Применение видеоспектральной системы ВСС для картографирования типов растительного покрова по результатам космических съёмок

Б. И. Беляев [1], М. Ю. Беляев [2], Ю. С. Давидович [1], Л. В. Катковский [1], С. В. Конев [2], В. М. Кузнецов [2], Г. С. Литвинович [1], А. О. Мартинов [1], Л. А. Смоленцева [2]

[1] *Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ*
Минск, 220045, Беларусь
E-mail: antonmartenov@gmail.com

[2] *Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва*
Королёв, Московская обл., 141070, Россия
E-mail: post@rsce.ru

Представлены результаты обработки отдельных съёмок с борта Международной космической станции с использованием научной аппаратуры видеоспектральной системы (ВСС) в рамках космического эксперимента «Ураган», направленного на мониторинг природных и техногенных катастроф. Этот аппаратный комплекс, разработанный в Институте прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, объединяет синхронную видеосъёмку высокого разрешения (видимый и ближний инфракрасный диапазоны) с гиперспектральными измерениями (400–950 нм), что обеспечивает повышение точности анализа визуальных и спектральных данных. В рамках эксперимента в 2024 г. проведена съёмка территории Беларуси с участием первой белорусской женщины-космонавта М. Василевской. Цель данной работы — классификация данных спектральной плотности энергетической яркости и оценка значимости спектральных каналов. Для обработки данных применён метод главных компонент PCA (*англ.* principal component analysis), позволивший снизить размерность исходных спектров (700 каналов) до двух компонент, объясняющих 95,6 % дисперсии. Иерархическая кластеризация в редуцированном пространстве выделила пять классов природных объектов: водные поверхности, озимые культуры на стадии кущения, хвойные леса, торфяно-болотные и дерново-подзолистые почвы. Предложен метод оценки значимости спектральных каналов на основе матрицы нагрузок PCA, выявивший значимость всего спектрального диапазона ВСС (400–950 нм, кроме полос поглощения O_2 и H_2O) для анализа поверхностей с доминированием растительности. Результаты подтвердили корреляцию биофизических параметров объектов с их оптическими характеристиками, а также продемонстрировали воспроизводимость метода за счёт сохранения параметров PCA для обработки новых данных. Практическая значимость работы заключается в создании универсального инструмента для оперативного анализа гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли, адаптированного для задач мониторинга земных покровов и природных катастроф.

Ключевые слова: классификация, метод главных компонент, спектральная плотность энергетической яркости, спектр, спектральные каналы, Random Forest

Одобрена к печати: 03.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-70-88

Введение

Космический эксперимент «Ураган» (Беляев, 2021; Беляев и др., 2014б; 2015а, б, 2019) — уникальный космический эксперимент (КЭ) по мониторингу природных и техногенных катастроф с борта российского сегмента Международной космической станции (МКС). Проект направлен не только на оперативное обнаружение чрезвычайных ситуаций, но и на отработку различных методов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Его ключевая особенность — комплексный подход, объединяющий спектральные измерения с фотосъёмкой высокого пространственного разрешения для детального анализа объектов земной поверхности и атмосферы.

Значимую роль в эксперименте играет научная аппаратура «Видеоспектральная система» (НА ВСС) (Беляев и др., 2014а, 2016), разработанная в Институте прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета по заказу публичного акционерного общества «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва» (ПАО «РКК «Энергия»). Это компактный автономный модуль, адаптированный для съёмки земной поверхности через иллюминаторы станции. После модернизации системы в мае 2023 г. оборудование успешно прошло тестовые испытания, включая съёмку калибровочных полигонов RadCalNet.

Технологическая уникальность НА ВСС заключается:

1) в мультисенсорной системе регистрации:
   - трёхканальная камера видимого и ближнего инфракрасного (БИК) диапазонов (11600×8700 пикселей) с полем зрения 31,6×44,5 км (в надир, с высоты 400 км);
   - обзорная камера видимого диапазона с полем зрения 156×120 км (в надир, с высоты 400 км);
   - три матричных спектрометра (2044×2044 пикселя, спектральный диапазон 400–950 нм, спектральное разрешение 2–5 нм);
2) в синхронизированной обработке данных:
   - 6132 спектральных измерения на кадр суммарно для трёх матричных спектрометров (из них 126 независимых пространственных каналов);
   - привязка спектральных данных к изображениям и геопозиции.

Объединение визуальной и спектральной информации позволяет проводить взаимную верификацию данных, что важно для точности мониторинга динамических процессов. Первые результаты 2023 г. подтвердили потенциал системы для решения возложенных на аппаратуру задач. В 2024 г. с участием белорусского космонавта на борту МКС были проведены съёмки НА ВСС южной части территории Республики Беларусь.

Цель работы состоит в анализе спектров отражения снятых природных объектов НА ВСС с МКС, проведении их классификации и оценки значимости спектральных диапазонов.

Планирование и проведение съёмки

При планировании проведения сеанса с НА ВСС требуется учитывать набор факторов: погодные условия над объектами наблюдения, планируемые импульсы для коррекции орбиты МКС, баллистико-навигационные данные, временной интервал рабочего времени космонавтов, время видимости зоны с объектами наблюдения в надир и др. (Беляев, 2021). На данном этапе работы с НА ВСС в качестве объектов для съёмки были выбраны объекты с однородным типом подстилающей поверхности, также доступные для проведения квазисинхронной наземной спектральной съёмки. Такие объекты позволяют получить достаточный для обработки набор данных по одному типу подстилающей поверхности. По результатам обработки данных одного типа подстилающей поверхности разрабатываются рекомендации по изменению параметров съёмки с НА ВСС для этого типа подстилающих поверхностей.

При планировании сеансов эксперимента для определения расчётного времени видимости зоны с объектами наблюдения используется автоматизированное рабочее место моделирования условий проведения сеансов визуально-инструментальных наблюдений и автоматизированное рабочее место с программно-математическим обеспечением расчёта параметров и времени пролёта (Смоленцева, 2024).

По результатам вычислений формируются исходные данные с указанием времени видимости зон с объектами наблюдения и направляются в главную оперативную группу управления. По исходным данным выполняются работы по оптимизации проведения наблюдений и формируется детальный план работы космонавтов. В рамках сеанса с НА ВСС во время полёта космонавтов Новицкого О. В. и Василевской М. В. была запланирована съёмка лес-

ного массива на юге Республики Беларусь. При планировании сеанса съёмки южной части Республики Беларусь кроме учёта погоды и облачности были ограничения в сроках проведения экспедиции с участием космонавтов Новицкого и Василевской и частоте прохождения трассы полёта МКС над южной частью Республики Беларусь.

Для проведения съёмки на борту российского сегмента МКС с использованием научной аппаратуры обязательным условием подготовки космонавтов было также проведение тренировочных занятий с аппаратурой на Земле. В ходе подготовки к полёту космонавты изучают техническую, эксплуатационную документацию на научную аппаратуру, проходят тренировки в Центре подготовки космонавтов и в ПАО «РКК «Энергия». В ПАО «РКК «Энергия» тренировочные занятия проводят специалисты по научной аппаратуре, демонстрирующие особенности работы с ней, которые могут возникнуть в результате функционирования на борту российского сегмента МКС. Тренировочные занятия на Земле позволяют выявить и устранить часть вопросов по использованию научной аппаратуры, сократить время подготовки космонавта к проведению сеанса на борту российского сегмента МКС, также наладить контакт со специалистами для дальнейшей работы через Центр управления полётов во время сеансов.

Материалы и методы исследования

Для возможности анализа получаемых от НА ВСС данных они сначала должны пройти коррекцию и преобразование в физические величины яркости. Изображения НА ВСС подвергаются операции коррекции «призраков», выражающихся в небольшом двоении изображения из-за особенностей оптической схемы (Мартинов и др., 2024). Матрицы спектров проходят радиометрическую коррекцию — этап пересчёта отсчётов аналого-цифрового преобразователя в спектральную плотность энергетической яркости (СПЭЯ) и этап применения калибровки по длинам волн (Мартинов, 2022а). Кроме того, выполняется коррекция вторых порядков дифракции (Бручковская и др., 2019) и коррекция на пропускание иллюминатора. Обработка данных в автоматическом режиме проводится при помощи программного обеспечения «Обработка спектральных данных», которое разработано для ПАО «РКК «Энергия».

