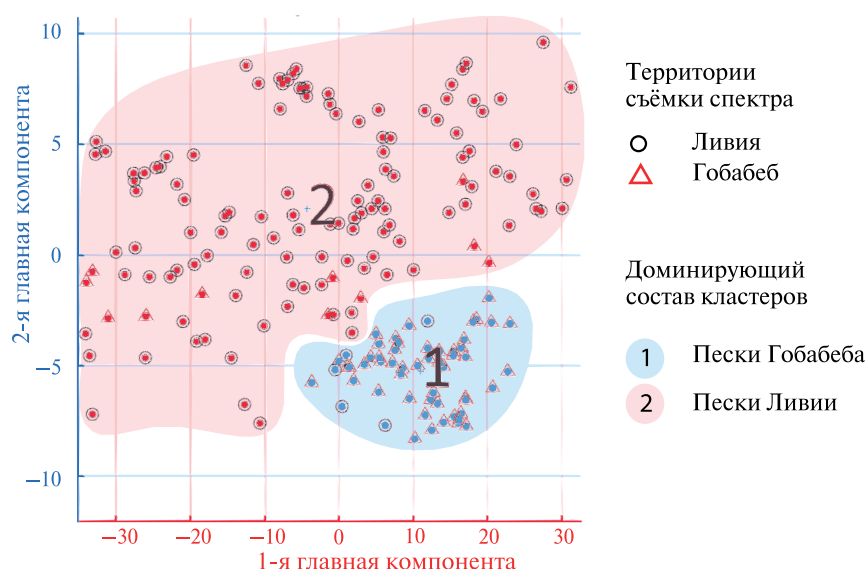


Рис. 7. Спектры Ливийской пустыни и Гобабеба в осях первых двух главных компонент

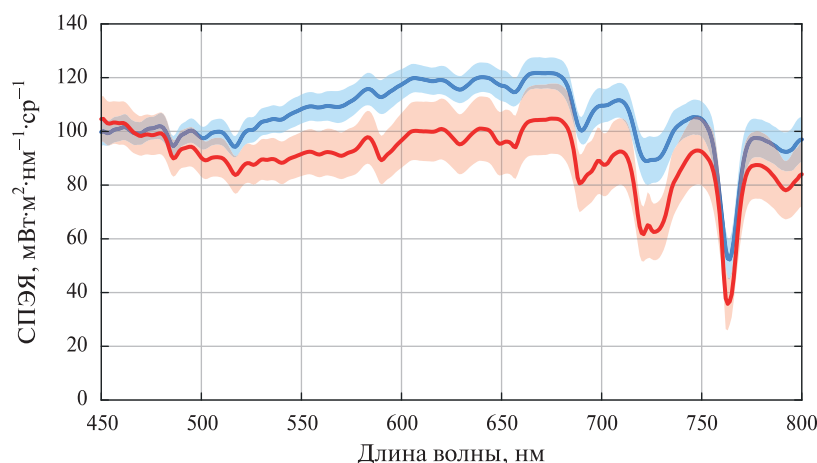


Рис. 8. Средние спектры СПЭЯ Гобабеба (синий цвет) и Ливийской пустыни (красный цвет)

Этот спектр характеризует подъём в красной области. Интерпретировать его можно преимущественным наличием кварцевых песков, которые подверглись окислительной коррозии. Красный график — средний спектр Ливийской пустыни. Спектр относительно постоянен во всем видимом диапазоне. Это соответствует наличию известняковых и гипсовых пород.

Растительность

Обширный кластер 4 (200 спектров) на рис. 4 образуют спектры территории с растительным покровом, а именно спектры угнетённой смешанной растительности Воронежской области в октябре и спектры разреженного кустарника и карликовых деревьев на песчаной поверхности Замбии. Если выделить только спектры этого кластера (и удалить несколько попавших в этот кластер спектров Гобабеба и Ливии) и повторить построение диаграммы распределения спектров в осях главных компонент и кластеризацию, то полученная диаграмма (рис. 9, см. с. 60) будет учитывать все особенности именно этой спектральной выборки. Настройки классификации остались теми же, кроме метрики связывания кластеров, которая была изменена на метрику Уорда. Выполненная классификация полностью разделила спектры растительности двух территорий.

