

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5502

УДК 004.932.2

Статья

## Определение состава смешанных древостоев на основе спектрально-текстурной классификации спутниковых изображений высокого разрешения

**Дмитриев Егор Владимирович**

*кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт вычислительной математики РАН (Российская Федерация), [yegor@mail.ru](mailto:yegor@mail.ru)*

**Зотов Сергей Александрович**

*аспирант, инженер лаборатории космической оптико-электронной аппаратуры «ЭЛФОКС», Московский физико-технический институт (Национальный исследовательский университет) (Российская Федерация), [zotov.sa@mipt.ru](mailto:zotov.sa@mipt.ru)*

**Мельник Пётр Григорьевич**

*кандидат сельскохозяйственных наук, доцент, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана (Национальный исследовательский университет); старший научный сотрудник, Институт лесоведения РАН (Российская Федерация), [melnik\\_petr@bk.ru](mailto:melnik_petr@bk.ru)*

*Получена: 13 ноября 2020 / Принята: 13 декабря 2020 / Опубликовано: 21 декабря 2020*

---

**Аннотация:** С развитием спутниковой аппаратуры, позволяющей получать многоспектральные и панхроматические изображения высокого пространственного разрешения, открываются новые возможности повышения точности и детализации дистанционного зондирования почвенно-растительного покрова за счёт совместного использования спектральных и текстурных особенностей обследуемых объектов. В данной работе предлагается методика распознавания породного состава и возрастных классов смешанных древостоев на основе совместной обработки многоспектральных и панхроматических спутниковых изображений WorldView-2. Для описания текстурных особенностей используются статистические признаки Харалика. Для проведения обучаемой классификации применяется разработанный ранее модифицированный метод декодирования, относящийся к классу методов ансамблевой классификации. Для оценки эффективности предлагаемого подхода проведены тестовые расчёты по совместной обработке изображений высокого разрешения выбранного участка Савватьевского

лесничества (Тверская область), результаты которых сравнивались с данными наземной лесной таксации. При интерпретации результатов расчётов выделена группа естественных факторов, вызывающих несоответствие между спутниковой и наземной информацией.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, распознавание образов, тематическая обработка, текстурный анализ, спутниковые изображения высокого разрешения, классификация древостоев

---

DOI: 10.15393/j2.art.2020.5502

Article

## Retrieval of the composition of mixed forest stands based on the spectral and texture classification of high-resolution satellite images

**Egor Dmitriev**

*Ph. D. in physics and mathematics, senior researcher, Institute of Numerical Mathematics, Russian Academy of Sciences (Russian Federation), [yegor@mail.ru](mailto:yegor@mail.ru)*

**Sergey Zotov**

*Ph. D. student, engineer of space optoelectronic equipment laboratory «ELFOX», Moscow Institute of Physics and Technology (Russian Federation), [zotov.sa@mipt.ru](mailto:zotov.sa@mipt.ru)*

**Petr Melnik**

*Ph. D. in agriculture, associate professor, Bauman Moscow State Technical University; senior researcher, Institute of Forest Science, Russian Academy of Sciences (Russian Federation), [melnik\\_petr@bk.ru](mailto:melnik_petr@bk.ru)*

*Received: 30.11.2020 / Accepted: 13 December 2020 / Published: 21 December 2020*

---

**Abstract:** Development of satellite equipment makes it possible to obtain multispectral and panchromatic images of high spatial resolution, new possibilities open up to improve the accuracy and detail of remote sensing of the soil and vegetation cover through the combined use of spectral and textural features of the objects under study. In this paper, we propose a method for recognizing the species composition and age classes of mixed forest stands based on joint processing of multispectral and panchromatic satellite images of WorldView-2. The statistical features of Haralik were used to describe the texture features. A previously developed modified decoding method, which belongs to the class of ensemble classification methods was used to perform the trained classification. To assess the effectiveness of the proposed approach, test calculations were made for the joint processing of high-resolution images of the selected area of the Savvatievskoe forestry (Tver region), the results of which were compared with the data of ground forest inventory. A group of natural factors that cause a discrepancy between satellite and ground information was identified when interpreting the calculation results.

**Keywords:** remote sensing, pattern recognition, thematic processing, texture analysis, high-resolution satellite images, classification of tree stands

---

## 1. Введение

Эффективное управление лесным хозяйством на территории Российской Федерации подразумевает сбор, систематизацию и своевременную актуализацию лесотаксационных данных. Традиционным методом дистанционного получения информации о параметрах лесных территорий, применяемым в последние годы и составляющим альтернативу дорогостоящим наземным обследованиям, является анализ мультиспектральных спутниковых данных среднего пространственного разрешения Landsat и Sentinel [1], [2]. Основными параметрами, определяемыми на основе попиксельной классификации спектральной отражательной способности обследуемых объектов, являются лесистость, породный состав и возрастные классы. Также спектральные характеристики на основе статистических закономерностей могут быть связаны и с другими таксационными параметрами, такими как полнота, базальная площадь, высота и различные характеристики биологической продуктивности [3]. В зависимости от выбранной территории точность определения указанных параметров может быть достаточно низкой. Повышение точности тематической обработки спутниковой информации способствует более эффективной реализации ряда государственных программ, таких как Государственная инвентаризация лесов (ГИЛ). Новая информация, полученная в ходе ГИЛ, обеспечивает принятие надёжных управленческих решений по использованию, охране и воспроизводству лесов на территории Российской Федерации.

