

## РАДИОФИЗИКА

---

УДК 621.397.13:528.8

DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).95-107

ГРНТИ 47.51.39+36.23.21

Специальность ВАК 1.3.4

*Научная статья*

### О ПРИМЕНЕНИИ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ В ДИСТАНЦИОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ ЗЕМЛИ

Калитов М. А.

*АО «Элси» (Великий Новгород, Россия)*

**Аннотация** Обсуждаются вопросы применения спектрозональной визуализации в дистанционном зондировании Земли, как с помощью спутниковых снимков, так и с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Описывается использование спектрозональных снимков для оценки лесовозобновления, эффективности применения гербицидов, реконструкции археологических памятников, экологического мониторинга поверхности водохранилищ путем мониторинга степени распространения сине-зеленых водорослей, распознавания дорожной сети в лесных хозяйствах. Оценивается целесообразность применения БПЛА для съемки отдельных областей местности вместо получения изображений со спутников. Приводятся результаты повышения информативности мультиспектральных изображений, получаемых при различных вариантах обработки. По результатам аналитического обзора формулируются тенденции развития методов улучшения визуального качества спектрозональных изображений, полученных при мониторинге земной поверхности. Указываются недостатки рассмотренных способов повышения информативности мультиспектральных изображений, предлагаются доработки, которые способны улучшить используемые методы.

**Ключевые слова:** *спектрозональная визуализация, обработка спектрозональных изображений, дистанционное зондирование Земли*

**Для цитирования:** Калитов М. А. О применении спектрозональной визуализации в дистанционном зондировании земли // Вестник НовГУ. 2024. 1(135). 95-107. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).95-107

*Research Article*

### ABOUT THE APPLICATION OF MULTISPECTRAL VISUALIZATION IN EARTH REMOTE SENSING

Kalitov M. A.

*JSC "ELSY" (Veliky Novgorod, Russia)*

**Abstract** The issues of using multispectral imaging in remote sensing of the Earth, both using satellite images and using unmanned aerial vehicles (UAVs), are discussed. The use of multispectral images for assessing reforestation, the effectiveness of herbicide use, reconstruction of archaeological sites, environmental monitoring of the surface of reservoirs by monitoring the extent of the spread of blue-green algae, and recognition of the road network in forestry is described. The feasibility of using UAVs to survey individual areas of the terrain instead of obtaining images from satellites is assessed. The results of increasing the information content of multispectral images obtained using various processing options are presented. Based on the results of the analytical review, trends in the development of methods for improving the visual quality of multispectral images obtained during monitoring of the earth's surface are formulated. The disadvantages of the considered methods for increasing the information content of multispectral images are indicated, and improvements are proposed that can improve the methods used.

**Keywords:** *multispectral imaging, multispectral image processing, Earth remote sensing*

**For citation:** Kalitov M. A. About the application of multispectral visualization in earth remote sensing // Vestnik NovSU. 2024. 1(135). 95-107. DOI: 10.34680/2076-8052.2024.1(135).95-107

## **Введение**

Телевизионная спектрозональная визуализация является одной из актуальных и быстро развивающихся областей науки и техники [1]. При визуализации спектрозональных изображений широко применяются методы [2-13] их цифровой обработки. В свою очередь интерес к методам цифровой обработки изображений происходит из двух основных областей ее применения, которыми являются повышение качества изображений для улучшения его визуального восприятия человеком и обработка изображений для их хранения, передачи, представления и извлечения дополнительной визуальной информации [14].

Телевизионная спектрозональная визуализация состоит в наблюдении объекта одновременно в нескольких (минимум в двух) зонах спектра с целью выявления или усиления тех различий между деталями объекта, которые не фиксируются при обычной съемке в видимых лучах. Указанные зоны выбирают с учётом оптических характеристик объекта и целей съемки. Причём в одних случаях может потребоваться видеосъемка в видимой и невидимой частях спектра, в других – в избранных узких зонах видимой его части [15].

Цифровая спектрозональная съемка стала неотъемлемой частью дистанционного зондирования земной поверхности [16-19]. Известно об обширном перечне практических задач, решаемых с применением изображений, полученных в нескольких спектральных диапазонах наблюдения. К таким задачам относятся, наблюдение за процессом лесовозобновления [20], оценка эффективности применяемых гербицидов [21], идентификация и классификация лесов, почв, болот и др. [22], реконструкция археологических памятников [23], распознавание дорог в лесных хозяйствах [24], мониторинг биомассы в водоемах [25]. Существуют материалы для описания способов, улучшающих информативность и восприятие изображений путем классификации и нейронных сетей [22, 26], повышающих разрешение спектрозональных спутниковых снимков методом слияния [27], повышающих информативность мультиспектральных изображений с использованием текстурного анализа [28].

Целью настоящей статьи является аналитический обзор областей применения спектрозональных изображений, полученных при дистанционном зондировании Земли, оценка эффективности и достоверности существующих методов обработки, определение перспектив развития рассмотренных способов и разработки новых для улучшения качества снимков и получению дополнительной информации из них.

