

## Выработка требований к мультиспектральным данным дистанционного зондирования Земли в задаче экспертизы зарастания пахотных земель древесно-кустарниковой растительностью

А.Ю. Денисова<sup>1</sup>, А.А. Егорова<sup>1</sup>, В.В. Сергеев<sup>1,2</sup>, Л.М. Кавеленова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, д. 34,

<sup>2</sup> ИСОИ РАН – филиал ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН, 443001, Россия, г. Самара, ул. Молодогвардейская, д. 151

### Аннотация

В статье рассматривается вопрос формирования требований к мультиспектральным данным дистанционного зондирования Земли при экспертизе зарастания пахотных земель древесно-кустарниковой растительностью с применением авторской технологии анализа состава растительных сообществ, основанной на суперпиксельной сегментации. Исследование производится по двум наземным контрольно-измерительным площадкам с использованием доступных данных дистанционного зондирования Земли высокого разрешения. В статье рассматривается влияние пространственного разрешения, комбинаций спектральных каналов, а также сезонов съёмки на качество оценки элементарных классов растительности, составляющих основу растительного сообщества – залежь, по мультиспектральным данным дистанционного зондирования Земли. В ходе исследований было показано, что для определения древесно-кустарниковой растительности эффективнее использовать данные дистанционного зондирования Земли, полученные в осенний период, а именно во второй половине сентября. Наилучшими спектральными каналами для анализа древесно-кустарниковой растительности на фоне травянистых растительных сообществ оказались красный и синий спектральные каналы, а для разделения на классы различных травянистых растительных сообществ в составе спектра необходимо наличие ближнего инфракрасного канала. Данные дистанционного зондирования Земли с пространственным разрешением 2,5 м позволяют устойчиво выделять древесно-кустарниковые растительные сообщества с высокой сомкнутостью крон (90 % и более), но не могут быть использованы для классификации отдельно стоящих экземпляров деревьев. Отдельно стоящие высокие деревья и кустарники (с высотой 8 м) могут быть классифицированы на изображениях с пространственным разрешением 0,8 м, однако увеличение пространственного разрешения не повышает качества классификации. Наивысшая достигнутая с помощью использованной технологии точность определения элементарных классов растительности на исследуемых площадках составила 90 % и 83 %, что показывает высокий потенциал её применения в рассматриваемом виде экспертизы пахотных земель.

**Ключевые слова:** залежь, мультиспектральные данные дистанционного зондирования Земли, набор спектральных каналов, пахотные земли, пространственное разрешение, сезон съёмки, суперпиксельная сегментация, элементарный класс растительности.

**Цитирование:** Денисова, А.Ю. Выработка требований к мультиспектральным данным дистанционного зондирования Земли в задаче экспертизы зарастания пахотных земель древесно-кустарниковой растительностью / А.Ю. Денисова, А.А. Егорова, В.В. Сергеев, Л.М. Кавеленова // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. 43, № 5. – С. 846-856. – DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-846-856.

### Введение

Экспертиза сельскохозяйственных угодий на предмет оценки их используемости в течение ряда лет является основой рационального использования земельных ресурсов. Участки, на которых отсутствует сельскохозяйственная деятельность за длительный период (20 лет), могут быть переведены в земли иных категорий или введены в оборот посредством установления нового собственника участка. В постановлении Правительства РФ от 23.04.2012 № 369 предусмотрен ряд критериев, определяющих состояние земельного участка как неиспользуемого. В их число входит залесённость и (или) закустаренность его пло-

щади свыше, чем на 15 % [1]. Таким образом, экспертиза участков пашни на предмет зарастания древесно-кустарниковой растительностью имеет большое хозяйственное значение и является одним из оснований для признания участка в качестве неиспользуемого. Формирование залежных участков получило особо широкое распространение в различных регионах РФ, начиная с 90-х, при этом в зарастании прежних пахотных угодий участвовали как аборигенные (например, берёза повислая, осина), так и интродуцированные в искусственные насаждения виды древесных растений (вяз мелколистный, клён ясенелистный, лох узколистный и др.).

Традиционным способом оценки залесённости является выезд на местность и формирование контрольных площадок в пределах исследуемого участка, на которых подсчитывается количество деревьев, средний диаметр кроны и другие характеристики [2]. Однако данный способ является весьма трудоёмким и затратным.