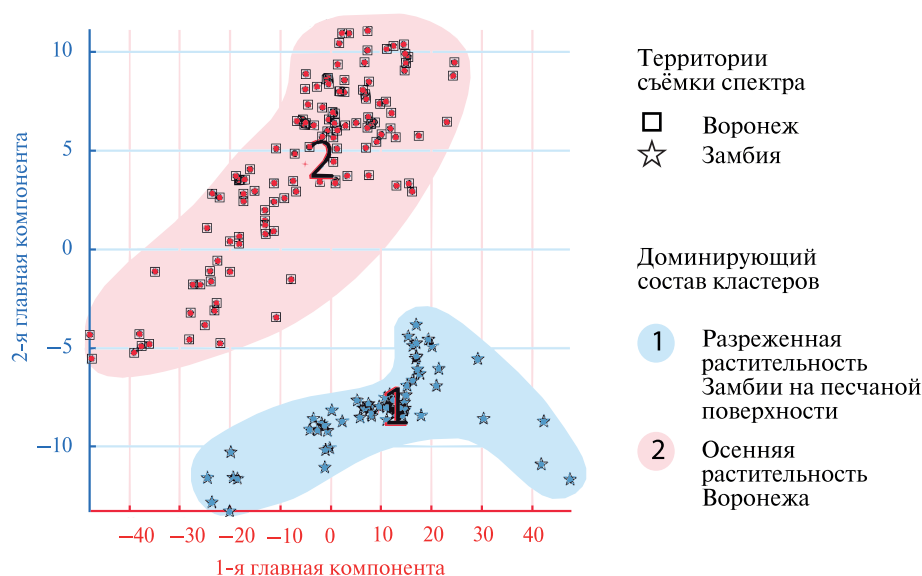


Рис. 9. Спектры растительности Воронежской области и Замбии в осях первых двух главных компонент

На рис. 10 отображены средние спектры этих двух классов на одном графике. Помимо самих средних спектров на графике показано СКО для каждого спектра в виде полупрозрачной полосы того же цвета.

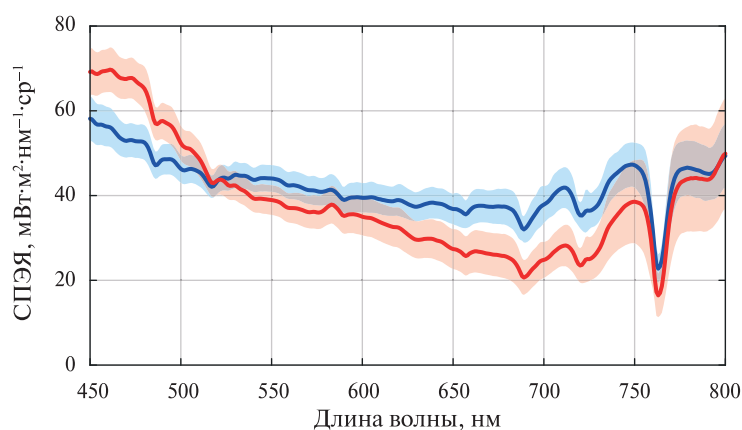


Рис. 10. Средние спектры СПЭЯ Замбии (синий цвет) и растительности Воронежа (красный цвет)

Можно рассчитать нормализованный вегетационный индекс NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index), один из самых распространённых и применяемых индексов для решения задач, использующих количественные оценки растительного покрова:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red},$$

где NIR — значение коэффициента отражения в ближней ИК-области (800 нм); Red — значение коэффициента отражения в красной области (650 нм).

Для задачи сравнения объектов, а не вычисления абсолютных значений этого индекса, можно использовать значения СПЭЯ вместо коэффициентов отражения. Вычислив этот индекс для каждого из средних спектров, получим интересный результат: NDVI Замбийского региона — 0,147, а Воронежского — 0,148. Таким образом, можно сделать вывод, что использование индексов не всегда позволяет разделить объекты со схожими спектрами по спутниковым данным.

Заключение

На основе анализа спектральных данных, зарегистрированных НА ВСС, и опыта обработки данных, ранее зарегистрированных спектрометрами с борта МКС в рамках космического эксперимента «Ураган», разработан новый способ и специальное программное обеспечение обработки спектров высокого спектрального разрешения. Способ основан на использовании трёхмерной системы координат, сформированной из первых главных компонент, и дальнейшей иерархической кластеризации спектральных данных, представляемых в этой системе координат. Он позволяет проводить высокоточную тематическую классификацию природных объектов.