Лесная растительность видимым образом реагирует на происходящее изменение глобального климата [4]. Происходят различные трансформации области произрастания отдельных видов, систематические изменения структуры и жизненного состояния древостоев. На сегодняшний день принято выделять три основных направления трансформации древесных популяций в условиях быстро меняющегося климата [5]: выживание за счёт пространственной миграции и приобретения новых экологических ниш; биологические изменения, приводящие к адаптации к новым условиям произрастания в текущих местах обитания; и исчезновение вида. Для осуществления мониторинга такого рода изменений используются многовременные спутниковые изображения. Так, в работе [6] представлены результаты восемнадцатилетнего мониторинга выбранных лесных территорий Национального парка Санта-Фе в штате Нью-Мексико (США) на основе изображений Landsat. Выявленные области значимой деградации древостоев объясняются уменьшением количества осадков и повреждением насекомыми-вредителями. Для территории России важную роль играет мониторинг лиственничников Сибири и Дальнего Востока [7], труднодоступных для проведения наземных обследований. Методика обработки многовременных Landsat изображений среднего разрешения, представленная в работе [1], позволила картировать участки возобновляющихся лиственничных лесов, подвергшихся воздействию лесных пожаров.

С появлением спутниковых систем высокого разрешения, таких как WorldView, Quickbird и Pleiades, появились новые возможности дистанционного мониторинга лесных территорий с учётом их структурных особенностей. Высокое пространственное разрешение позволяет нам

учитывать распределение освещённости элементов лесного полога, использовать широкий набор методов извлечения текстурных особенностей и, при переходе к сверхвысокому разрешению, использовать результаты сегментации крон отдельных деревьев [8]. Результаты тематической обработки изображений WorldView-2, представленные в работах [9—11], демонстрируют новые возможности классификации породного состава древостоев различных африканских регионов, эффективные для инвентаризации небольших территорий.

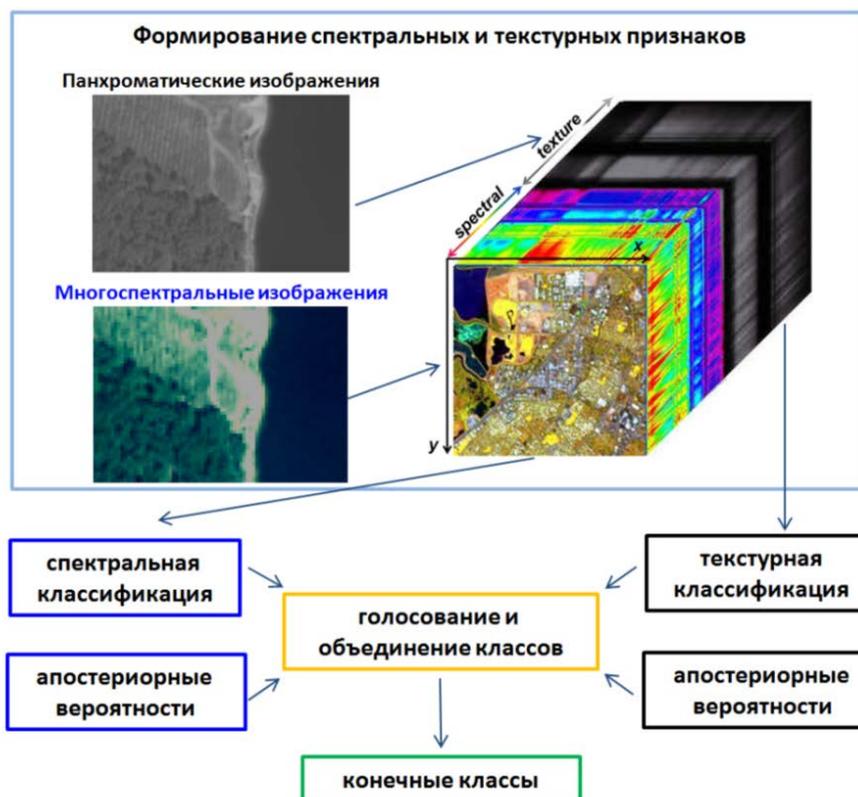
В данной работе предлагается методика определения породного состава и возрастных классов смешанных древостоев, характерных для центральной части России. Методика основывается на совместной обработке мультиспектральных и панхроматических изображений высокого разрешения. При этом учитываются как спектральные, так и текстурные особенности определяемых классов.