## **Аналитический обзор**

Спектрозональные снимки при дистанционном зондировании Земли нашли широкое применение в организациях, выполняющих надзор за возобновлением

лесных ресурсов [20, 22, 24], отмечается, что подобные системы позволяют различать лиственные и хвойные породы, определять состав молодняков и сухостоев в оставленных куртинах. Потребность в информации об актуальном состоянии лесных дорог, а также отсутствие в открытом доступе их точной координатной привязки в совокупности с труднодоступностью многих территорий приводят к необходимости использования дистанционного зондирования [24]. Причем используются как общедоступные данные от спутников Landsat и Sentinel, так и БПЛА. Ввиду целесообразности съемки с наиболее высоким пространственным разрешением и оперативности наиболее предпочтительными становятся изображения, полученные при помощи БПЛА. Для распознавания дорог в последнее время наиболее информативными признаны комбинации прямых дешифровочных признаков в сочетаниях (яркостные и текстурные, геометрические и яркостные).

Исследование [21] показало, что по спектрально-зональным снимкам с летательных аппаратов, возможно, обнаруживать области посевов, с большим количеством всходов сорняков. К сожалению, для корректного использования данного метода необходимо обладать набором исходных данных (виды сорняков, питательность среды и т. п.) в противном случае достоверность выводов может быть искажена. В статье [23] утверждают, что спектрально-зональные снимки, полученные при дистанционном зондировании Земли, могут быть использованы для предварительной оценки наличия культурного слоя.

Мультиспектральные изображения способны отражать актуальную информацию о развитии сине-зеленых водорослей, данное исследование [25] проводилось на примере Куйбышевского водохранилища, где с его помощью были отчетливо визуализированы все стадии от роста, до затухания. Результаты использованных и отраженных авторами в статье [25] методов приведены на рисунках 1-3 и являются следствием вычислений по следующим выражениям (1-3), приведенным в [29].

Известно использование индексов, разработанных непосредственно для водорослей, таких как Floating algae index (FAI) [30], Seaweed Enhancing Index (SEI) [31]. При расчете данных индексов используются специфические спектральные каналы ограниченного использования, которые недоступны для большинства территорий России [25]. Потому подробнее рассмотрим наиболее доступные, а значит общеприменяемые методы.

NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – нормализованный разностный вегетационный индекс), его использование обусловлено детектированием отражения хлорофилла, который содержится в сине-зеленых водорослях. Данный индекс не дает больше информации, чем визуальное наблюдение снимков в видимой области спектра [25].

NDWI (Normalized Difference Water Index – нормализованный разностный водный индекс) традиционно применяется для выделения границ водных объектов на фоне почвы и растительности [25].

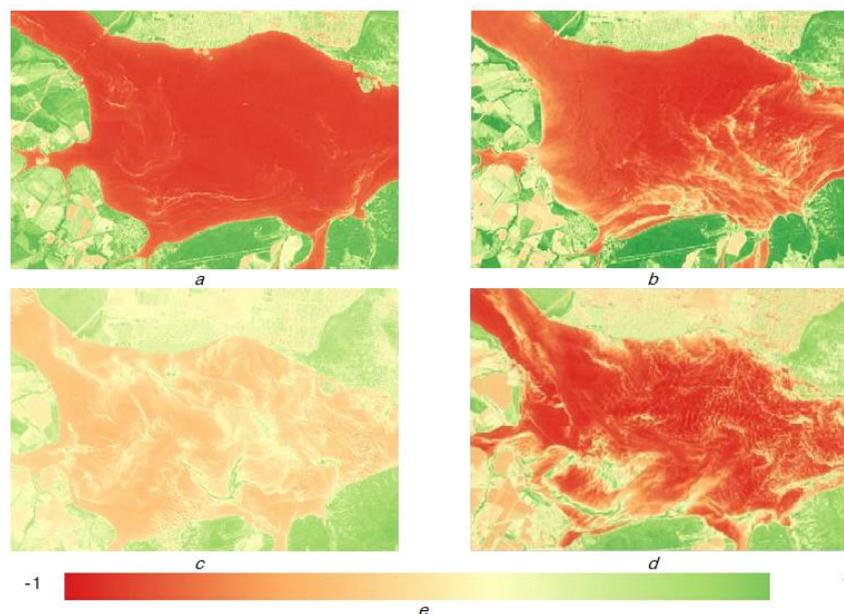


Рисунок 1. Спутниковые снимки, обработанные при помощи NDVI: а – дата снимка: 20.06.2021; б – дата снимка: 18.07.2021; с – дата снимка: 14.08.2021; д – дата снимка 19.08.2021; е – шкала значений NDVI [25]

SIPI (Structure Intensive Pigment Index – структурный индекс интенсивности пигмента) применяется в основном для определения эффективности использования растениями поступающего света для фотосинтеза и помогает оценивать их здоровье. SIPI рассматривается как индекс для наблюдения за циклами развития сине-зеленых водорослей, включающими раннее развитие, полноценную деятельность, угасание развития и отмирание [25]. Индексы вычисляются по формулам:

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}, \quad (1)$$

$$NDWI = \frac{green - NIR}{green + NIR}, \quad (2)$$

$$SIPI = \frac{NIR - blue}{NIR - red}, \quad (3)$$

где red – красная область спектра (Band 4), green – зеленая область спектра (Band 3), blue – синяя область спектра (Band 2), NIR – ближняя инфракрасная область спектра (Band 8) [29].