Для количественного анализа данных ДЗЗ необходимо проведение атмосферной коррекции, включающей учёт аэрозольного рассеяния и поглощения газами с использованием моделей переноса излучения. В рамках настоящей работы применена упрощённая процедура предобработки. Приведение спектров к единому зенитному углу Солнца и последующая *Z*-нормализация данных были выбраны по следующим причинам: 1) основная цель исследования заключается не в количественной оценке биофизических параметров, а в относительном разделении спектральных паттернов и демонстрации возможности классификации типов поверхностей; 2) для проведения точной атмосферной коррекции необходимы синхронные данные о состоянии атмосферы (оптическая толщина аэрозолей, содержание водяного пара), которые на момент проведения съёмки получить не представилось возможным; 3) метод главных компонент PCA (*англ.* principal component analysis) (Jolliffe, 2002; Jolliffe, Cadima, 2016), применённый для анализа, сам по себе представляет собой мощный инструмент для выявления относительных различий в данных; 4) Z-нормализация, устраняя влияние абсолютных значений яркости, в значительной степени нивелирует общие для всех спектров аддитивные и мультипликативные эффекты, к которым часто относится и влияние атмосферной дымки. Это позволяет сосредоточиться на форме спектральных кривых, которая в первую очередь определяется свойствами самой поверхности.

Метод главных компонент PCA в спектральном анализе

Метод PCA представляет собой один из ключевых инструментов в машинном обучении и анализе многомерных данных. Его основная задача — снижение размерности данных при максимальном сохранении информативности. Это достигается за счёт линейного преоб-

разования исходных признаков в систему ортогональных координат, где новые переменные (главные компоненты) упорядочены по убыванию их вклада в общую дисперсию данных. Первая главная компонента соответствует направлению максимальной изменчивости данных, вторая (ортогональная первой) — следующему по значимости направлению и так далее. Математически PCA опирается на сингулярное разложение матрицы данных или анализ собственных векторов (Andrew, 1973; Bai et al., 2007; Mestre, 2008) ковариационной матрицы, что позволяет выявить скрытые паттерны в данных (Uddin et al., 2021).

Применение PCA охватывает широкий спектр задач: от визуализации многомерных наборов в 2D/3D-пространстве до устранения мультиколлинеарности признаков перед обучением моделей. В области ДЗЗ (Estornell et al., 2013; Palacios-Orueta, Ustin, 1998; Uddin et al., 2021) метод особенно востребован для обработки гиперспектральных изображений, где количество спектральных каналов может достигать сотен.

Адаптация PCA для анализа спектров СПЭЯ

В контексте обработки спектров СПЭЯ НА ВСС PCA применяется для снижения размерности данных высокого спектрального разрешения. Исходные данные, содержащие около 700 признаков (значений спектров на разных динах волн), проецируются в подпространство меньшей размерности, сохраняющее основную информацию. Это позволяет визуализировать данные в виде облака точек в 2D/3D-пространстве, где положение каждого спектра определяется его проекцией на первые главные компоненты. Важно отметить, что ортогональность компонент обеспечивает декорреляцию признаков, упрощая интерпретацию результатов.

Предобработка спектральных данных и классификация

Спектры СПЭЯ, полученные в разное время суток и на разных широтах, а следовательно, и при разных условиях освещения, демонстрируют значительные различия в абсолютных значениях интенсивности. Для устранения этого эффекта выполняется приведение к единому зенитному углу Солнца. Для устранения масштабных различий между образцами проводится стандартизация данных (Z-нормализация) (Kumar, 2014). На каждой длине волны из значений СПЭЯ вычитается среднее по всей выборке, а результат делится на стандартное отклонение (формула (1)). Это преобразование не только центрирует данные, но и делает их безразмерными, что необходимо для корректной работы PCA (Kumar, 2014).

$$X'_{ij} = \frac{X_{ij} - \mu(X_i)}{\sigma(X_i)}, \tag{1}$$

где X' — автошкалированная спектральная матрица; X — исходная спектральная матрица; i — номер спектрального канала; j — номер спектра в матрице; $\mu(X_i)$ — среднее всех значений спектров по i-му спектральному каналу; $\sigma(X_i)$ — среднеквадратическое отклонение всех значений спектров по i-му спектральному каналу.

На этапе классификации спектральных образцов предложено использовать алгоритм классификации без обучения — иерархическую кластеризацию (Лагутин, 2007; Мартинов, 2022б; Ran et al., 2022) — для данных в редуцированном пространстве признаков. Важным этапом этого метода анализа данных представляется сохранение матрицы весов главных компонент loadings, вектора математического ожидания исходных данных и среднеквадратических отклонений, что обеспечивает воспроизводимость преобразований для новых наблюдений. При обработке новых спектральных данных выполняется их проекция в то же пространство главных компонент с использованием сохранённых параметров, после чего можно осуществлять классификацию с обучением на основе близости к кластерам, полученным при классификации без обучения.

Расчёт значимости спектральных каналов

После применения PCA анализу подлежат рассчитанные в ходе его работы матрицы весов главных компонент (loadings), отражающие вклад исходных значений спектров на различных длинах волн в новые признаки (главные компоненты), и матрицы счётов (*scores*), описывающие положение спектров в новом пространстве. Например, первая компонента может соответствовать солнечной освещённости (что подтвердилось при анализе данных НА ВСС), а вторая — содержанию хлорофилла. Такая интерпретация позволяет связать абстрактные компоненты с физическими характеристиками объектов.

В настоящей работе предложен также новый метод оценки значимости спектральных каналов для задачи классификации при помощи PCA. В процессе работы PCA для каждой главной компоненты рассчитывается доля от общей дисперсии (коэффициент объяснённой дисперсии EVR (*англ.* explained variance ratio)).

Матрица нагрузок loadings в PCA показывает, какой вклад исходные признаки (спектральные каналы) вносят в каждую главную компоненту. То есть каждый столбец матрицы loadings соответствует весам признаков для главных компонент PC1, PC2 и т. д. Поэтому, если суммировать по всем компонентам квадрат loadings, умноженный на EVR, то это даст общий вклад каждой переменной (спектрального канала) в общую дисперсию. Это можно считать важностью переменной.

$$\text{Importance}_j = \sum_{i=1}^{k} \text{loadings}_{ji}^2 \times \text{EVR}_i, \tag{2}$$

где loadings_{ji} — вес j-го канала в i-й главной компоненте (элемент матрицы loadings); EVR_i — доля дисперсии, объясняемая i-й главной компонентой; k — число учитываемых главных компонент (например, первых трёх-пяти, объясняющих более 90 % дисперсии).

Следует пояснить, почему в формуле предлагаем использовать квадрат нагрузок, а не их самих, или их модуль. Нагрузки могут быть как положительными, так и отрицательными, что отражает направление влияния канала на компоненту. Однако при оценке величины вклада знак не важен — важна только «сила» связи. Квадраты автоматически устраняют знак, показывая абсолютную величину вклада. Модуль нагрузки тоже устраняет влияние знака, но не сохраняет квадратичную зависимость, которая критична для анализа дисперсии. Квадраты нагрузок сохраняют пропорциональность вклада каналов в дисперсию. Например, спектральный канал с нагрузкой 0,8 вносит в 4 раза больший вклад в дисперсию, чем канал с нагрузкой 0,4 ($0{,}8^2/0{,}4^2 = 4$), тогда как по модулю разница была бы всего в 2 раза.

Помимо предложенного метода для расчёта значимости каналов можно использовать алгоритм машинного обучения случайный лес (*англ.* Random Forest) (Belgiu, Drăguţ, 2016; Biau, Scornet, 2016; Han et al., 2016) или расчёт дисперсии значений СПЭЯ в каждом канале. В *табл. 1* предложено сравнение этих методов.

Можно сделать следующий вывод по методам оценки значимости:

- Метод на основе PCA информативен для анализа значимости каналов с учётом их взаимосвязей.
- Алгоритм Random Forest подходит для определения значимости каналов в задачах классификации определённых объектов, особенно если данные имеют сложные и нелинейные зависимости.
- Расчёт дисперсии полезен для быстрого и простого анализа. Однако на вычисленную значимость влияет абсолютная интенсивность сигнала, а отражательная способность растительности в БИК-диапазоне значительно выше, чем в видимом.

Таким образом, выбор метода оценки значимости каналов зависит от целей анализа и характера данных. Если важна точность и учёт взаимосвязей между каналами, лучше использовать PCA или Random Forest. Если же нужен быстрый и простой анализ, можно воспользоваться расчётом дисперсии.