## 2. Материалы и методы

Коммерческие данные спутниковой аппаратуры WorldView-2 представляются панхроматическими и мультиспектральными изображениями, имеющими достаточно точную географическую привязку. Несмотря на высокое пространственное разрешение указанных изображений (0,46 м, 1,85 м), при их совмещении не удаётся визуализировать значимых различий положения наземных объектов. На начальном этапе совместной обработки производится приведение мультиспектральных данных к выбранным физическим единицам, выравнивание контрастности и приведение к заданному количеству градаций серого соответствующих панхроматических изображений и совмещение с векторными данными визуального анализа и наземных измерений.

Дальнейшая схема обработки представлена на рисунке 1. Первым шагом является формирование объединённого куба спектрально-текстурных признаков, по аналогии с публикацией [12]. Спектральные признаки формируются на основе многоспектральных изображений. Панхроматические изображения используются для извлечения текстурных признаков. На этапе формирования обучающей информации производится сопоставление спектральных и текстурных признаков классифицируемых объектов.

Для построения обучающего ансамбля спектральных признаков предпочтительно использовать чистые выделы, содержащие только одну породу. Для поиска однородных участков используются данные наземных измерений. При этом также желательно контролировать полноту и возраст. В случае, когда наземные данные содержат лишь информацию о доминантной породе, необходимо проводить дополнительный анализ в предположении смешанного породного состава. Если доминантная порода существенно отличается от субдоминантных пород по своим спектральным характеристикам, то использование кластерного анализа позволяет значительным образом повысить точность построения обучающего ансамбля данных для выделенной территории. Спектральные характеристики распознаваемых объектов нормализуются на интегральную яркость.



**Рисунок 1.** Общая схема совместной обработки многоспектральных и панхроматических изображений

**Figure 1.** General scheme for joint processing of multispectral and panchromatic images

Особенность обработки изображений высокого пространственного разрешения позволяет в определённой мере учитывать различия в степени освещённости отдельных элементов лесного полога. В упрощённом представлении структуру лесного полога можно представить как комбинацию освещённых и затенённых частей кроны, а также межкрупных просветов. Даже с учётом нормализации спектральные характеристики указанных участков могут существенным образом отличаться. При этом различие между спектрами одного и того же участка с разным освещением может быть сильнее, чем между спектрами различных пород.

Для статистического описания текстур использовалась методика, описанная в работе [13]. Панхроматическое изображение пробегает окно заданного размера. Для каждого положения окна производится вычисление матрицы совместной встречаемости уровней серого (GLCM — Gray-Level Co-Occurrence Matrix) [14]. Элементы GLCM представляют собой частоты встречаемости градиентов яркости по заданному направлению. Таким образом, при построении матрицы необходимо определить два параметра: расстояние и угол смежности. Нами использовался симметричный способ построения GLCM, подразумевающий, что вместе с заданным направлением смежности рассматривается также и противоположное. На основе GLCM определяется функция вероятности распределения совместной встречаемости

заданного числа градаций серого и производится расчёт статистик, известных как текстурные признаки Харалика [14]. В данной работе используются 19 наиболее известных статистик: автокорреляция, островершинность, асимметрия, контраст, корреляция, энтропия разности, дисперсия разности, неоднородность, энергия, энтропия, однородность (1-й и 2-й типы), информационная мера корреляции (1-й и 2-й типы), максимум вероятности, среднее суммы, энтропия суммы, сумма квадратов, дисперсия суммы. Особенности применения данных признаков приведены в работе [13].

Для сокращения объёма вычислений при совместной обработке панхроматических и мультиспектральных изображений достаточно передвигать центр окна только по пикселям, координаты которых соответствуют центрам пикселей многоспектрального изображения. Для корректной обработки пикселей вблизи границы панхроматическое изображение необходимо расширить на половинный размер окна, например отражением. Размер окна определяется характерным масштабом анализируемых текстур. Если размер окна выбран слишком малым, то результат текстурной классификации будет подвержен влиянию высокочастотных шумов. При слишком большом размере окна возрастает время расчётов и происходит чрезмерное сглаживание распознаваемых объектов. Таким образом, окно должно иметь минимально возможный размер, при котором анализируемые текстуры хорошо различимы.

Для проведения обучаемой классификации спектральных и текстурных признаков использовался модифицированный метод декодирования (ММД), предложенный в работе [15]. Стандартный алгоритм декодирования [16], [17] представляет собой ансамблевый классификатор, который может быть сформулирован в терминах оптимизационной задачи

$$a(x) = \arg \min_{y_i} \frac{\sum_{j=1}^L |c_{ij}| g(c_{ij}, s_j(x))}{\sum_{j=1}^L |c_{ij}|}, \quad (1)$$

где  $L$  — число используемых способов обучения бинарного классификатора,  $c_{ij}$  — элементы матрицы кодирования классов,  $g$  — функция потерь,  $s$  — функция баллов классификатора. Таким образом, для классифицируемого набора признаков  $x$  выбирается класс, соответствующий минимальным средним потерям. Обоснование выбора функции потерь и схемы кодирования подробно описано в работе [15].