Суть методов обработки, отражаемых в формулах (1-3), состоит в том, что в числителе берутся цифровые отсчеты, соответствующие регистрации излучения

в узких зонах спектрального диапазона (red, green, blue, NIR) и вычитаются парами в зависимости от выбранного для обработки способа, а затем нормируются относительно их же суммы (1, 2) или разности (3) (знаменатель).

Представленные снимки с обработкой и расчетом индекса NDVI иллюстрируют изменение активности поглощения кислорода при фотосинтезе (рисунок 1). Замечено, что на снимке от 20 июня практически отсутствует биомасса. На снимках, сделанных позднее, начиная с 18 июля, видны значительные массивные скопления. Наиболее интенсивное образование биомассы происходит вдоль прибрежной полосы [25]. Далее следует пик распространения водорослей, а затем спад.

Авторами [25] предложено использование данного индекса для более четкого определения границ распространения сине-зеленых водорослей (рисунок 2). В частности, отмечено, что снимки, обработанные при помощи NDWI, а именно снимок от 14 августа, являются более информативными в связи с тем, что они меньше подвержены влиянию атмосферных явлений, которые проявились на рисунке 1 в виде снижения четкости изображения.

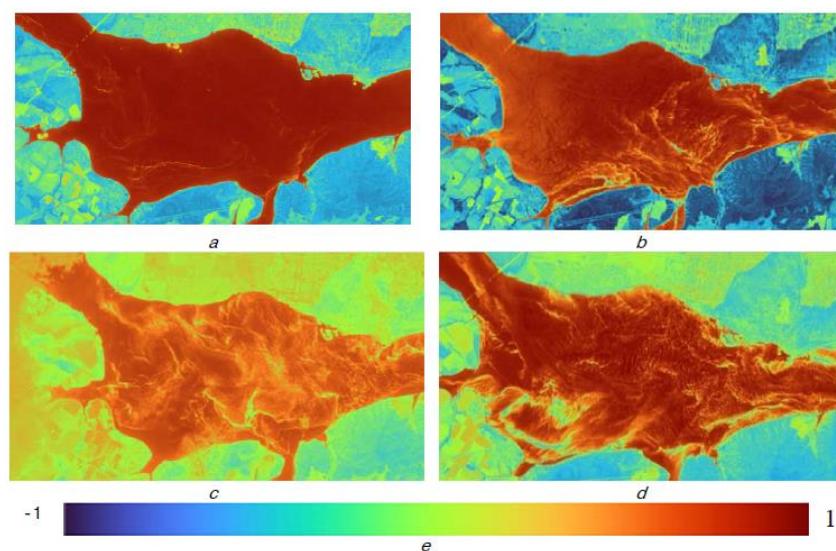


Рисунок 2. Спутниковые снимки, обработанные при помощи NDWI: а – дата снимка: 20.06.2021; б – дата снимка: 18.07.2021; с – дата снимка: 14.08.2021; д – дата снимка 19.08.2021; е – шкала значений NDWI [25]

SIPi, в отличие от вегетационного и водного индекса, напрямую связан с оценкой жизнедеятельности фитопланктона. В отличие от NDVI он не только учитывает наличие объема хлорофилла, но затрагивает обменные процессы, которые могут свидетельствовать о стадиях роста и развития сине-зеленых водорослей (рисунок 3).