Таблица 1. Методы определения спектральной значимости

	Разработанный на основе PCA	Random Forest	Дисперсия
Метод	Использование коэффициентов собственных векторов для каждого спектрального канала	Применение алгоритма Random Forest для классификации данных и определения значимости признаков	Вычисление дисперсии для каждого спектрального канала по всей выборке спектров
Описание	Значимость каналов определяется вкладом каждого канала в главные компоненты, которые объясняют максимальную дисперсию данных	Значимость каналов определяется на основе их вклада в точность классификации	Каналы с большей дисперсией считаются более значимыми
Преимущества	Учитываются корреляции между каналами. Метод PCA позволяет уменьшить размерность данных, сохраняя при этом максимальную информацию	Учитываются нелинейные зависимости и взаимодействия между каналами. Метод хорошо работает с большими и сложными данными	Простота и лёгкость вычислений
Недостатки	Более сложные вычисления по сравнению с простым расчётом дисперсии	Требуется размеченная выборка на классы. Более сложные вычисления по сравнению с простым расчётом дисперсии	Не учитываются корреляции между каналами. Упрощаются важные взаимосвязи между каналами. Влияние абсолютной интенсивности сигнала

Результаты и обсуждение

В 2024 г. был проведён уникальный трёхуровневый КЭ по ДЗЗ с участием белорусского космонавта на борту МКС и последующей обработки полученных данных. Василевская, первая белорусская женщина-космонавт, в рамках своей миссии на МКС провела серию экспериментов с использованием видеоспектральной системы НА ВСС (КЭ «Ураган») по радиограмме, составленной специалистами ПАО «РКК «Энергия».

В соответствии с программой экспериментов целевых работ 2 апреля 2024 г. Василевская с помощью российского космонавта Новицкого провела сеанс по мониторингу полигонов Минской области (Валище, Старобин, Новосёлки) с использованием НА ВСС и установочного кронштейна. Для осуществления съёмки на иллюминатор № 9 были установлены кронштейн и НА ВСС, сделан тестовый снимок, проверено получение спектральных данных по нему. Время пролёта над выбранными объектами по предварительно сделанным расчётам составило 51 с. Для получения достаточного объёма данных для обработки был проведён предварительный расчёт количества кадров для указания параметров съёмки. По радиограмме было задано количество кадров — 25, что позволило провести последовательную съёмку подстилающей поверхности в течение 1 мин.

Конструкция иллюминатора представляет собой пакет из двух стёкол с воздушной прослойкой между ними. Остекление иллюминатора № 9 выполнено из кварцевого стекла, пропускающего излучение в ультрафиолетовом, видимом и БИК-диапазонах. Кривая пропускания в этих диапазонах учитывалась при первичной обработке спектральных данных. После проведения съёмки данные были скопированы на возвращаемый на Землю жёсткий диск.

По результатам съёмки получены данные по каналу широкополосной системы связи, переданы куратору научной аппаратуры в ПАО «РКК «Энергия», где был проведён их экспресс-анализ. В результате съёмки на большей части снимков над объектами наблюдалась сплошная облачность. В ходе экспресс-анализа были выбраны пять снимков с небольшой облачностью и отсутствием облаков над изучаемыми объектами.

За один снимок НА ВСС получает фото обзорной камеры, фото высокого разрешения (*рис. 1*) и три массива спектров СПЭЯ, один из которых отображён на *рис. 2.* Поля зрения трёх матричных спектров выделены красными рамками на *рис. 1.*

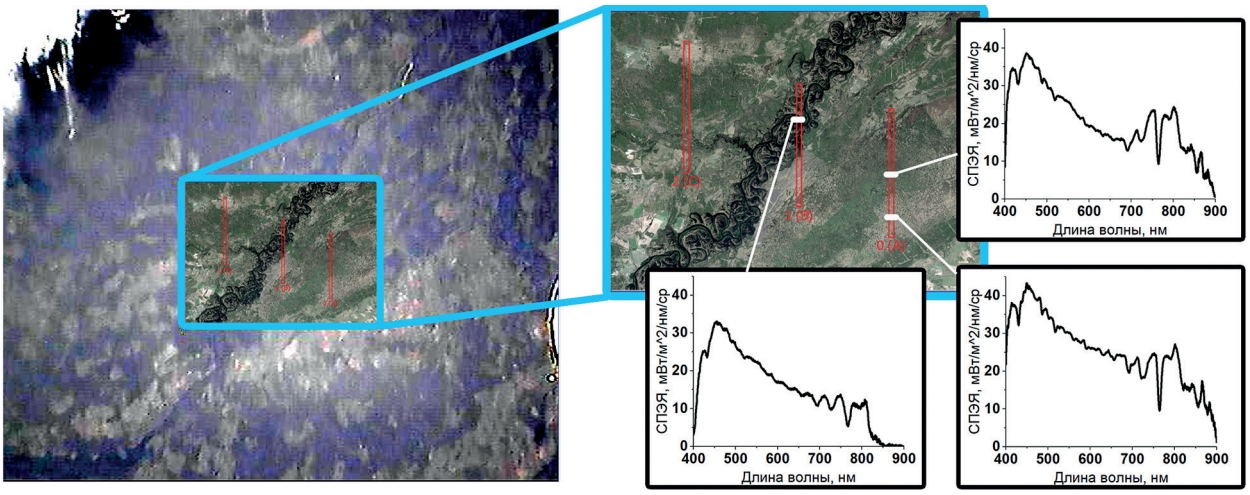


Рис. 1. Изображения и спектры, получаемые НА ВСС

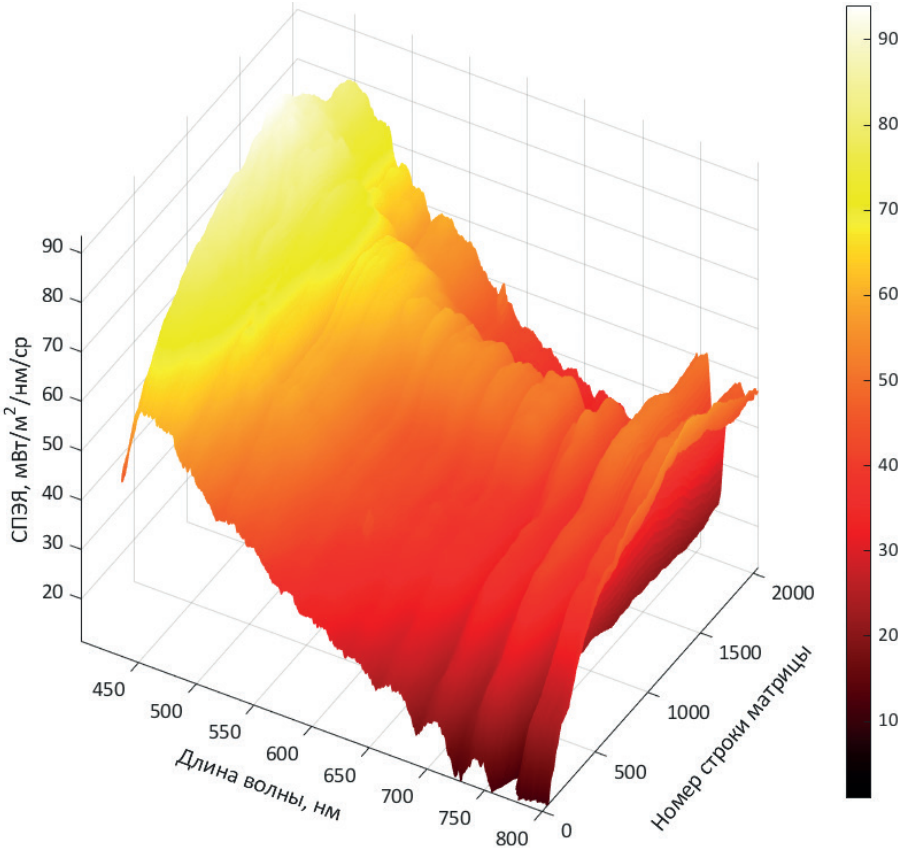


Рис. 2. Спектры СПЭЯ матричного спектрометра № 0(А)

В процессе выполнения КЭ при помощи НА ВСС получено пять снимков интересующей территории. Они отображены на *рис. 3.* Разница в их получении составляет от 3 до 4 с. В правом верхнем углу фотокадров находится элемент конструкции МКС, попадающий в поле зрения обзорной камеры.