Современные средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и технологии классификации изображений способны сократить затраты на обследование участка. Изображения ДЗЗ могут быть получены без выезда на местность и обработаны в полуавтоматическом режиме, что позволяет сократить общую трудоёмкость обследований, в особенности при необходимости организации повторных обследований. Кроме того, использование архивных данных на территории позволяет побочно оценивать возраст образовавшихся на участке древесно-кустарниковых сообществ путём анализа результатов классификации в ретроспективе. В связи с этим исследование возможности использования данных ДЗЗ для экспертизы зарастания пашни является актуальной и перспективной задачей.

Особенностью растительного сообщества неиспользуемой пашни является сочетание различных типов травянистых естественных сообществ [3] и отдельно стоящих деревьев и кустарников, причём именно концентрация деревьев и кустарников определяет степень залесённости участка. Однако лишь некоторые методы классификации изображений могут определять отдельно стоящие экземпляры деревьев и кустарников, в том числе на фоне травянистых растительных сообществ [4–7]. Как правило, указанные методы требуют использования данных сверхвысокого разрешения (данных авиасъёмки), а также относительно большие обучающие выборки (несколько сотен пикселей), что бывает сложно обеспечить на практике.

На фоне указанных ограничений привлекательным является использование технологии анализа растительных сообществ на основе суперпиксельной сегментации, предложенной авторами настоящей статьи ранее в работе [8]. Особенностью предложенной технологии является использование предположения о локальной однородности растительных сообществ, что позволяет интерпретировать пространственно связанные области с высокой степенью близости спектральных характеристик (суперпиксели) как ареалы, занятые одним типом растительности. Таким образом, на изображении, имеющем суперпиксельное представление, могут быть выделены даже малые участки одного типа растительности, в том числе отдельно стоящие деревья и кустарники. Кроме того, данная технология не требовательна к размеру обучающей выборки, формируемой экспертом для последующей классификации изображения.

Очевидным является тот факт, что качество данных ДЗЗ оказывает сильное влияние на результаты классификации. Однако применительно к рассматриваемой задаче анализа неиспользуемых пахотных зе-

мель в целях экспертизы степени их зарастания отсутствуют сравнительные исследования качества различных источников ДЗЗ, что необходимо при переходе к использованию данных ДЗЗ для такого рода экспертиз. Поэтому в рамках настоящей статьи рассматривается вопрос влияния различных характеристик данных ДЗЗ на качество классификации состава растительного сообщества неиспользуемой пашни. В статье рассматриваются такие характеристики снимков, как спектральный состав, пространственное разрешение и дата наблюдений (или требования к оперативности съёмки). Результатом исследований является формирование требований к мультиспектральным данным ДЗЗ, применяемым для анализа неиспользуемых пахотных земель, на основе оценок качества классификации типовых растительных сообществ (элементарных классов растительности), а также качества оценки концентрации типовых растительных сообществ в пределах заданной окрестности пикселя. Сформулированные рекомендации могут быть применены при выборе средств ДЗЗ для проведения соответствующих экспертиз.

#### ***Общая характеристика растительного сообщества неиспользуемой пашни***

Объектом экспертизы на использование пахотных земель является земельный участок сельскохозяйственных земель, на котором предполагается длительное отсутствие деятельности по обработке почвы и выращиванию сельскохозяйственных культур. На таких участках в первые годы зарастания (5–8 лет) формируются устойчивые травянистые растительные сообщества и, при дальнейшем отсутствии обработки (более 10 лет), древесно-кустарниковые сообщества.

К числу травянистых сообществ, возникающих на брошенных пахотных землях, относятся разнотравно-злаковые и полынно-злаковые ассоциации. Основными характеристиками травянистого растительного покрова являются высота травостоя и проективное покрытие, отражающее долю площади, занимаемой надземными частями растений на единицу площади поверхности почвы. На основе этих характеристик уместно определять выделяемые в пределах анализируемого участка элементарные классы травянистой растительности.

Что касается древесно-кустарниковых сообществ, то их наиболее значимыми характеристиками являются: видовой состав, средний диаметр кроны, высота ствола и сомкнутость кроны, отражающая отношение общей площади проекции кроны деревьев и кустарников (без учёта площади перекрытия кроны) к общей площади участка, на котором они расположены.

Степень зарастания участка древесно-кустарниковой растительностью определяется как доля площади, занимаемой этой растительностью на участке, от общей площади участка. При расчёте данного показателя учитываются как области, занятые сплошным лесом, так и совокупность отдельно стоящих на участке деревьев и кустарников, причём последние включаются в общую

площадь древесно-кустарниковых растений как результат произведения площади кроны на количество экземпляров деревьев. На практике, как правило, применяются усреднённые показатели диаметра кроны и концентрации деревьев и кустарников, так как при большой площади участка более точные измерения могут быть весьма трудоёмкими.