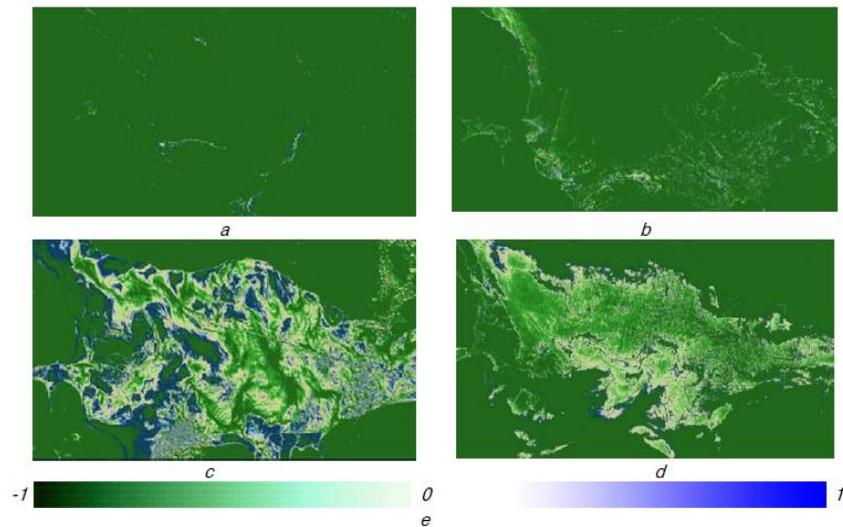


Рисунок 3. Спутниковые снимки, обработанные при помощи SIPI: а – дата снимка: 20.06.2021; б – дата снимка: 18.07.2021; в – дата снимка: 14.08.2021; г – дата снимка 19.08.2021; е – шкала значений SIPI [25]

На снимке от 20 июня происходит очаговое развитие биомассы. Далее, с повышением температуры воды к 18 июля, идет более интенсивное размножение сине-зеленых водорослей, при этом отсутствуют участки с отмирающими водорослями. На снимке от 14 августа можно заметить участки синего цвета, которые могут являться скоплением угнетенной биомассы со сниженным метаболизмом. Снимок от 18 августа уже не детектирует значительную часть еще выделяемых на снимках, обработанных при помощи вегетационных индексов сине-зеленых водорослей [25].

Результаты, приведенные на рисунках 1-3 показывают явное улучшение визуального восприятия изображений, яркие контрастные цвета, четкость границ между соседними зонами, которые позволяют провести классификацию каждой из них. Но снимок от 14 августа на рисунке 1, а особенно снимки от 20 июня и 18 июля на рисунке 3, несут крайне мало информации, что определяет тенденцию к дальнейшему улучшению существующих методов и разработке новых.

Перспективным развитием обработки снимков при дистанционном зондировании Земли является использование методов дифференциальной спектральной визуализации [8-10], мультипликативного метода [14], а также использование псевдогиперспектральных изображений на основе мультиспектральных снимков [32] позволяющих извлечь дополнительную информацию из изображения без увеличения количества спектральных каналов.

Тенденцией в развитии методов ДЗЗ является применение для этих целей гиперспектральных методов [33-36], обеспечивающих количество каналов до нескольких сотен, однако, поскольку мощность лучистого потока в узком спектральном диапазоне мала, такие методы при реализации требуют фотоприемников с большим размером пикселя, а, следовательно, низкой четкости.

Гиперспектральные системы более сложны в реализации, что к увеличению габаритов и стоимости.

Среди перспективных направлений развития методов ДЗЗ следует отметить повышение разрешения спектральных снимков методом слияния [27, 37-39]. Данный метод заключается в совмещении панхроматического изображения высокого разрешения с мультиспектральным низкого разрешения, что дает более подробную и четкую информацию об объектах на снимке.

### **Заключение**

В дистанционном зондировании Земли активно используются спектральные снимки. Различные области практического применения используют широкую номенклатуру методов цифровой спектральной визуализации, от общедоступных до узкоспециализированных и трудно-воспроизводимых.

В настоящее время наблюдается тенденция увеличения числа визуализируемых спектральных каналов и применения в ДЗЗ гиперспектральных и псевдогиперспектральных методов. В той связи большой интерес представляет развитие методов дифференциальной и интегральной обработки спектральных изображений, позволяющих получить дополнительную визуальную информацию.

Перспективным направлением являются также методы, позволяющие повысить контрастную чувствительность гиперспектральных систем при сохранении четкости цифровых телевизионных изображений за счет слияния пары изображений: изображения с высоким спектральным, но низким пространственным разрешением и изображения, с высоким пространственным, но низким спектральным разрешением.

### **Список литературы**

1. Шарак Д. С., Михнёнок Е. И., Шеин А. С., Хижняк А. В. Объединение изображений, получаемых по данным источников различного спектрального диапазона // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (БГУИР). 2017. 3(105). 45-51.
2. Корнышев Н. П., Лифар А. В., Ляховицкий Е. А., Родионов И. С., Цыпкин Д. О., Шеин Г. М. Телевизионные и оптико-электронные методы исследования исторических бумаг // Системы и средства связи телевидения и радиовещания. 2013. 1-2. 153-158.
3. Корнышев Н. П. Новые возможности телевизионных спектральных систем // Фотография. Изображение. Документ. 2015. 6(6). 89-93.
4. Зубарев Ю. Б., Сагдуллаев Ю. С., Сагдуллаев Т. Ю. Спектральные методы и системы в космическом телевидении // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2009. 1. 47-64.
5. Корнышев Н. П., Калитов М. А., Сенин А. С. Применение телевизионных спектральных методов при исследовании музейных объектов // 15-я

Международная конференция «Телевидение: передача и обработка изображений», 26-27 июня 2018 г.: материалы конференции. Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2018. С. 105-107.

6. Сагдуллаев Ю. С., Ковин С. Д. Формирование и совместная обработка сигналов спектрально-пространственных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2015. 5. 44-57.