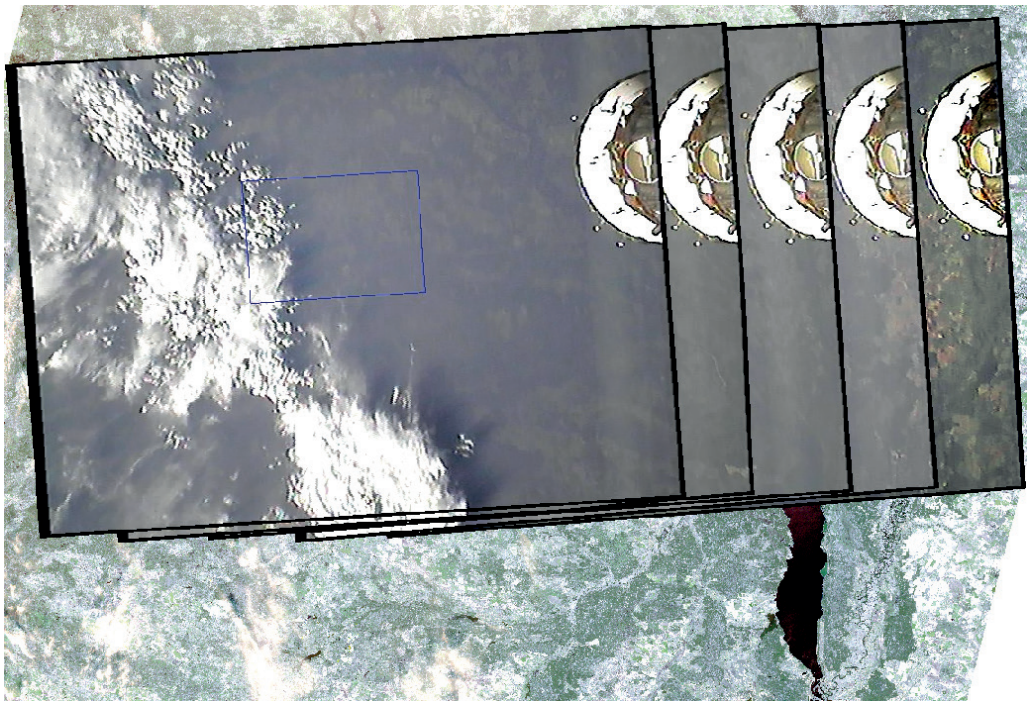


Рис. 3. Геопривязанные снимки обзорной камеры НА ВСС

Для начального анализа использованы массивы спектральных данных, соответствующих двум снимкам из пяти. Для сокращения числа спектров взят каждый 50-й спектр (за исключением краёв матриц) из двух матриц для каждого из двух снимков (всего 140 спектров).

Для анализируемых спектров СПЭЯ в диапазоне 435–800 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 5.

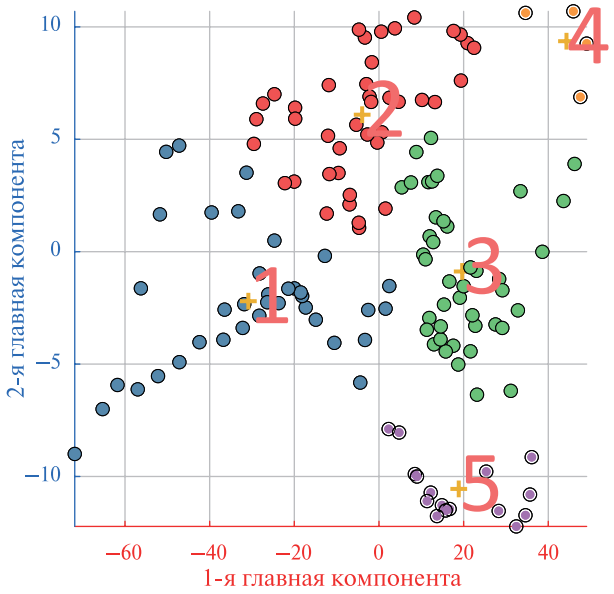


Рис. 4. Классифицированные спектры по двум снимкам НА ВСС в осях первых двух главных компонент. Числами от 1 до 5 обозначены центры (помечены символом «+») кластеров

Для исследуемых в работе данных первые две главные компоненты описывают 95,6 % дисперсии. Таким образом каждый спектр СПЭЯ НА ВСС может быть представлен в виде точки в двухмерной системе координат с минимальной потерей информативности (*рис. 4*). На *рис. 5* отображены средние спектры каждого из выделенных классов.

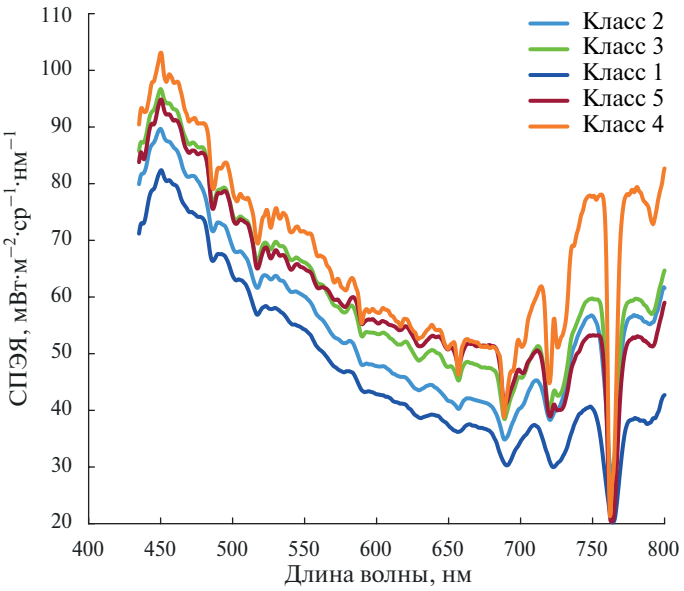


Рис. 5. Средние зарегистрированные спектры выделенных классов

Следует отметить, что применённый подход к формированию ансамбля спектров (выборка каждого *n*-го спектра вдоль протяжённых полей зрения спектрометров) имеет методологическое ограничение. Пространственная выборка может содержать статистически неоднородные участки. В этом случае последующее применение PCA может приводить к тому, что главные компоненты будут в первую очередь отражать наиболее контрастные пространственные неоднородности в поле зрения, а не тонкие спектральные различия между типами поверхностей. Несмотря на отмеченную статистическую неоднородность исходной выборки, применение PCA сохраняет свой практический смысл для решения задачи классификации. Спектры, принадлежащие одному типу поверхности, обладают сходством своей формы. Метод PCA, будучи применённым к такому набору данных, проецирует их в пространство признаков, где это сходство проявляется в виде формирования кластеров. Таким образом, хотя главные компоненты и могут отражать наиболее общие контрасты, итоговая кластеризация позволяет провести содержательное разделение на классы, соответствующее основным типам подстилающей поверхности, что и подтверждается результатами (см. *рис. 4*). Данный подход демонстрирует свою работоспособность в качестве первого шага для создания алгоритмов оперативного картографирования.

Класс 1 демонстрирует слабовыраженный подъём в БИК-диапазоне, что обусловлено доминированием водной поверхности и фрагментарными включениями переувлажнённых торфяно-болотных почв (Бамбалов, Ракович, 1992; Нацыянальны..., 2024; Почвы..., 2019; Смеян, Цытрон, 2007).

Класс 2 репрезентирует агроценозы озимых культур, находящихся на фазе кущения (Научные..., 2021; Yin et al., 2020). Неполное смыкание растительного покрова и частичное просвечивание подстилающей почвы приводят к снижению отражательных свойств в БИК-диапазоне по сравнению с классами, характеризующимися сплошным растительным покровом.

Класс 3 формируется за счёт спектральных характеристик обводнённых торфяно-глеевых почв в сочетании с гигрофитной растительностью, типичной для болотных экосистем (Почвы..., 2019; Семененко, 2015).

Наибольший подъём БИК-области зафиксирован у класса 4, ассоциированного с хвойными лесными массивами, где фотосинтезирующе активная хвоя и структурная сложность крон усиливают поглощение в видимом диапазоне и отражение в БИК-диапазоне (Шалькевич, Курьянович, 2022).

Класс 5 соответствует дерново-подзолистым почвам (Балабко и др., 2024; Беляев и др., 1991; Цытрон и др., 2011), чьи спектры отличаются умеренной отражательной способностью в БИК-диапазоне.

Интерпретация спектральных классов проведена на основе комплексного анализа: 1) привязки данных к высокодетальному изображению с камеры высокого разрешения НА ВСС, которое позволяет визуально идентифицировать тип поверхности в месте съёмки; 2) спутниковых снимков Sentinel-2; 3) тематических карт для указанной территории (Нацыянальны..., 2024); 4) формы и значений спектральных кривых для проверки классификации на отсутствие противоречий в ней.

Проведённый анализ и успешная дифференциация спектральных паттернов демонстрируют возможность эффективного разделения природных объектов на чёткие классы, соответствующие различным типам растительного и почвенного покрова. Полученные результаты служат основанием для предположения о наличии корреляции между биофизическими параметрами объектов и их оптическими характеристиками, что подчёркивает значимость спектрального анализа для задач картографирования типов земных покровов (Червань, Давидович, 2024).