Таким образом, задача экспертизы заключается в определении суммарной площади участка, занятой древесно-кустарниковой растительностью на фоне различного рода травянистых растительных сообществ.

#### Данные наземных обследований

Выработка требований к мультиспектральным данным ДЗЗ, используемым для экспертизы зарастания сельскохозяйственных участков древесно-кустарниковой растительностью, производилась на примере двух контрольно-измерительных площадок (КИП) в Самарской области. Для этих КИП были доступны описания растительного покрова и его характеристики, полученные в ходе наземных обследований в 2016 году экспертами-экологами – сотрудниками кафедры экологии, ботаники и охраны природы Самарского университета.

Исследуемые участки, показанные на рис. 1, расположены в пределах земель сельскохозяйственного назначения в Кинельском районе Самарской области в окрестностях села Нижненикольское. Участки представляют собой залежные земли, на которых не производилась сельскохозяйственная обработка в течение 20 лет.

Участок 1 является примером пашни, заросшей вязом мелколистным (карагачом), что типично для Самарской области при отсутствии избыточного увлажнения. Высота древесного яруса на этом участке составляет до 8 м, сомкнутость кроны – до 20%, а основой растительного сообщества являются разнотравно-злаковые ассоциации, отдельно стоящие вязы мелколистные и подрост деревьев и кустарников с высотой до 3 м (включая клён ясенелистный, сливу степную, яблоню лесную и др.).

Участок 2 представляет собой залежь, типичную для южных районов области и характеризуется неравномерным зарастанием древесно-кустарниковой растительностью с различными видами травянистого покрова. Древесно-кустарниковый ярус составляют деревья лоха узколистного возраста более 15 лет с диаметром проекции кроны от 3 м до 5 м и высотой 6–8 м. Сомкнутость кроны в среднем составляет 50%, местами достигает 90%. Травянистые растения представлены полынно-злаковой и разнотравно-злаковыми ассоциациями. Первая ассоциация характеризуется высотой травостоя до 1 м с проективным покрытием травостоя более 80%, вторая – высотой травостоя около 30 см с проективным покрытием до 80%.

На основе данных наблюдений были определены целевые элементарные классы растительности (ЭКР):

1. Низкая трава (класс 1 – разнотравно-злаковые ассоциации).

2. Высокая трава (класс 2 – полынно-злаковые ассоциации).
3. Деревья и кустарники (класс 3).
4. Разреженная низкая трава (класс 0 – области с высокой долей открытой почвы).

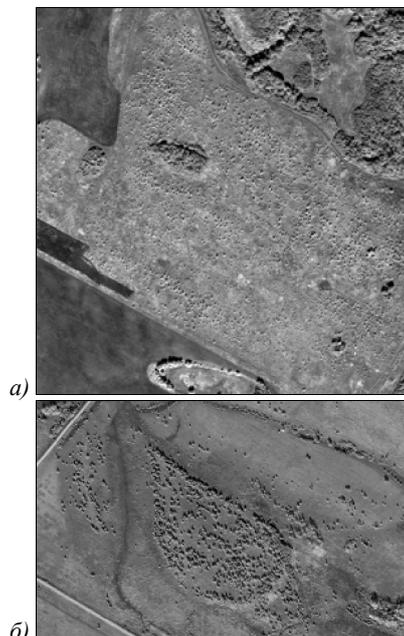


Рис. 1. Участки залежных земель: участок 1 (а), участок 2 (б)

#### Данные ДЗЗ

Для выявления оптимального набора спектральных каналов были проанализированы синтезированные данные ДЗЗ. Для определения оптимальной даты съёмки и пространственного разрешения были исследованы архивные снимки участков наземных обследований, выполненные различными оптическими системами ДЗЗ высокого разрешения (5 м и менее). Выбор снимков высокого разрешения обусловлен необходимостью оценки отдельно стоящих экземпляров древесно-кустарниковой растительности, которые неразличимы на снимках среднего разрешения.

Перечень источников использованных данных ДЗЗ представлен в табл. 1. Снимки, полученные с аппаратов (КА) SPOT-7, SPOT-5 и Ресурс-П, были подвергнуты предварительной обработке с повышением пространственного разрешения за счёт комплексирования с данными панхроматических сенсоров той же съёмочной системы ДЗЗ. Предварительная обработка производилась с помощью программного комплекса Scanex Image Processor 4.0 [9]. Снимки с платформы Google Earth [10] дополнительной обработке не подвергались.