7. Сагдуллаев Ю. С., Сагдуллаев Т. Ю. Основы построения информационно-измерительных систем спектрально-пространственного телевидения // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2018. 4. 59-67.

8. Сагдуллаев Т. Ю., Сагдуллаев Ю. С. Интегрально-дифференциальный метод формирования сигналов в системах объемного спектрально-пространственного телевидения // 13-я Международная конференция «Телевидение: передача и обработка изображений», 29-30 июня 2016 г.: материалы конференции. Санкт-Петербург: ЛЭТИ, 2016. С. 247-251.

9. Ваниев А. А., Калитов М. А. О повышении визуального качества дифференциальных спектрально-пространственных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2019. 4. 118-123.

10. Калитов М. А., Корнышев Н. П. Патент № 2679921 Российской Федерации, МПК H04N 7/18 (2006.01). Способ формирования цифровых спектрально-пространственных телевизионных сигналов: № 2018116286, 2018.04.28, заявл. 2018.04.28: опубл. 2019.02.14 / патентообладатель Закрытое акционерное общество «ЭЛСИ».

11. Калитов М. А., Корнышев И. П. Компьютерное моделирование мультипликативного метода формирования цифровых спектрально-пространственных изображений // Вестник НовГУ. 2020. 2(118). 76-78. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.2(118).76-78

12. Борисов Д. И., Ерганжиев Н. А., Калитов М. А., Корнышев Н. П. Патент № 2731880 Российской Федерации, МПК H04N 7/18 (2006.01). Способ формирования цифровых спектрально-пространственных телевизионных сигналов: № 2020102199, 2020.01.20, заявл. 2020.01.20: опубл. 2020.09.08 / патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого».

13. Ваниев А. А., Калитов М. А., Корнышев Н. П. Улучшение изображений, полученных методом дифференциальной спектрально-пространственной визуализации // Вестник НовГУ. 2019. 4(116). 9-12. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).9-12

14. Гонсалес Р., Вудс Р. Е. Цифровая обработка изображений / перевод с английского Л. И. Рубанова, П. А. Чочи. 3-е изд., испр. и доп. Москва: Техносфера, 2012. 1103 с.

15. Спектрогелиограф // Большая Советская Энциклопедия (СП): сайт. URL: <https://www.rulit.me/books/bolshaya-sovetskaya-enciklopediya-sp-read-88904-26.html> (дата обращения 21.12.2023).

16. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: основы и методы дистанционных исследований в геологии / перевод с немецкого В. А. Буша [и др.]; под редакцией В. Г. Трифонова. Москва: Мир, 1988. 343 с.

17. Кравцова В. И. Космические методы исследования почв: учебное пособие для студентов вузов. Москва: Аспект Пресс, 2005. 190 с.

18. Киенко Ю. П. Основы космического природоведения: учебник для вузов. Москва: Картоцентр – Геодезиздат, 1999. 285 с.

19. Малинников В. А., Стеценко А. Ф., Алтынов А. Е., Попов С. М. Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами: учебное пособие для студентов вузов. Москва: Изд. МИИГАиК, 2008. 145 с.

20. Гаврилова О. И., Грязькин А. В., Ольхин Ю. В. Использование беспилотного летательного аппарата для оценки процесса формирования молодняков на вырубках // Resources and Technology. 2023. 20(3). 60-75. DOI: 10.15393/j2.art.2023.7163
21. Подушин Ю. В., Савинский А. О., Мязина А. Н. Использование аэрофотосъемки мультиспектральной камерой для оценки эффективности применения гербицидов // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2021. 174. 359-378. DOI: 10.21515/1990-4665-174-027
22. Белов М. Л., Белов А. М., Городничев В. А., Альков С. В. Анализ возможностей мультиспектрального оптического метода мониторинга лесных территорий // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2022. 4(141). 56-69. DOI: 10.18698/0236-3933-2022-4-56-69
23. Журбин И. В., Злобина А. Г., Шаура А. С., Баженова А. И. Статистический анализ данных многозональной съемки для реконструкции археологических памятников // Химическая физика и мезоскопия. 2022. 24(1). 56-68. DOI: 10.31857/S0869606322040195
24. Подольская Е. С. Использование данных дистанционного зондирования земли из космоса для распознавания изображения дорог в лесном хозяйстве // Вопросы лесной науки. 2022. 5(4). 1-21. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-115
25. Sherstobitov D. N., Ermakov V. V., Pystin V. N., Tupitsyna O. V. Monitoring of the development of blue-green algae in the Kuibyshev reservoir using remote sensing indices // RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2023. 31(2). 232-240. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240
26. Гарафутдинова Л. В., Каличкин В. К., Хлебникова Е. П. Оценка методов классификации многозональных космических снимков // Вестник Омского государственного аграрного университета. 2022. 4(48). 19-28. DOI: 10.48136/2222-0364\_2022\_4\_19
27. Голуб Ю. И. Оценка результатов повышения разрешения мультиспектральных спутниковых изображений методом слияния // Системный анализ и прикладная информатика. 2022. 2. 10-19. DOI: 10.21122/2309-4923-2022-2-10-19
28. Зотов С. А., Дмитриев Е. В., Мельник П. Г., Кондранин Т. В. Повышение информативности мультиспектральных спутниковых изображений с использованием данных текстурного анализа // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2022. 2(386). 84-104. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-84-104
29. Hu C., He M.-X. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area // Eos Transactions American Geophysical Union. 2008. 89(33). 302-303. DOI: 10.1029/2008EO330002
30. Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // Remote Sensing of Environment. 2009. 113(10). 2118-2129. DOI:10.1016/j.rse.2009.05.012
31. Siddiqui M. D., Zaidi A. Z., Abdullah M. Performance assessment of newly developed seaweed enhancing index // Remote Sensing. 2008. 11(12). 1-14. DOI:10.3390/rs11121434
32. Корнышев Н. П., Гареев В. М., Гареев М. В., Серебряков Д. А. Особенности формирования псевдогиперспектральных изображений из RGB компонент // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 169-177. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).169-177