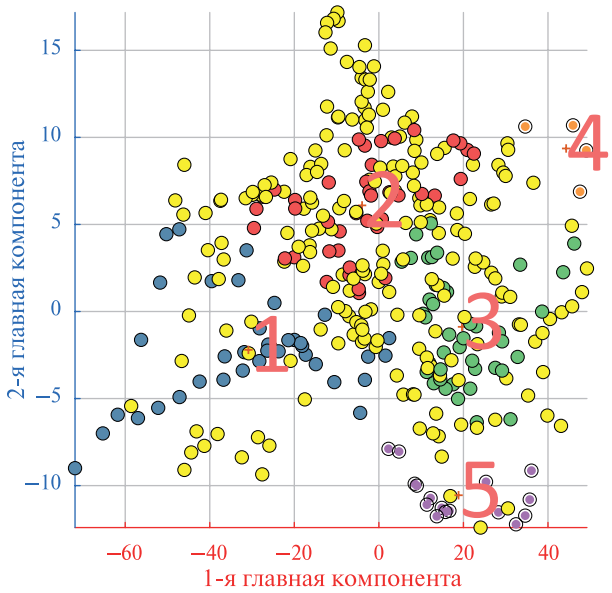
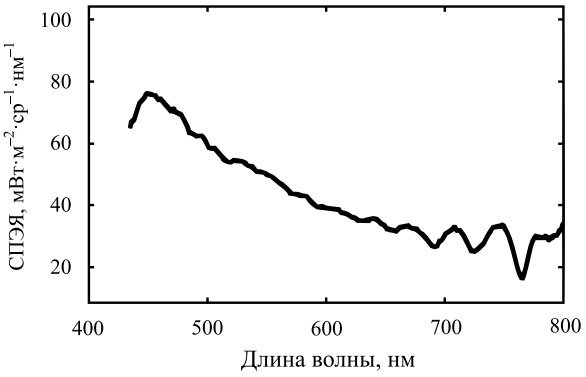


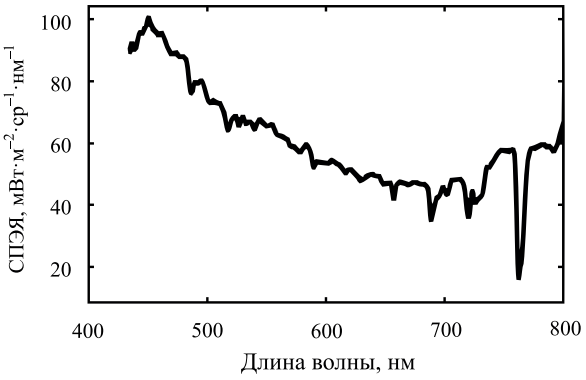
Рис. 6. Отображённые и классифицированные спектры по двум снимкам НА ВСС в осях первых двух главных компонент. Числами от 1 до 5 обозначены центры (помечены символом «+») кластеров. Жёлтым цветом помечены новые спектры с трёх снимков

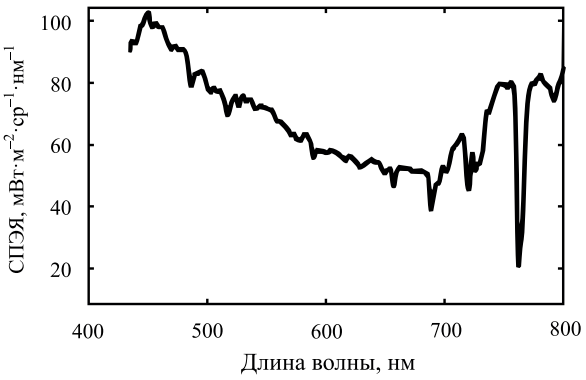
После начального анализа определённой части данных вычисленные значения loadings, μ и σ (формула (1)) были сохранены. Эти значения были использованы, чтобы анализировать спектральные данные, соответствующие трём остальным снимкам НА ВСС (210 спектров), с использованием уже созданных осей главных компонент (*рис. 6*). Эти новые спектры отображены жёлтым цветом. По близости каждого такого спектра (по евклидовой метрике или другой) к центрам выявленных кластеров (обозначены на *рис. 6* символом «+») можно судить о типе подстилающей поверхности, описываемой этим спектром. До какого центра кластера расстояние меньше, к тому типу подстилающей поверхности и принадлежит спектр. Данные сохраняемые оси и параметры могут быть использованы и при анализе дальнейших съёмок НА ВСС.

Таблица 2. Типичный спектр классов

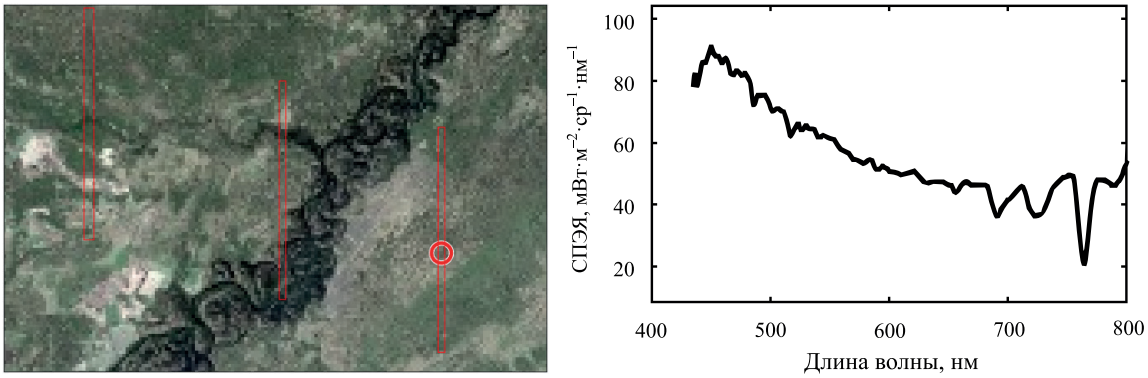
№ класса	Типичный спектр и область спектрометрирования (красная окружность)
1	Водная поверхность и участки торфяно-болотных почв
2	Озимые культуры в фенологической стадии кущения
3	Торфяно-болотные почвы и гигрофитная растительность
4	Хвойные лесные массивы







Окончание табл. 2

№ класса	Типичный спектр и область спектрометрирования (красная окружность)
5	Дерново-подзолистые почвы 

В *табл. 2* приведены типичные спектры СПЭЯ, зарегистрированные НА ВСС, и соответствующие им области на местности для каждого из пяти выделенных классов. В *табл. 2* представлен конкретный спектр, находящийся в центре однородного участка с выявленным нами типом поверхности. Это позволяет наглядно продемонстрировать характерную спектральную сигнатуру каждого типа поверхности и её локализацию.

Результаты расчёта значимости спектральных каналов

Рассчитав значимость спектральных каналов НА ВСС по формуле (2) на основе спектральных данных пяти снимков, была получена зависимость значимости от длины волны, представленная на *рис. 7*. Чем выше величина значимости, тем больший вклад в общую дисперсию имеет данная длина волны. Полученные результаты говорят о важности всего спектрального диапазона НА ВСС за исключением области с линией поглощения O_2 762 нм. Уменьшение значимости наблюдается и в других полосах поглощения (Mg — 517 нм; H_2O — 650, 690, 720 нм).

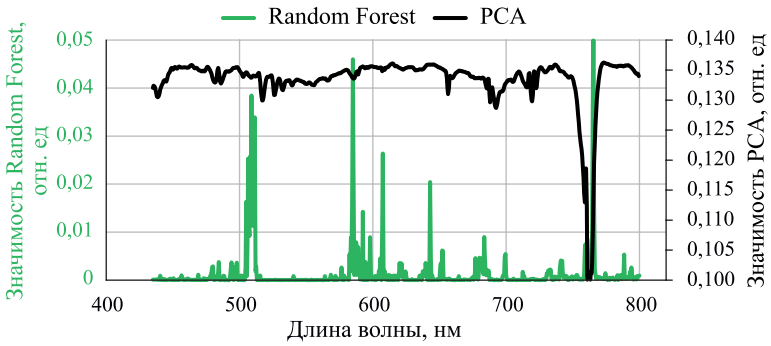


Рис. 7. Значимость спектральных каналов НА ВСС в задаче классификации природных объектов по двум методам: предложенным на основе PCA и Random Forest

Также рассчитана значимость при помощи алгоритма Random Forest. По результатам классификации без обучения (см. *рис. 4*) получены пять классов для спектров разных типов поверхностей. Классифицированные таким образом спектры были поданы на вход алгоритма в качестве обучающей выборки. В результате обучения при помощи алгоритма Random

Forest рассчитывалась значимость спектральных каналов НА ВСС. Каналы, значимость которых выше, оказались более важными для разделения спектров СПЭЯ на пять предлагаемых классов. Вычисленная этими двумя методами значимость представлена на *рис. 7.* Также была получена значимость спектральных каналов при помощи расчёта дисперсии. Из-за влияние абсолютной интенсивности сигнала на её значения в диапазоне 725–800 нм проявился ожидаемый подъём (в этом диапазоне отражательные характеристики растительного покрова выше, чем в видимом). Ввиду того, что оценка значимости при помощи дисперсии имеет больше недостатков, чем два других метода, её график на *рис. 7* не представлен.