Возможности использования стандартного алгоритма декодирования для проведения спектрально-текстурной классификации ограничены. Основной причиной является чрезмерное количество признаков, доступных для использования. Это приводит к неустойчивости решения и высоким вычислительным затратам. Преимущество ММД состоит в более эффективном использовании доступных признаков при сохранении способности к обобщению. Основная идея предлагаемой модификации состоит в том, что задачи двоичной классификации, определённые матрицей кодирования, имеют различную сложность и, кроме того, каждая из них в различной степени подвержена проклятию размерности. В качестве основных классификаторов рассматриваются метод ближайшего

эталона, квадратичный дискриминантный анализ и метод опорных векторов с гауссовским ядром [18]. Эти классификаторы различаются по быстродействию и точности классификации. Для чётко различимых классов оправдано использование более простого и быстрого метода ближайших эталонов. Если применение этого метода приводит к значительным ошибкам классификации, то необходимо использовать более точные нелинейные методы. Для эффективного сокращения размерности задач бинарной классификации используется регуляризованный метод последовательного отбора [19].

На заключительном этапе проводится коррекция результатов классификации на основе методов математической морфологии [20]. При постобработке используется информация о разрешении кроны деревьев пикселями изображения. Алгоритм можно сформулировать следующим образом.

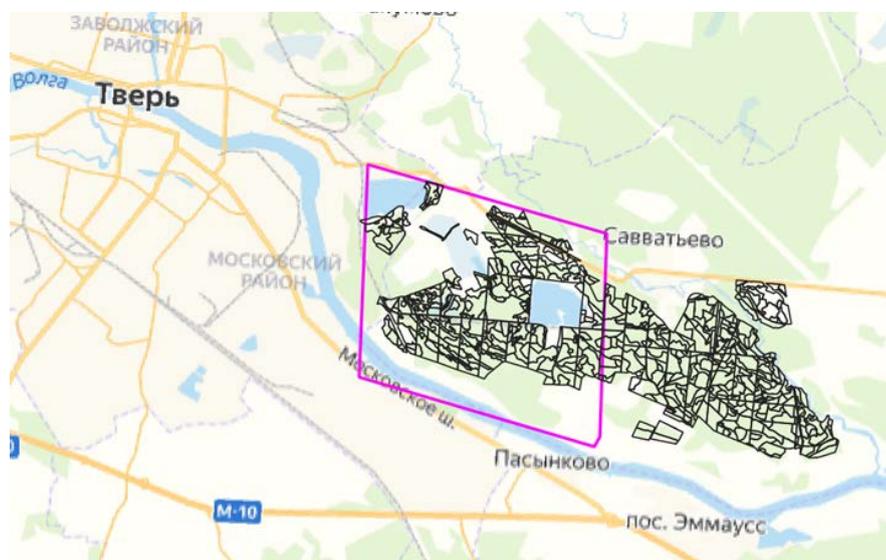
В результатах классификации выбираются только классы, которые соответствуют породам деревьев. Используется круговой структурный элемент. Размер элемента определяется разрешением изображения и предполагаемыми размерами крон. В случае обработки изображений WorldView-2 был выбран элемент размером  $3 \times 3$  пикселя. Классы образуют отдельные бинарные слои. Слои перебираются в цикле и для каждого слоя двукратно производится операция открытия и инверсии. Далее слои суммируются и вырезаются пиксели, соответствующие выбросам.

### 3. Результаты

Для проведения тестовых расчётов были выбраны изображения WorldView-2 тестового участка на территории Савватьевского лесничества (Тверская область), полученные 25 июня 2016 г. Расположение лесотаксационных выделов и обрабатываемых изображений показаны на рисунке 2. Леса Савватьевского лесничества относятся к зоне смешанных хвойно-широколиственных лесов. Участок, обозначенный фиолетовой рамкой, содержит выделы с четырьмя типами доминантных пород: сосна, ель, берёза и осина, однако основными породами являются сосна и берёза. Наземные данные лесной таксации относятся к 2005 г., последняя актуализация этих данных проводилась Тверским лесоустроительным предприятием ФГБУ «Рослесинфорг» в 2007 г. При проведении лесоустройства инженерами-таксаторами проводились натурные работы с описанием состава насаждений, полноты, средних диаметров, высот, среднего запаса и прочих лесотаксационных показателей.

На рисунке 3 представлены результаты распознавания основных типов объектов на основе совместной обработки мультиспектральных и панхроматических изображений высокого пространственного разрешения, полученных с помощью аппаратуры WorldView-2. В сравнении с традиционными подходами полученные результаты тематической обработки отличаются лучшей детализацией и более высокой точностью за счёт усовершенствования процесса построения обучающей базы данных. Результаты классификации лесных участков представлены с точностью до отдела (хвойные и лиственные), для облегчения восприятия цветовой информации. В число наземных объектов добавлены дополнительные классы

травянистой растительности с подразделением на полевую, лесную и болотную, искусственные объекты также разделены на здания с металлической или шиферной кровлей и асфальтобетонные поверхности (включая плоские крыши предприятий и многоэтажных зданий).