В результате двухэтапной кластеризации получены непересекающиеся кластеры и соответствующие спектры песков пустынь разных регионов, которые занесены в базу данных. Кроме того, они могут быть использованы в качестве эталонов для целевого поиска и тематической классификации таких объектов по спутниковым данным.

Спектральные данные, полученные по результатам съёмки НА ВСС с высоким спектральным разрешением, были исследованы при помощи разработанного программного обеспечения, реализующего созданную классификацию для анализа спектров схожих поверхностей. Полученные данные НА ВСС позволяют их использовать для анализа и классификации объектов, в том числе с незначительно различающимися спектрами. Результаты подтверждают сведения об особенностях подстилающих поверхностей пустынь различных регионов мира.

Рассчитанный для средних спектров поверхностей Замбии и растительности Воронежа индекс NDVI отличается менее чем на 1 % друг от друга. Хотя спектры различаются между собой как по форме, так и по значению. Это ещё раз подтверждает утверждение, что использование индексов не всегда позволяет разделить объекты со схожими спектрами по спутниковым данным.

Литература

1. Бабаев А. Г., Дроздов Н. Н., Зонн И. С., Фрейкин З. Г. Пустыни. М.: Мысль, 1986. 318 с.
2. Беляев М. Ю. Научная аппаратура и методы изучения Земли в космическом эксперименте «Ураган» на Международной космической станции // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 92–107. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-92-107.
3. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Гусев В. Ф., Иванов В. А., Крот Ю. А., Рязанцев В. В., Сосенко В. А., Чумаков А. В. (2014а) Видеоспектральная система для мониторинга земной поверхности с борта МКС // 6-й Белорусский косм. конгресс: материалы конгресса. Минск, 2014. Т. 1. С. 211–214.
4. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Десинов Л. В. и др. (2014б) Обработка спектров и изображений с фотоспектральной системы в космическом эксперименте «Ураган» на МКС // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 54–65. DOI: 10.7868/S0205961414060025.
5. Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю., Сармин Э. Э., Юрина О. А. (2015а) Изучение с борта российского сегмента Международной космической станции в рамках программы «Ураган» катастрофических явлений, вызывающих экологические проблемы // Космонавтика и ракетостроение. 2015. № 1(80). С. 71–79.
6. Беляев М. Ю., Десинов Л. В., Караваев Д. Ю., Легостаев В. П., Рязанцев В. В., Юрина О. А. (2015б) Особенности проведения и использования результатов съёмки земной поверхности, выполняемой экипажами российского сегмента МКС // Косм. техника и технологии. 2015. № 1(8). С. 17–30.
7. Беляев Б. И., Беляев М. Ю., Сармин Э. Э., Гусев В. Ф., Десинов Л. В., Иванов В. А., Крот Ю. А., Мартинов А. О., Рязанцев В. В., Сосенко В. А. Устройство и летные испытания научной аппаратуры «Видеоспектральная система» на борту российского сегмента МКС // Косм. техника и технологии. 2016. № 2(13). С. 70–79.
8. Беляев М. Ю., Беляев Б. И., Катковский Л. В. и др. Классификация водных объектов по спектрам, измеренным с борта МКС в космическом эксперименте «Ураган» // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 201–208. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-201-208.
9. Лагутин Б. М. Наглядная математическая статистика: учеб. пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 472 с.

10. *Мартинов А. О.* Классификация состояний усыхания ели обыкновенной на основе спектров отражения // Журн. Белорусского гос. ун-та. Физика. 2022. № 3. С. 26–38. DOI: 10.33581/2520-2243-2022-3-26-38.
11. *Рахимова Е. В., Наравас А. К., Дернова Е. О., Махмуд А. Ш.* Эоловые пески Северной Африки и юго-запада Аравийского полуострова (ОАЭ) // Изв. высш. учеб. заведений. Геология и разведка. 2020. Т. 63. № 1. С. 63–74. DOI: 10.32454/0016-7762-2020-63-1-63-74.
12. *Jolliffe I. T.* Principal component analysis. Ser.: Springer series in statistics. 2nd ed. N.Y.: Springer, 2002. 487 p. DOI: 10.1007/b98835.