На графике Random Forest видны интенсивные узкие всплески, которые соответствуют атомарным/молекулярным линиям поглощения. Они объясняются неравномерным спектральным разрешением по разным участкам матричных спектрометров (с ухудшением по направлению к краям матрицы). Random Forest оказался более чувствительным к различиям спектров, обусловленных аппаратными особенностями, а не природными. Этому поспособствовал и тот факт, что обучающая выборка была сформирована по результатам автоматической кластеризации, а не более точным способом. Тем не менее, если исключить узкие всплески на графике значимости Random Forest, то значимость спектральных каналов окажется равномерно распределённой по всему спектральному диапазону, как и при оценке значимости по PCA. Исключение составляет только диапазон 520–570 нм, в котором значимость по Random Forest околонулевая. Нулевая значимость может быть связана с отсутствием в этом диапазоне признаков, полезных для разделения. К тому же стоит отметить, что ввиду широкого поля зрения спектрометров НА ВСС (размер спектрометрируемой площадки, соответствующей одному спектру, равен ~600×500 м) регистрируются спектры смешанных поверхностей, что усложняет создание обучающей выборки чистых классов, к качеству которой чувствителен Random Forest. Причины различий в оценке значимости представлены в *табл. 3.*

Таблица 3. Причины различий в оценке значимости каналов между предложенным на основе PCA методом и Random Forest

	Причины различий по методам	
	Предложенный на основе PCA	Random Forest
Природа методов	Линейный метод, максимизирующий объяснённую дисперсию. Он выделяет направления в данных с наибольшей изменчивостью, что приводит к равномерной значимости каналов, если спектры не содержат выраженных особенностей, кроме известных линий поглощения	Нелинейный алгоритм, оценивающий важность признаков через их вклад в разделение классов. Он чувствителен к локальным различиям спектров, включая шумы и аппаратные артефакты, что объясняет узкие всплески на графике значимости
Влияние спектрального разрешения аппаратуры	*Неравномерное разрешение матричных спектрометров создаёт артефакты в данных* (*например*, *резкие изменения интенсивности в узких полосах*)	
	Нивелирует такие особенности, так как фокусируется на глобальной структуре данных	Интерпретирует эти артефакты как информативные признаки, особенно если обучающая выборка сформирована автоматически (кластеризацией)
Качество обучающей выборки	Менее чувствителен к шуму, так как опирается на ковариацию	«Переобучается» на шумовых паттернах, связанных с нюансами измерительной аппаратуры, принимая их за значимые

Важно отметить ограничение проведённого исследования — отсутствие полной атмосферной коррекции. Хотя применённые методы нормализации позволяют выявить относительные спектральные различия, абсолютные значения СПЭЯ остаются под влиянием неизвестных атмосферных условий. Это не позволяет напрямую сравнивать абсолютные

величины спектров отражения между разными сеансами съёмки. Тем не менее успешная кластеризация данных, полученных в течение короткого временного интервала, позволяет предположить, что атмосферные условия были относительно стабильными в течение этого периода, что делает спектры сопоставимыми между собой внутри данного набора данных.

Выводы

В рамках проведённого космического эксперимента по исследованию Белорусского Полесья юга Беларуси НА ВСС с борта МКС выполнена фотоспектральная съёмка различных типов природных поверхностей Беларуси, включая сельскохозяйственные угодья, лесные массивы и заболоченные территории. Удалось выделить спектральные сигнатуры, характерные для этих типов поверхностей.

Проведённый анализ результатов съёмок и полученная дифференциация спектральных паттернов и особенностей подтверждает корреляцию между биофизическими параметрами природных объектов и их дистанционно регистрируемыми оптическими спектрами, что подчёркивает значимость спектрального анализа в задачах классификации земных покровов.

Выполненное исследование и успешная дифференциация спектральных паттернов демонстрируют возможность эффективного разделения природных объектов на чёткие классы, соответствующие различным типам растительного и почвенного покрова. Полученные результаты служат основанием для предположения о наличии корреляции между биофизическими параметрами объектов и их оптическими характеристиками, что подчёркивает значимость спектрального анализа для задач картографирования типов земных покровов.

Метод главных компонент продемонстрировал высокую эффективность в снижении размерности данных, классификации без обучения и визуализации кластеров. Первые две компоненты объясняют 95,6 % общей дисперсии, что позволило выделить в двухмерном пространстве чёткие группы, соответствующие различным типам природных объектов. Сохранение матрицы нагрузок, векторов средних значений и стандартных отклонений обеспечивает возможность быстрого анализа новых данных (для поиска уже полученных классов) без повторного расчёта и формирования модели. Это позволит повторно использовать полученные результаты при анализе массивов спектральных данных, получаемых при съёмках, посредством пополнения созданной спектральной базы данных. Предложенный подход на основе PCA обеспечивает эффективный инструмент для анализа спектральных данных ДЗЗ (в том числе с незначительными их различиями), сочетая простоту анализа и интерпретации с высокой скоростью обработки.

Результаты анализа важности каналов выявили, что значимость каналов одинаковая во всём видимом и ближнем инфракрасном спектральном диапазоне кроме полос поглощения и особенно полосы поглощения кислорода 762 нм. Таким образом, для анализа лесной растительности и других фотосинтезирующих поверхностей важен весь видимый и БИК-диапазон.

Результаты фотоспектральных съёмок НА ВСС с МКС пополнили базу данных оптических спектров Белорусского Полесья, позволили повысить точность и надёжность распознавания и объяснения природы объектов съёмки.

Проведённый космический эксперимент на МКС показывает перспективы использования НА ВСС в пилотируемых проектах дистанционного зондирования Земли, в том числе планируемых на новой российской орбитальной станции.

Литература

1. *Балабко П. Н.*, *Хуснетдинова Т. И.*, *Метечко Л. Б.*, *Сорокин А. Е.* Аэрокосмический и почвенно-экологический мониторинг педосферы Земли (на примере Российской Федерации и некоторых сопредельных территорий): моногр. М.: Издательско-торговая компания «Дашков и К», 2024. 276 с.

2. *Бамбалов Н. Н.*, *Ракович В. А.* Спектральная отражательная способность торфа // Вестн. Белорусского гос. ун-та имени В. И. Ленина. Сер. 2. Химия. Биология. География. 1992. № 1. С. 68–71.
3. *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.
4. *Беляев Б. И.*, *Курикина Т. М.*, *Лисица В. Д.*, *Сергеенко В. Т.* Спектральные отражательные свойства почв: аналитический обзор / под ред. Б. И. Беляева. Минск: Белорусский филиал ВНИИТЭЙ агропром, 1991. 58 с.
5. *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 космич. конгресс: материалы конгресса. Минск, 2014. Т. 1. С. 211–214.
6. *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.
7. *Беляев М. Ю.*, *Десинов Л. В.*, *Караваев Д. Ю.*, *Легостаев В. П.*, *Рязанцев В. В.*, *Юрина О. А.* (2015а) Особенности проведения и использования результатов съемки земной поверхности, выполняемой экипажами российского сегмента МКС // Космич. техника и технологии. 2015. № 1 (8). С. 17–30.
8. *Беляев М. Ю.*, *Десинов Л. В.*, *Караваев Д. Ю.*, *Сармин Э. Э.*, *Юрина О. А.* (2015б) 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.
9. *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 // Космич. техника и технологии. 2016. № 2 (13). С. 70–79.
10. *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.
11. *Бручковская С. И.*, *Литвинович Г. С.*, *Бручковский И. И.*, *Катковский Л. В.* Алгоритм коррекции дифракции второго порядка в спектрометре с вогнутой дифракционной решеткой // Журн. приклад. спектроскопии. 2019. Т. 86. № 4. С. 620–627.
12. *Лагутин Б. М.* Наглядная математическая статистика: учеб. пособие. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 472 с.
13. *Мартинов А. О.* (2022а) Алгоритм автоматического определения спектральных линий на подверженных аберрациям снимках при калибровке спектрометров изображения по длинам волн // Материалы 20-й Международ. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2022. С. 135. DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
14. *Мартинов А. О.* (2022б) 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.
15. *Мартинов А. О.*, *Литвинович Г. С.*, *Гуляева С. И.*, *Смоленцева Л. А.*, *Рассказов И. В.* Метод математической коррекции эффекта двоения изображения после отражения от светоделительной пластины // Журн. Белорусского гос. ун-та. Физика. 2024. № 3. С. 25–40.
16. Научные основы технологий возделывания озимых зерновых культур, рапса и кукурузы / под ред. А. А. Аутко, Ф. И. Привалова. Минск: Беларуская навука, 2021. 495 с.
17. Нацыянальны атлас Беларусі. Мінск: Белкартаграфія, 2024. 348 с.
18. Почвы Республики Беларусь / под ред. В. В. Лапы. Минск: ИВЦ Минфина, 2019. 632 с.
19. *Семененко Н. Н.* Торфяно-болотные почвы Полесья: трансформация и пути эффективного использования. Минск: Беларуская навука, 2015. 281 с.
20. *Смеян Н. И.*, *Цытрон Г. С.* Классификация, диагностика и систематический список почв Беларуси. Минск: РУП «Институт почвоведения и агрохимии», 2007. 220 с.
21. *Смоленцева Л. А.* Научно-техническая поддержка экспериментов ПАО «РКК «Энергия» с помощью наземного сегмента планирования и экспресс-анализа результатов исследований // Современ. проблемы ракетной и космич. техники: сб. ст. секции «Проблемы ракетной и космической техники» в рамках 58 Научных чтений. Казань, 2024. С. 92–101.
22. *Цытрон Г. С.*, *Бубнова Т. В.*, *Дробыш С. В.*, *Горбачева Е. В.* Использование показателей спектральной отражательной способности дерново-подзолистых почв в диагностике степени их антропогенной трансформации // Почвоведение и агрохимия. 2011. № 1. С. 29–36.
23. *Червань А. Н.*, *Давидович Ю. С.* Типология геосистем Белорусского Полесья // Журн. Белорусского гос. ун-та. География. Геология. 2024. № 2. С. 3–23.