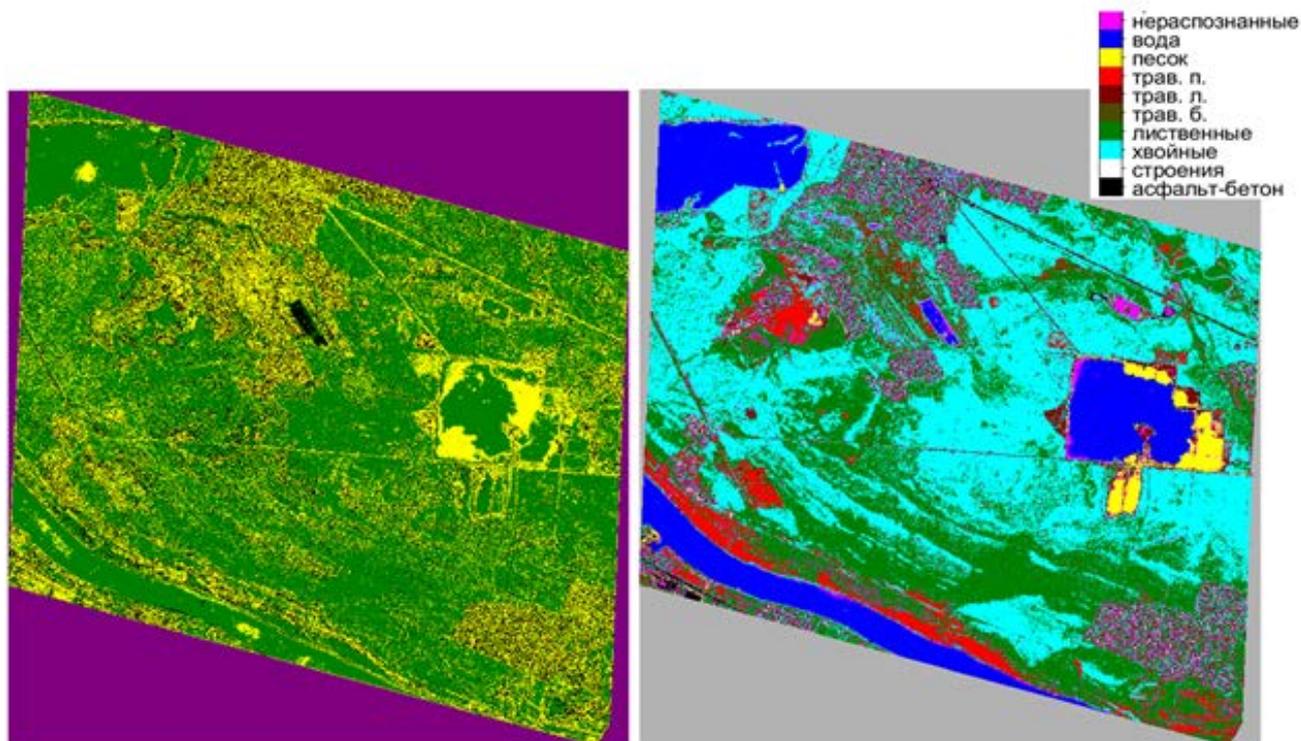


**Рисунок 2.** Расположение выделов на территории Савватьевского лесничества. Фиолетовой рамкой выделена область съёмки WorldView-2

**Figure 2.** The location of forest plots on the territory of the Savvatyevskoe forestry. The area of WorldView-2 image is highlighted with a purple frame

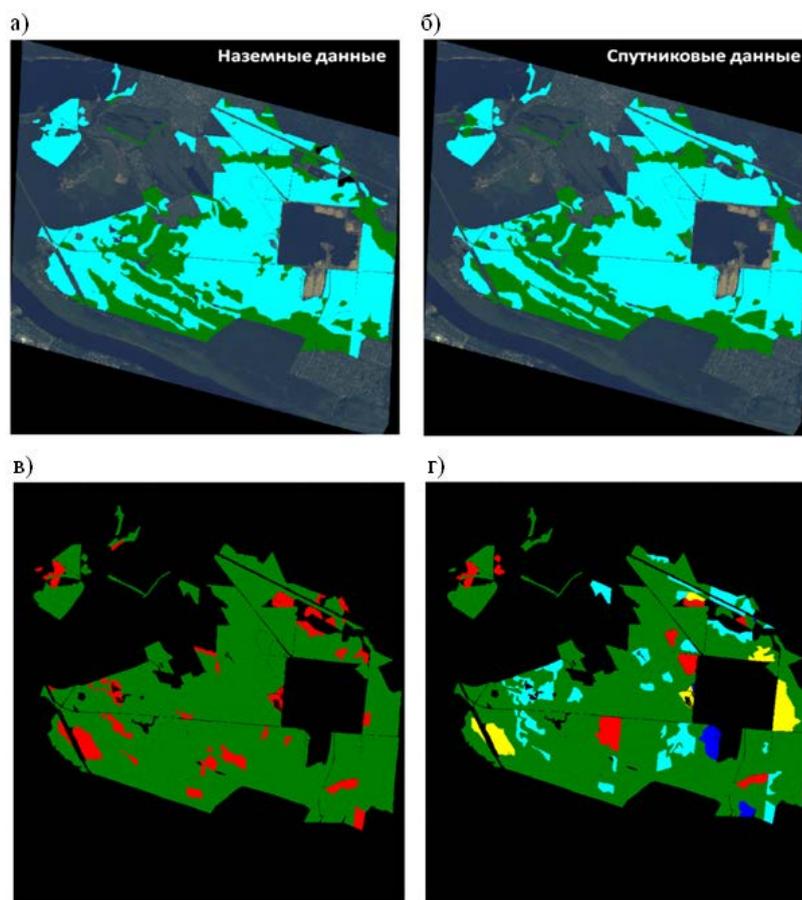
В левой части рисунка 3 представлен результат сравнительного анализа информативности спектральных и текстурных признаков в задаче классификации. На большей части рисунка спектральные признаки имеют большую значимость. Использование текстурных признаков становится более важным для объектов с сильным искажением отражательной способности (мелководье, заболоченные территории, зоны застройки и т. п.).