33. Калинин А. П., Орлов А. Г., Родионов И. Д. Авиационный гиперспектрометр // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Приборостроение. 2006. 3(64). 11-24.
34. Серебряков Д. А., Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П. Особенности формирования изображений в гиперспектральной системе на базе интерферометра Фабри-Перо // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. 1. 128-133.
35. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А., Карачинов В. А., Гаврушко В. В., Быстров Н. Е. Двухканальная гиперспектральная система // Вестник НовГУ. 2023. 5(134). 658-670. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).658-670
36. Гареев В. М., Гареев М. В., Лебединский Н. И., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Гиперспектральная система видимого диапазона на базе интерферометра Фабри-Перо // Вестник НовГУ. 2022. 3(128). 78-83. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83
37. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Компьютерное моделирование процедур слияния гиперспектральных и панхроматических изображений с использованием вейвлет-преобразования // Вестник НовГУ. 2023. 1(130). 158-168. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).158-168
38. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Методы повышения четкости цифровых телевизионных спектрозональных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. 2. 19-24.
39. Гареев В. М., Гареев М. В., Корнышев Н. П., Серебряков Д. А. Методы повышения четкости цифровых телевизионных изображений // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. 2023. 3. 53-59.

### References

1. Sharak D. S., Mikhnyonok E. I., Shein A. S., Khizhnyak A. V. [Combining images obtained from data from sources of different spectral ranges] // Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki (BGUIR). 2017. 3(105). 45-51.
2. Kornyshev N. P., Lifar A. V., Lyakhovitsky E. A., Rodionov I. S., Tsytkin D. O., Shein G. M. Televizionnyye i optiko-elektronnyye metody issledovaniya istoricheskikh bumag [Television and optical-electronic methods for studying historical papers] // Systems and television and radio communications. 2013. 1-2. 153-158.
3. Kornyshev N. P. Novyye vozmozhnosti televizionnykh spektral'nykh sistem [New possibilities of television spectral systems] // Photography. Image. Document. 2015. 6(6). 89-93.
4. Zubarev Yu. B., Sagdullaev Yu. S., Sagdullaev T. Yu. Spektrozonal'nyye metody i sistemy v kosmicheskom televidenii [Multi-wave-zones methods and systems in space TV] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2009. 1. 47-64.
5. Kornyshev N. P., Kalitov M. A., Senin A. S. Primeneniye televizionnykh spektrozonal'nykh metodov pri issledovanii muzeynykh ob"yektov [Application of television spectrozonal methods in the study of museum objects] // 15th International Conference "Television: Image Transmission and Processing", June 26-27, 2018: conference proceedings. Saint-Petersburg: LETI, 2018. P. 105-107.
6. Sagdullaev Yu. S., Kovin S. D. Formirovaniye i sovmestnaya obrabotka signalov spektrozonal'nykh izobrazheniy [Formation and joint signal processing of multispectral images] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2015. 5. 44-57.