24. *Шалькевич Ф. Е.*, *Курьянович М. Ф.* Тематическое дешифрирование: пособие. Минск: БГУ, 2022. 131 с.
25. *Andrew A. L.* Eigenvectors of certain matrices // Linear Algebra and its Applications. 1973. V. 7. Iss. 2. P. 151–162. DOI: 10.1016/0024-3795(73)90049-9.
26. *Bai Z. D.*, *Miao B. Q.*, *Pan G. M.* On asymptotics of eigenvectors of large sample covariance matrix // The Annals of Probability. 2007. V. 35. No. 4. P. 1532–1572. DOI: 10.1214/009117906000001079.
27. *Belgiu M.*, *Drăguţ L.* Random Forest in remote sensing: A review of applications and future directions // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 114. P. 24–31. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.
28. *Biau G.*, *Scornet E.* A random forest guided tour // TEST. 2016. V. 25. P. 197–227. DOI: 10.1007/s11749-016-0481-7.
29. *Estornell J.*, *Martí-Gavilá J. M.*, *Sebastiá M. T.*, *Mengual J.* Principal component analysis applied to remote sensing // Modelling in Science Education and Learning, 2013. V. 6. P. 83–89. DOI: 10.4995/msel.2013.1905.
30. *Han H.*, *Guo X.*, *Yu H.* Variable selection using mean decrease accuracy and mean decrease Gini based on random forest // 2016 7th IEEE Intern. Conf. on Software Engineering and Service Science (ICSESS). IEEE, 2016. P. 219–224. DOI: 10.1109/ICSESS.2016.7883053.
31. *Jolliffe I. T.* Principal Component Analysis. N. Y.: Springer-Verlag, 2002. 488 p. DOI: 10.1007/b98835.
32. *Jolliffe I. T.*, *Cadima J.* Principal component analysis: a review and recent developments // Philosophical Trans. Royal Soc. A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2016. V. 374. Article 20150202. DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.
33. *Kumar S.* Efficient K-mean clustering algorithm for large datasets using data mining standard score normalization // Intern. J. Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. 2014. V. 2. Iss. 10. P. 3161–3166.
34. *Mestre X.*, Improved estimation of eigenvalues and eigenvectors of covariance matrices using their sample estimates // IEEE Trans. Information Theory. 2008. V. 54. No. 11. P. 5113–5129. DOI: 10.1109/TIT.2008.929938.
35. *Palacios-Orueta A.*, *Ustin S. L.* Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains. I. Spectral analysis // Remote Sensing of Environment. 1998. V. 65. No. 2. P. 170–183. DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00024-8.
36. *Ran X.*, *Xi Y.*, *Lu Y. et al.* Comprehensive survey on hierarchical clustering algorithms and the recent developments // Artificial Intelligence Review. 2022. V. 56. P. 8219–8264. DOI: 10.1007/s10462-022-10366-3.
37. *Uddin M. P.*, *Mamun M. A.*, *Hossain M. A.* PCA-based feature reduction for hyperspectral remote sensing image classification // IETE Technical Review. 2021. V. 38. No. 4. P. 377–396. DOI: 10.1080/02564602.2020.1740615.
38. *Yin L.*, *Zhang C.*, *Liu K.*, *Wang X.* Low-tillering winter wheat cultivars are more adaptable to late sowing // J. Agricultural Science. 2020. V. 158. No. 10. P. 870–883. DOI: 10.1017/S002185962100023X.

Application of the VSS videospectral system for mapping vegetation types based on the results of space imagery

B. I. Belyaev [1], M.Yu. Belyaev [2], Yu. S. Davidovich [1], L. V. Katkovsky [1], S. V. Konev [2], V. M. Kuznetsov [2], G. S. Litvinovich [1], A. O. Martinov [1], L. A. Smolentseva [2]

[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, Moscow Region 141070, Russia
E-mail: post@rsce.ru

The article presents the results of processing individual images from the International Space Station using the VSS video spectral equipment as part of the Uragan space experiment aimed at monitoring natural and man-made disasters. The VSS hardware complex, developed by the A. N. Sevchenko

Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, combines synchronous high-resolution video recording (visible and near infrared range) with hyperspectral measurements (400–950 nm), which ensures increased accuracy of visual and spectral data analysis. As part of the experiment, in 2024, a survey of the territory of Belarus was carried out with the participation of the first Belarusian female cosmonaut M. Vasilevskaya. The purpose of this work is to classify the spectral radiance data and assess the significance of the spectral channels. The principal component analysis (PCA) was used for data processing, which allowed us to reduce the dimensionality of the original spectra (700 channels) to 2 components explaining 95.6 % of the variance. Hierarchical clustering in the reduced space identified five classes of natural objects: water surfaces, winter crops at the tillering stage, coniferous forests, peat-bog and sod-podzolic soils. A method for assessing the significance of spectral channels based on the PCA loading matrix is proposed, which revealed the significance of the entire spectral range of the VSS equipment (400–950 nm, except for the O_2 and H_2O absorption bands) for the analysis of surfaces with a predominance of vegetation. The results confirmed the correlation of biophysical parameters of the objects and their optical characteristics and also demonstrated the reproducibility of the method due to the preservation of the PCA parameters for processing new data. The practical significance of the work lies in the creation of a universal tool for operational analysis of hyperspectral remote sensing data, adapted for the tasks of monitoring land covers and natural disasters.

Keywords: classification, principal component analysis, spectral density of radiance, spectrum, spectral channels, Random Forest

Accepted: 03.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-70-88

References

1. Balabko P. N., Khusnetdinova T. I., Metechko L. B., Sorokin A. E., *Aehrokosmicheskii i pochvenno-ehkologicheskii monitoring pedosfery Zemli* (*na primere Rossiiskoi Federatsii i nekotorykh sopredel'nykh territorii*): *monografiya* (Aerospace and soil-ecological monitoring of the Earth's pedosphere (on the example of the Russian Federation and some adjacent territories): monograph), Moscow: Izdatelsko-torgovaya kompaniya "Dashkov i K", 2024, 276 p. (in Russian).
2. Bambalov N. N., Rakovich V. *A.*, Spectral reflectivity of peat, *Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta imeni V. I. Lenina. Ser. 2. Khimiya. Biologiya. Geografiya*, 1992, No. 1, pp. 68–71 (in Russian).
3. 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.
4. Belyaev B. I., Kurikina T. M., Lisitsa V. D., Sergeenko V. T., *Spektral'nye otrazhatel'nye svoistva pochv: analiticheskii obzor* (Spectral reflectivity properties of soils: analytical review), B. I. Belyaev (ed.), Minsk: Belorusskii filial of VNIITEI agroprom, 1991, 58 p. (in Russian).
5. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Gusev V. F., Ivanov V. A., Krot Yu. A., Ryazantsev V. V., Sosenko V. A., Chumakov A. V. (2014a), Videospectral system for monitoring the Earth's surface from the ISS, *6-i Belorusskii kosmicheskii kongress: materialy kongressa* (Proc. 6th Belarusian Space Congress), Minsk, 2014, V. 1, pp. 211–214 (in Russian).
6. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Desinov L. V. et al. (2014b), Spectral and images processing from the photospectral system in the space experiment "Hurricane" on the ISS, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 54–65 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414060025.
7. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu., Legostaev V. P., Ryazantsev V. V., Yurina O. A. (2015a), Features of imaging the Earth surface and using the results of the imaging made by the ISS Russian segment crews, *Space engineering and technologies*, 2015, No. 1 (8), pp. 17–30 (in Russian).
8. Belyaev M. Yu., Desinov L. V., Karavaev D. Yu., Sarmin E. E., Yurina O. A. (2015b), The study of catastrophic events that may lead to environmental challenges under the program "Hurricane" onboard the Russian segment of the International Space Station, *Cosmonautics and rocket engineering*, 2015, No. 1 (80), pp. 71–79 (in Russian).
9. Belyaev B. I., Belyaev M. Yu., Sarmin E. E., 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 the scientific hardware Videospectral System on board the Russian segment of the ISS, *Space engineering and technologies*, 2016, No. 2 (13), pp. 70–79 (in Russian).
10. 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, *Sovremennye problemy distan-*

tsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa, 2019, V. 16, No. 6, pp. 201–208 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-201-208.
11. Bruchkouskaya S. I., Litvinovich G. S., Bruchkousky I. I., Katkovsky L. V., Algorithm for second-order diffraction correction in the spectrometer with a concave diffraction grating, *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*, Minsk, 2019, V. 86, No. 4, pp. 620–627 (in Russian).
12. Lagutin B. M., *Naglyadnaya matematicheskaya statistika: uchebnoe posobie* (Visual mathematical statistics: Tutorial), Moscow: BINOM, Laboratoriya znanii, 2007, 472 p. (in Russian).
13. Martinov A. O. (2022a), Algorithm for automatic determination of spectral lines in aberration-prone images during wavelength calibration of imaging spectrometers, *Materialy 20-i Mezhdunarodnoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"*(Proc. 20th Intern. Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), Moscow: IKI RAS, 2022, p. 135 (in Russian), DOI: 10.21046/20DZZconf-2022a.
14. Martinov A. O. (2022b), Classification of norway spruce drying states on the basis on reflection spectra, *J. Belarusian State University. Physics*, 2022, No. 3, pp. 26–38, (in Russian), DOI: 10.33581/2520-2243-2022-3-26-38.
15. Martinov A. O., Litvinovich G. S., Gulyaeva S. I., Smolentseva L. A., Raskazov I. V., Method for mathematical correction of the ghosts in an image after reflection from the beam splitter plate, *J. Belarusian State University. Physics*, 2024, No. 3, pp. 25–40 (in Russian).
16. *Nauchnye osnovy tekhnologii vozdelyvaniya ozimykh zernovykh kul'tur*, *rapsa i kukuruzy* (Scientific foundations of technologies for cultivating winter grain crops, rapeseed, and corn), A. A. Autko, F. I. Privalov (eds.), Minsk: Belaruskaya navuka, 2021, 495 p. (in Russian).
17. *Natsyyanal'ny atlas Belarusi* (National Atlas of Belarus), Minsk: Belkartagrafiya, 2024, 348 p. (in Belarusian).
18. *Pochvy Respubliki Belarus'* (Soils of the Republic of Belarus), V. V. Lapa (ed.), Minsk: IVTs Minfina, 2019, 632 p. (in Russian).
19. Semenenko N. N., *Torfyano-bolotnye pochvy Poles'ya: transformatsiya i puti ehffektivnogo ispol'zovaniya* (Peat-bog soils of Polesia: transformation and ways of effective use), Minsk: Belaruskaya navuka, 2015, 281 p. (in Russian).
20. Smeyan N. I., Tsytron G. S., *Klassifikatsiya*, *diagnostika i sistematicheskii spisok pochv Belarusi* (Classification, diagnostics and taxonomic list of soils of Belarus), Minsk: RUP "Institut pochvovedeniya i agrokhimii", 2007, 220 p. (in Russian).
21. Smolentseva L. A., Scientific and technical support experiments of PJSC RSC "Energia" using the ground segment of planning and express analysis of research results, *Sovremennye problemy raketnoi i kosmicheskoi tekhniki: sbornik statei sektsii "Problemy raketnoi i kosmicheskoi tekhniki" v ramkakh 58 Nauchnykh chtenii* (Proc. "Modern Problems of Rocket and Space Technology": 58th Scientific readings, section "Problems of Rocket and Space Technology"), Kazan, 2024, pp. 92–101 (in Russian).
22. Tsytron G. S., Bubnova T. V., Drobysh S. V., Gorbacheva E. V., Use of indicators of spectral reflective capacity of the sod-podzolic soils in the diagnostic of their agrogenic transformation's degree, *Soil Science and Agrochemistry*, 2011, No. 1, pp. 29–36 (in Russian).
23. Chervan A. N., Davidovich Yu. S., Typology of geosystems of Belarusian Polesie, *J. Belarusian State University. Geography and Geology*, 2024, No. 2, pp. 3–23 (in Russian).
24. Shalkevich F. E., Kuryanovich M. F., *Tematicheskoe deshifrirovanie: posobie* (Thematic interpretation: manual), Minsk: BSU, 2022, 131 p. (in Russian).
25. Andrew A. L., Eigenvectors of certain matrices, *Linear Algebra and its Applications*, 1973, V. 7, Iss. 2, pp. 151–162, DOI: 10.1016/0024-3795(73)90049-9.
26. Bai Z. D., Miao B. Q., Pan G. M., On asymptotics of eigenvectors of large sample covariance matrix, *The Annals of Probability*, 2007, V. 35, No. 4, pp. 1532–1572, DOI: 10.1214/009117906000001079.
27. Belgiu M., Drăguţ L., Random Forest in remote sensing: A review of applications and future directions, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, V. 114, pp. 24–31, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.
28. Biau G., Scornet E., A random forest guided tour, *TEST*, 2016, V. 25, pp. 197–227, DOI: 10.1007/s11749-016-0481-7.
29. Estornell J., Martí-Gavilá J. M., Sebastiá M. T., Mengual J., Principal component analysis applied to remote sensing, *Modelling in Science Education and Learning*, 2013, V. 6, pp. 83–89, DOI: 10.4995/msel.2013.1905.
30. Han H., Guo X., Yu H., Variable selection using mean decrease accuracy and mean decrease Gini based on random forest, *2016 7th IEEE Intern. Conf. on Software Engineering and Service Science* (*ICSESS*), IEEE, 2016, pp. 219–224, DOI: 10.1109/ICSESS.2016.7883053.
31. Jolliffe I. T., *Principal Component Analysis*, New York: Springer-Verlag, 2002, 488 p., DOI: 10.1007/b98835.
32. Jolliffe I. T., Cadima J., Principal component analysis: a review and recent developments, *Philosophical Trans. Royal Soc. A: Mathematical*, *physical and Engineering Sciences*, 2016, V. 374, Article 20150202, DOI: 10.1098/rsta.2015.0202.

33. Kumar S., Efficient K-mean clustering algorithm for large datasets using data mining standard score normalization, *Intern. J. Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2014, V. 2, Iss. 10, pp. 3161–3166.
34. Mestre X., Improved estimation of eigenvalues and eigenvectors of covariance matrices using their sample estimates, *IEEE Trans. Information Theory*, 2008, V. 54, No. 11, pp. 5113–5129, DOI: 10.1109/TIT.2008.929938.
35. Palacios-Orueta A., Ustin S. L., Remote sensing of soil properties in the Santa Monica Mountains. I. Spectral analysis, *Remote Sensing of Environment*, 1998, V. 65, No. 2, pp. 170–183, DOI: 10.1016/S0034-4257(98)00024-8.
36. Ran X., Xi Y., Lu Y. et al., Comprehensive survey on hierarchical clustering algorithms and the recent developments, *Artificial Intelligence Review*, 2022, V. 56, pp. 8219–8264, DOI: 10.1007/s10462-022-10366-3.
37. Uddin M. P., Mamun M. A., Hossain M. A., PCA-based feature reduction for hyperspectral remote sensing image classification, *IETE Technical Review*, 2021, V. 38, No. 4, pp. 377–396, DOI: 10.1080/02564602.2020.1740615.
38. Yin L., Zhang C., Liu K., Wang X., Low-tillering winter wheat cultivars are more adaptable to late sowing, *J. Agricultural Science*, 2020, V. 158, No. 10, pp. 870–883, DOI: 10.1017/S002185962100023X.