На основе полученных данных были построены повывделенные тематические карты. Пример такой карты для лиственных и хвойных отделов представлен на рисунке 4. При визуальном сравнении карт, полученных по данным наземной лесной таксации (рисунок 4, а) и по результатам обработки спутниковых изображений (рисунок 4, б), можно видеть хорошее соответствие. Средневзвешенная (на площадь выделов) ошибка составила 8 % при сравнении всех имеющихся данных. Однако большая часть данной ошибки объясняется не ошибками метода классификации, а ошибками наземных данных.



**Рисунок 3.** Распознавание основных типов объектов территории Савватьевского лесничества на основе изображений WorldView-2: справа — спектрально-текстурная классификация, слева — вклад спектральных и текстурных признаков (чёрный — преобладают текстурные признаки, зелёный — спектральные, жёлтый — равная информативность)

**Figure 3.** Recognition of the main types of objects by using WorldView-2 images of the territory of Savvatyevskoe forestry: on the right — results of spectral-texture classification, on the left — the contribution of spectral and texture features (black — predominance of texture features, green — predominance of spectral features, yellow — equal information content)

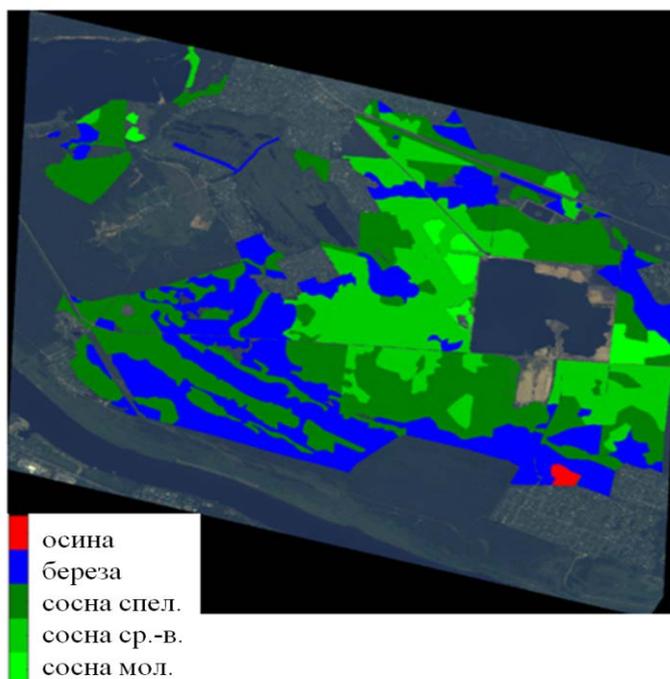


**Рисунок 4.** Повывделенные тематические карты лиственных (зелёный) и хвойных (сине-зелёный) отделов древостоев на территории Савватьевского лесничества. Цвета отделов находятся в соответствии с рисунком 3: *a* — карта, построенная по наземной информации; *б* — карта, построенная по спутниковым данным; *в* — карта соответствия наземных и спутниковых данных (зелёный — соответствие, красный — отличие); *г* — карта выделов, для которых несоответствие может объясняться естественными причинами (красный — редколесье согласно наземным данным, жёлтый — редколесье согласно спутниковым данным, синий — возраст менее 5 лет, сине-зелёный — доминантная порода составляет менее 60 %)

**Figure 4.** Thematic maps of predominance of deciduous (green) and coniferous (blue-green) stands on the territory of the Savvatyevskoe forestry. The colors of forest plots are in agreement with Fig. 3: *a* — the ground based map; *b* — the map obtained from satellite data; *c* — the discrepancy map between ground and satellite data (green — coincidence, red — difference); *d* — map of forest plots for which the discrepancy can be explained by natural causes (red — sparse forest according to ground inventory data, yellow — sparse forest according to satellite data, blue — the age is less than 5 years, blue-green — dominant species is less than 60 %)