Classification results of spectra obtained by video spectral system on board the ISS during the Uragan space experiment

**B. I. Belyaev¹, M. Yu. Belyaev², L. V. Katkovsky¹, A. O. Martinov¹,
I. V. Rasskazov², L. A. Smolentseva²**

¹ *A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University
Minsk 220045, Belarus
E-mail: remsens@mail.ru*

² *S. P. Korolev Rocket and Space Corporation “Energia”, Korolev 141070, Russia
E-mail: post@rsce.ru*

The paper presents the results of test activations of a new modification of the spectrometric scientific equipment Videospectral System (SE VSS) on the International Space Station (ISS) as part of the Uragan space experiment. A method for processing spectra of high spectral resolution is proposed, based on dimensionality reduction and data clustering, which makes it possible to classify the spectra of similar objects. Using the principal component method, a three-dimensional coordinate system is created in which the spectral sample under study is displayed. The data in the resulting axes are classified without training using the hierarchical clustering method. Homogeneous predominantly sandy territories of various deserts (Namib, Libyan, Arabian) were analyzed. As a result of two-stage clustering, clear clusters and corresponding spectra of desert sands from different regions were obtained and then entered into the database. They can now be used for targeted search and thematic classification of such objects in satellite data.

Keywords: space experiment, ISS, video spectral equipment, classification, principal component analysis, subsatellite test site, spectral density of energy brightness

Accepted: 02.06.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-4-51-63

References

1. *Babaev A. G., Drozdov N. N., Zonn I. S., Freikin Z. G., Pustyni (Deserts)*, Moscow: Mysl', 1986, 318 p. (in Russian).
2. *Belyaev M. Yu.*, Scientific equipment and Earth studies techniques in space experiment Uragan on board the International Space Station, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, V. 18, No. 3, pp. 92–107 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-92-107.
3. *Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Gusev V. F., Ivanova V. A., Krot Yu. A., Ryazancev V. V., Sosenko V. A., Chumakov A. V.* (2014a), Videospectral system for monitoring the Earth's surface on board the ISS. *6-i Belorusskii kosmicheskii kongress: materialy kongressa*, Minsk, 2014, V. 1, pp. 211–214 (in Russian).
4. *Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Desinov L. V. et al.* (2014b), Spectral and images processing from photospectral system in space experiment Uragan on the ISS. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 54–65 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414060025.

5. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu., Sarmin E. E., Yurina O. A. (2015a), Exploring catastrophic phenomena on the board the Russian segment of the ISS as a part of program Uragan causing environmental problems, *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2015, No. 1(80), pp. 71–79 (in Russian).
6. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu., Legostaev V. P., Ryazantsev V. V., Yurina O. A. (2015b), Features of imaging the Earth surface and using the results of the imaging made by the ISS Russian segment crews, *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2015, No. 1(8), pp. 17–30 (in Russian).
7. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Sarmin E. H., Gusev V. F., Desinov L. V., Ivanov V. A., Krot Yu. A., Martinov A. O., Ryazantsev V. V., Sosenko V. A., Design and flight tests of scientific hardware video-spectral system on board the Russian segment of the ISS, *Kosmicheskaya tekhnika i tekhnologii*, 2016, No. 2(13), pp. 70–79 (in Russian).
8. Belyaev M. Yu., Belyaev B. I., Katkovsky L. V. et al., Classification of water surfaces by spectra measured from the ISS during the Uragan space experiment, *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 6, pp. 201–208 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-201-208.
9. Lagutin B. M., *Naglyadnaya matematicheskaya statistika: uchebnoye posobie* (Visual mathematical statistics: Textbook), Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2007, 472 p. (in Russian).
10. Martinov A. O., Classification of spruce drying states on the basis of reflection spectra, *J. Belarusian State University. Physics*, 2022, No. 3, pp. 26–38 (in Russian), DOI: 10.33581/2520-2243-2022-3-26-38.
11. Rakhimova E. V., Naravas A. K., Dernova E. O., Mahmoud A. S., Aeolian sands of North Africa and the southwest of the Arabian Peninsula, *Proc. Higher Educational Establishments. Geology and Exploration*, 2020, V. 63, No. 1, pp. 63–74 (in Russian), DOI: 10.32454/0016-7762-2020-63-1-63-74.
12. Jolliffe I. T., *Principal Component Analysis*, Ser.: Springer series in statistics, 2nd ed., New York: Springer, 2002, 487 p., DOI: 10.1007/b98835.