Примеры снимков участка 2, полученных из различных источников, показаны на рис. 2.

#### Используемые методы и алгоритмы

Задачей исследования являлось сравнение данных ДЗЗ по различным параметрам для формирования к ним требований, соблюдение которых обеспечит вы-

сокое качество экспертизы зарастания пашни древесно-кустарниковой растительностью.

Табл. 1. Используемые данные ДЗЗ

Год	Пространственное разрешение, м	Система ДЗЗ (тип сенсора, источник)
2016	0,8	Ресурс-П (Геотон, РКЦ «ПРОГРЕСС»)
2016	1,5	SPOT-7 (ИТЦ СКАНЭКС)
2015	≈ 0,5	Geoeye-1 и WorldView-1,2 (Google Earth)
2014	≈ 0,5	Geoeye-1 и WorldView-1,2 (Google Earth)
2012	2,5	SPOT-5 (ИТЦ СКАНЭКС)
2010	≈ 0,5	Geoeye-1 и WorldView-1,2 (Google Earth)

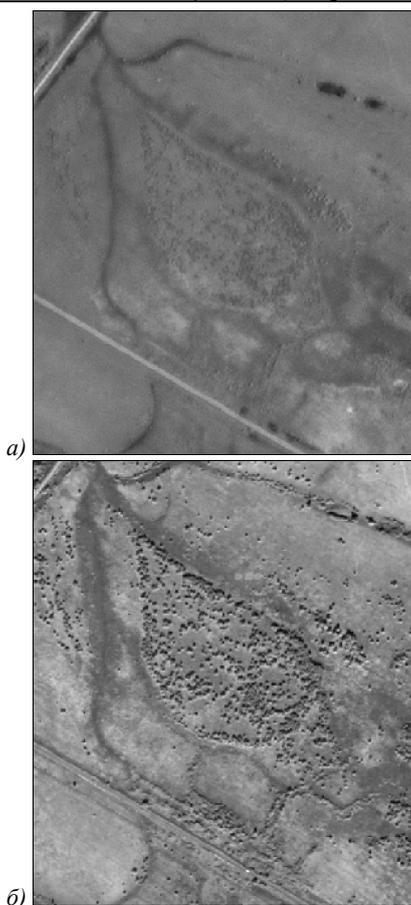


Рис. 2. Примеры снимков участка 2: SPOT-7, 02.06.2016, 1,5 м (а), Геотон, 31.08.2016, 0,8 м (б)

Использованная в исследовании технология анализа растительных сообществ по данным ДЗЗ [8] представляет собой совокупность следующих этапов:

1. Формирование пользовательской обучающей выборки малого размера. На данном этапе эксперт должен определить на изображении области малого размера, соответствующие растительности целевых классов с высокой степенью концентрации.
2. Выполнение суперпиксельной сегментации изображения (со входным параметром – порогом  $\epsilon$ , который задаёт яркостной диапазон внутри суперпикселя) и вычисление признаков суперпикселей. Результатом суперпиксельной сегментации явля-

ется разбиение изображения на пространственно связанные участки с высокой степенью однородности по яркости пикселей. В итоге каждый суперпиксель может быть интерпретирован как участок земной поверхности, занятый только одним ЭКР.

3. Сопоставление суперпиксельной сегментации с пользовательской обучающей выборкой и формирование обучающей выборки, состоящей из суперпикселей для каждого ЭКР. На данном этапе отбираются такие суперпиксели, суммарная площадь пересечения с пользовательской выборкой которых для данного ЭКР составляет не менее  $T\%$ . Данный этап позволяет сократить усилия эксперта по формированию выборки большого объёма с точным очерчиванием границ ареалов растительности.
4. По обучающей выборке, состоящей из суперпикселей, инициализируется алгоритм кластеризации k-means [11], с помощью которого производится разметка всего изображения на ЭКР согласно принадлежности центру ближайшего кластера.
5. Рассчитывается концентрация каждого ЭКР в окрестности  $D$  каждой точки изображения.

Таким образом, технология позволяет классифицировать изображение на ЭКР и определять их концентрацию. В [8] было показано, что применение суперпиксельной сегментации со значениями порога  $2\epsilon = 10, 15, 20, 25$  обеспечивает качество классификации методом k-means выше, чем поэлементный подход (классификация проводилась по яркостным и геометрическим признакам суперпикселей). Однако вопрос оптимальности выбора спектральных каналов при этом был оставлен в стороне, как и анализ других важных характеристик снимков.