На рисунке 4, в представлена карта выделов, в которых имеет место несоответствие спутниковой и наземной информации (выделены красным цветом). Площадь этих выделов не велика, но вполне заметна. Бóльшая их часть возникает вследствие естественных причин (рисунок 4, з). Ряд выделов имеет сильно разреженный полог согласно данным лесной таксации. Как правило, это места вырубок, на территории которых произрастают несомкнувшиеся лесные культуры или должны быть произведены работы по лесовосстановлению. К такого рода выделам относятся также и молодняки возрастом менее 5 лет. Часть выделов имеет значительные нарушения сомкнутости полога. Такие нарушения легко визуализируются. Учёт перечисленных факторов снижает оценку ошибки до 5 %. Также существенное влияние на точность оказывают выделы, где процентное содержание доминантной породы менее 60 % (выделены сине-зелёным цветом). Учёт данной информации снижает ошибку до значения 2,8 %.

Пример тематической карты доминантных пород для выбранной территории с учётом классов возраста сосновых древостоев представлен на рисунке 5. Сопоставление с наземной лесотаксационной информацией показывает, что определение классов возраста происходит с гораздо бóльшими погрешностями, чем для породного состава.



**Рисунок 5.** Построение тематической карты доминантных пород с учётом классов возраста для территории Савватьевского лесничества

**Figure 5.** The thematic map of dominant species for the territory of the Savvatyevskoe forestry, taking into account age classes

#### 4. Обсуждение и заключение

Предложена методика совместной обработки многоспектральных и панхроматических спутниковых изображений высокого пространственного разрешения с целью распознавания породного состава и классов возраста смешанных древостоев. Особенностью предлагаемого подхода является использование преимуществ ансамблевой классификации, связанных с возможностью более эффективного извлечения информации из имеющихся признаков при сохранении способности к обобщению. Эффективность подхода подтверждается результатами тестовых расчётов для территории Савватьевского лесничества (Тверская область). Сравнение с наземными данными показало, что большая часть несоответствий вызвана естественными факторами, связанными с локальными изменениями на участках лесного фонда, изменением плановых работ по лесовосстановлению и относительно низким содержанием доминантной породы.

#### Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 19-01-00215 и № 20-07-00370.

#### Список литературы

1. *Chen D., Loboda T. V., Krylov A., Potapov P. V.* Mapping stand age dynamics of the Siberian larch forests from recent Landsat observations // *Remote sensing of environment*. 2016. Vol. 187. P. 320—331.
2. *Korhonen L., Packalen P., Rautiainen M.* Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index // *Remote sensing of environment*. 2017. Vol. 195. P. 259—274.
3. *Meng Q., Cieszewski C., Madden M.* Large area forest inventory using Landsat ETM+: a geostatistical approach // *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2009. Vol. 64 (1). P. 27—36.
4. *Keenan R. J.* Climate change impacts and adaptation in forest management: a review // *Annals of Forest Science*. 2015. Vol. 72. P. 145—167.
5. *Aitken S. N., Yeaman S., Holliday J. A., Wang T., Curtis-McLane S.* Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations // *Evolutionary applications*. 2008. Vol. 1 (1). P. 95—111.
6. *Vogelmann J. E., Tolk B., Zhu Z.* Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data // *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. 113 (8). P. 1739—1748.
7. *Мельник П. Г., Карасев Н. Н., Леуцёв Г. А.* Популяционно-географическая изменчивость лиственницы в фазе приспевания // *Леса Евразии — Белорусское Поозерье: Материалы XII Междунар. конф. молодых учёных, посвящ. 145-летию со дня рождения проф. Г. Ф. Морозова*. М.: МГУЛ, 2012. С. 189—191.
8. *Wagner F. H., Ferreira M. P., Sanchez A., Hirye M. C. M., Aragão L. E. O. C.* Individual tree crown delineation in a highly diverse tropical forest using very high resolution satellite images // *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2018. Vol. 145 (B). P. 362—377.

9. Cho M. A., Malahlela O., Ramoelo A. Assessing the utility WorldView-2 imagery for tree species mapping in a South African subtropical forest patch and the conservation implications: Dukuduku forest patch as case study // *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015. Vol. 38. P. 349—357.
10. Karlson M., Ostwald M., Reese H., Bazié H. R., Tankoano B. Assessing the potential of multi-seasonal WorldView-2 imagery formapping West African agroforestry tree species // *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2016. Vol. 50. P. 80—88.
11. Madonsela S., Cho M. A., Mathieu R., Mutanga O., Ramoelo A., Kaszta Ž., Van De Kerchove R., Wolff E. Multi-phenology WorldView-2 imagery improves remote sensing of savannah tree species // *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2017. Vol. 58. P. 65—73.
12. Bannon D. Hyperspectral imaging: Cubes and slices // *Nature photonics*. 2009. Vol. 3 (11). P. 627—629.
13. Dmitriev E. V., Sokolov A. A., Kozoderov V. V., Delbarre H., Melnik P. G., Donskoi S.A. Spectral-texture classification of high resolution satellite images for the state forest inventory in Russia // *Proc. SPIE 11149, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI*. 2019. Vol. 111491J. DOI: 10.1117/12.2532965.
14. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification // *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 1973. SMC-3. Vol. 6. P. 610—621.
15. Dmitriev E. V., Kozoderov V. V., Dementyev A. O., Safonova A. N. Combining Classifiers in the Problem of Thematic Processing of Hyperspectral Aerospace Images // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*. 2018. Vol. 54 (3). P. 213—221.
16. Dietterich T. G., Bakiri G. Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes // *J. Artificial Intelligence Research*. 1995. Vol. 2. P. 263—286.
17. Escalera S., Pujol O., Radeva P. On the decoding process in ternary error-correcting output codes // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2010. Vol. 32 (7). P. 120—134.
18. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer Series in Statistics. 2nd ed. 2008. 745 p.
19. Dmitriev E. V. Classification of the Forest Cover of Tver' Region Using Hyperspectral Airborne Imagery // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. Vol. 50 (9). P. 929—942.
20. Soille P. *Morphological image analysis: principles and applications*. Springer. 2nd ed. 2002. 408 p.