7. Sagdullaev Yu. S., Sagdullaev T. Yu. Osnovy postroyeniya informatsionno-izmeritel'nykh sistem spektrozonal'nogo televideniya [Fundamentals of constructing information-measuring systems for spectrozonal television] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2018. 4. 59-67.
8. Sagdullaev T. Yu., Sagdullaev Yu. S. Integral'no-differentsial'nyy metod formirovaniya signalov v sistemakh ob'yemnogo spektrozonal'nogo televideniya [Integrated and differential method of formation of signals in systems of volume multispectral television] // 13th International Conference "Television: Image Transmission and Processing, June 29-30, 2016: conference proceedings. Saint-Petersburg: LETI, 2016. P. 247-251.
9. Vaniev A. A., Kalitov M. A., Kornyshev N. P. O povyshenii vizual'nogo kachestva differentsial'nykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Improvement of images obtained by the method of differential multispectral imaging] // Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya. 2019. 4. 118-123.
10. Kalitov M. A., Kornyshev N. P. Patent No. 2679921 of the Russian Federation, IPC H04N 7/18 (2006.01). Sposob formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [Method of forming digital spectrozonal television signals]: No. 2018116286, 2018.04.28, application 2018.04.28: publ. 2019.02.14 / patent holder JSC "ELSY".
11. Kalitov M. A., Kornyshev N. P. Komp'yuternoye modelirovaniye mul'tiplikativnogo metoda formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Accuracy increase of the differential multispectral imaging method] // Vestnik NovSU. 2020. 2(118). 76-78. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.2(118).76-78
12. Borisov D.I., Erganzhiev N.A., Kalitov M.A., Kornyshev N.P. Patent No. 2731880 of the Russian Federation, IPC H04N 7/18 (2006.01). Sposob formirovaniya tsifrovyykh spektrozonal'nykh televizionnykh signalov [Method for generating digital spectrum-zonal television signals]: No. 2020102199, 2020.01.20, application 2020.01.20: publ. 2020.09.08 / patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslav-the-Wise Novgorod State University".
13. Vaniev A. A., Kalitov M. A., Kornyshev N. P. Uluchsheniye izobrazheniy, poluchennykh metodom differentsial'noy spektrozonal'noy vizualizatsii [Improvement of images obtained by the method of differential multispectral imaging] // Vestnik NovSU. 2019. 4(116). 9-12. DOI: 10.34680/2076-8052.2019.4(116).9-12
14. Gonzalez R., Woods R. Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital image processing] / translated from English by L. I. Rubanova, P. A. Chochi. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Technosphaera, 2012. 1103 p.
15. Spectroheliograph // Great Soviet Encyclopedia (SE): website. URL: <https://www.rulit.me/books/bolshaya-sovetskaya-enciklopediya-sp-read-88904-26.html> (accessed: 21.12.2023).
16. Kronberg P. Distantcionnoye izucheniye Zemli: osnovy i metody distantcionnykh issledovaniy v geologii [Remote sensing of the Earth: fundamentals and methods of remote sensing in geology] / translation from German by V. A. Bush [et al.]; edited by V. G. Trifonov. Moscow: Mir, 1988. 343 p.
17. Kravtsova V.I. Space methods for soil research: a textbook for university students. Moscow: Aspect Press Ltd., 2005. 190 p.
18. Kienko Yu. P. Osnovy kosmicheskogo prirodovedeniya: uchebnik dlya vuzov [Fundamentals of space natural science: a textbook for universities]. Moscow: Kartgeocentr– Geodezizdat, 1999. 285 p.
19. Malinnikov V. A., Stetsenko A. F., Altynov A. E., Popov S. M. Monitoring prirodnoy sredy aerokosmicheskimi sredstvami: uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov

[Monitoring the natural environment using aerospace means: a textbook for university students]. Moscow: MII GAIK publ. house, 2008. 145 p.

20. Gavrilova O. I., Gryazkin A. V., Olkhin Yu. V. Ispol'zovaniye bespilotnogo letatel'nogo apparata dlya otsenki protsessa formirovaniya molodnyakov na vyrubkakh [The use of unmanned aerial vehicles to assess young trees formation in clean cutting areas] // Resources and Technology. 2023. 20(3). 60-75. DOI: 10.15393/j2.art.2023.7163

21. Podushin Yu. V., Savinsky A. O., Myazina A. N. Ispol'zovaniye aerofotos"yomki mul'tispektral'noy kameroy dlya otsenki effektivnosti primeneniya gerbitsidov [Using aerial photography with a multispectral camera to evaluate the effectiveness of herbicides] // Polythematic online scientific journal of Kuban State Agrarian University. 2021. 174. 359-378. DOI: 10.21515/1990-4665-174-027

22. Belov M. L., Belov A. M., Gorodnichev V. A., Alkov S. V. Analiz vozmozhnostey mul'tispektral'nogo opticheskogo metoda monitoringa lesnykh territoriy [Analysis of capabilities of the multispectral optical method in monitoring the forest territories] // Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering. 2022. 4(141). 56-69. DOI: 10.18698/0236-3933-2022-4-56-69

23. Zhurbin I.V., Zlobina A.G., Shaura A.S., Bazhenova A.I. Statisticheskii analiz dannykh mnogoazonal'noy s"yemki dlya rekonstruktsii arkheologicheskikh pamyatnikov [Statistical Analysis of Multispectral Imaging Data for the Reconstruction of Archaeological Sites] // Chemical physics and mesoscopy. 2022. 24(1). 56-68. DOI: 10.31857/S0869606322040195

24. Podolskaia E. S. Ispol'zovaniye dannykh distantsionnogo zondirovaniya zemli iz kosmosa dlya raspoznavaniya izobrazheniya dorog v lesnom khozyaystve [Use of remote sensing data from space for road image recognition in the forestry] // Forest science issues. 2022. 5(4). 1-21. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-115

25. Sherstobitov D. N., Ermakov V. V., Pystin V. N., Tupitsyna O. V. Monitoring of the development of blue-green algae in the kuibyshev reservoir using remote sensing indices // RUDN Journal of Ecology and Life Safety. 2023. 31(2). 232-240. DOI: 10.22363/2313-2310-2023-31-2-232-240

26. Garafutdinova L. V., Kalichkin V. K., Khlebnikova E. P. Otsenka metodov klassifikatsii mnogoazonal'nykh kosmicheskikh snimkov [Evaluation of methods for multispectral space images classification] // Vestnik of Omsk State Agrarian University 2022. 4(48). 19-28. DOI: 10.48136/2222-0364\_2022\_4\_19

27. Golub Yu. I. Otsenka rezul'tatov povysheniya razresheniya mul'tispektral'nykh sputnikovykh izobrazheniy metodom sliyaniya [Evaluation of the results of pansharpening multispectral images] // System analysis and applied information science. 2022. 2. 10-19. DOI: 10.21122/2309-4923-2022-2-10-19

28. Zotov S. A., Dmitriev E. V., Melnik P. G., Kondranin T. V. Povysheniye informativnosti mul'tispektral'nykh sputnikovykh izobrazheniy s ispol'zovaniyem dannykh teksturnogo analiza [Increasing the informativity of multispectral satellite images using texture analysis data] // Lesnoy Zhurnal (Russian Forestry Journal). 2022. 2(386). 84-104. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-84-104

29. Hu C., He M.-X. Origin and offshore extent of floating algae in Olympic sailing area // Eos Transactions American Geophysical Union. 2008. 89(33). 302-303. DOI: 10.1029/2008EO330002

30. Hu C. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans // Remote Sensing of Environment. 2009. 113(10). 2118-2129. DOI: 10.1016/j.rse.2009.05.012

31. Siddiqui M. D., Zaidi A. Z., Abdullah M. Performance assessment of newly developed seaweed enhancing index // *Remote Sensing*. 2008. 11(12). 1-14. DOI: 10.3390/rs11121434
32. Kornyshev N. P., Gareev V. M., Gareev M. V., Serebryakov D. A. Osobnosti formirovaniya psevdogiperspektral'nykh izobrazheniy iz RGB komponent [Features of the formation of pseudo-hyperspectral images from RGB components] // *Vestnik NovSU*. 2023. 1(130). 169-177. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).169-177
33. Kalinin A. P., Orlov A. G., Rodionov I. D. Aviatsionnyy giperspektrometr [Aviation hyper-spectrometer] // *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*. 2006. 3(64). 11-24.
34. Serebryakov D. A., Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P. Osobnosti formirovaniya izobrazheniy v giperspektral'noy sisteme na baze interferometra Fabri-Pero [Features of image formation in a hyperspectral system based on the Fabry-Perot interferometer] // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2023. 1. 128-133.
35. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebriakov D. A., Karachinov V. A., Gavrushko V. V., Bystrov N. E. Dvukhkanal'naya giperspektral'naya sistema [Two-channel hyperspectral system] // *Vestnik NovSU*. 2023. 5(134). 658-670. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.5(134).658-670
36. Gareev V.M., Gareev M.V., Lebedinsky N.I., Kornyshev N.P., Serebryakov D.A. Giperspektral'naya sistema vidimogo diapazona na baze interferometra Fabri-Pero [Hyperspectral visible range system based on the Fabry-Pérot interferometer] // *Vestnik NovSU*. 2022. 3(128). 78-83. DOI: 10.34680/2076-8052.2022.3(128).78-83
37. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Komp'yuternoye modelirovaniye protsedur sliyaniya giperspektral'nykh i pankhromaticheskikh izobrazheniy s ispol'zovaniyem veyvlet-preobrazovaniya [Computer simulation of procedures for merging hyperspectral and panchromatic images using wavelet transform] // *Vestnik NovSU*. 2023. 1(130). 158-168. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.1(130).158-168
38. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Metody povysheniya chetkosti tsifrovyykh televizionnykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Methods of increasing the clarity of digital television spectral images] // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2023. 2. 19-24.
39. Gareev V. M., Gareev M. V., Kornyshev N. P., Serebryakov D. A. Metody povysheniya chetkosti tsifrovyykh televizionnykh spektrozonal'nykh izobrazheniy [Methods of increasing the clarity of digital television spectral images] // *Voprosy radioelektroniki. Seriya: Tekhnika televideniya*. 2023. 3. 53-59

### **Информация об авторе**

*Калитов Михаил Андреевич* – ведущий инженер, АО «ЭЛСИ» (Великий Новгород, Россия),  
ORCID: 0009-0002-9419-2447, [mikhail.kalitov@yandex.ru](mailto:mikhail.kalitov@yandex.ru)