## References

1. Chen D., Loboda T. V., Krylov A., Potapov P. V. Mapping stand age dynamics of the Siberian larch forests from recent Landsat observations. *Remote sensing of environment*, 2016, vol. 187, pp. 320—331.
2. Korhonen L., Packalen P., Rautiainen M. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. *Remote sensing of environment*, 2017, vol. 195, pp. 259—274.
3. Meng Q., Cieszewski C., Madden M. Large area forest inventory using Landsat ETM+: a geostatistical approach. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2009, vol. 64 (1), pp. 27—36.
4. Keenan R. J. Climate change impacts and adaptation in forest management: a review. *Annals of Forest Science*, 2015, vol. 72, pp. 145—167.

5. Aitken S. N., Yeaman S., Holliday J. A., Wang T., Curtis-McLane S. Adaptation, migration or extirpation: climate change outcomes for tree populations. *Evolutionary applications*, 2008, vol. 1 (1), pp. 95—111.
6. Vogelmann J. E., Tolk B., Zhu Z. Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 2009, vol. 113 (8), pp. 1739—1748.
7. Melnik P. G., Karasev N. N., Leschev G. A. Population and geographical variability of the larch in the phase of prematurity. *Eurasian Forests — Belarusian Lake District (Belorusskoye Poozerie)* [Materials of the XII International Conference of Young Scientists, dedicated to 145th anniversary from the date of Prof. G. F. Morozov's birth]. Moscow, MGUL, 2012, pp. 189—191. (In Russ.)
8. Wagner F. H., Ferreira M. P., Sanchez A., Hirye M. C. M., Aragão L. E. O. C. Individual tree crown delineation in a highly diverse tropical forest using very high resolution satellite images. *ISPRS J. of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, vol. 145 (B), pp. 362—377.
9. Cho M. A., Malahlela O., Ramoelo A. Assessing the utility WorldView-2 imagery for tree species mapping in a South African subtropical forest patch and the conservation implications: Dukuduku forest patch as case study. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, vol. 38, pp. 349—357.
10. Karlson M., Ostwald M., Reese H., Bazié H. R., Tankoano B. Assessing the potential of multi-seasonal WorldView-2 imagery formapping West African agroforestry tree species. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, vol. 50, pp. 80—88.
11. Madonsela S., Cho M. A., Mathieu R., Mutanga O., Ramoelo A., Kaszta Ž., Van De Kerchove R., Wolff E. Multi-phenology WorldView-2 imagery improves remote sensing of savannah tree species. *International J. of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, vol. 58, pp. 65—73.
12. Bannon D. Hyperspectral imaging: Cubes and slices. *Nature photonics*, 2009, vol. 3 (11), pp. 627—629.
13. Dmitriev E. V., Sokolov A. A., Kozoderov V. V., Delbarre H., Melnik P. G., Donskoi S.A. Spectral-texture classification of high resolution satellite images for the state forest inventory in Russia. *Proc. SPIE 11149, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XXI*, 2019, vol. 111491J. doi: 10.1117/12.2532965.
14. Haralick R. M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 1973, SMC-3, vol. 6, pp. 610—621.
15. Dmitriev E. V., Kozoderov V. V., Demytyev A. O., Safonova A. N. Combining Classifiers in the Problem of Thematic Processing of Hyperspectral Aerospace Images. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2018, vol. 54 (3), pp. 213—221.
16. Dietterich T. G., Bakiri G. Solving Multiclass Learning Problems via Error-Correcting Output Codes. *J. Artificial Intelligence Research*, 1995, vol. 2, pp. 263—286.
17. Escalera S., Pujol O., Radeva P. On the decoding process in ternary error-correcting output codes. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2010, vol. 32 (7), pp. 120—134.
18. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer Series in Statistics, 2nd ed., 2008. 745 p.
19. Dmitriev E. V. Classification of the Forest Cover of Tver' Region Using Hyperspectral Airborne Imagery. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2014, vol. 50 (9), pp. 929—942.
20. Soille P. *Morphological image analysis: principles and applications*. Springer, 2nd ed., 2002. 408 p.