В рамках настоящего исследования для целевых ЭКР было произведено комплексное исследование качества данных ДЗЗ, необходимых для устойчивого определения рассматриваемых целевых ЭКР и, следовательно, для проведения экспертизы зарастания участков пашни древесно-кустарниковой растительностью.

Для выполнения анализа как синтезированных данных ДЗЗ, так и реальных данных были использованы следующие величины:

1. Вероятность верной классификации ЭКР:

$$p = \frac{N_{true}}{N_{total}}, \tag{1}$$

где  $N_{true}$  – количество пикселей контрольной выборки, проклассифицированных верно,  $N_{total}$  – общее количество пикселей в контрольной выборке. Среднеквадратичная ошибка оценки концентрации по контрольной выборке:

$$\xi = \left( \frac{\sum_{m_1, m_2 \in \Xi} \sum_{k=0}^{K-1} (C_k(m_1, m_2) - \hat{C}_k(m_1, m_2))^2}{N_{total} K} \right)^{1/2}, \tag{2}$$

где  $C_k(m_1, m_2)$  и  $\hat{C}_k(m_1, m_2)$  – эталонная и оценённая концентрация класса  $k$  в окрестности  $D$  в точке  $m_1, m_2$ , принадлежащей множеству пикселей контрольной выборки  $\Xi$ .

В качестве контрольной выборки на синтезированных изображениях выступали все пиксели, так как маска классов была известна полностью. На реальных изображениях ДЗЗ экспертами были отмечены области с высокой степенью однородности растительного покрова.

Ниже представлены результаты экспериментальной оценки влияния параметров изображений ДЗЗ на качество описанных выше показателей. Данные показатели имеют непосредственный смысл при оценке качества самой экспертизы зарастания пашни, поскольку и концентрация классов, и непосредственно подсчёт количества пикселей, классифицированных в заданный класс по участку, могут быть переведены в целевые показатели, т.е. в оценку процента площади участка, заросшего древесно-кустарниковой растительностью.

#### **Выработка требований к спектральному составу снимков**

Для выработки требований к спектральному составу снимков было произведено экспериментальное исследование на синтезированных изображениях залежных земель ввиду малого количества доступных реальных изображений и желаемого обеспечения статистически более устойчивых оценок.

Имевшиеся в наличии изображения ДЗЗ (перечислены в табл. 1) были представлены в RGB и RGB + NIR спектральных диапазонах. Синтезированные изображения залежей были сформированы с максимальным количеством доступных каналов, т.е. RGB + NIR. Среди представленных в табл. 1 изображений NIR канал присутствовал только в изображениях, полученных при помощи SPOT-7 и Ресурс-П. Так как изображения Ресурс-П имели большее пространственное разрешение, то именно они были использованы для получения параметров распределения яркости исследуемых ЭКР.

Для каждого из классов растительности по примерам участков с высокой степенью однородности растительного покрова были рассчитаны математическое ожидание и корреляционная матрица значений яркости в RGB + NIR каналах, а также средний коэффициент пространственной корреляции пикселей. Затем при помощи спектрального метода по этим параметрам были сформированы стационарные случайные поля [12] с Гауссовым распределением яркости пикселей. Фрагменты данных полей в соответствии с маской классов составляли окончательное тестовое изображение.

Маски классов задавались как 6 квадратных областей фона (200×200 пикселей), расположенных в случайном порядке и соответствующих классам травянистой растительности № 0-2. Области, моделирующие распространение экземпляров древесно-кустарнико-

вой растительности (класс № 3), накладывались поверх фоновых областей случайным образом и представляли собой квадраты размера 5×5 пикселей, что с учётом пространственного разрешения моделируемых снимков соответствует диаметру кроны 4 м. Примеры масок классов использованных синтезированных изображений ДЗЗ приведены на рис. 3.

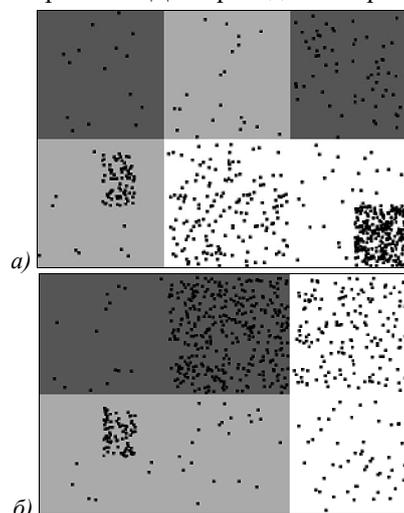


Рис. 3. Примеры масок классов для синтезированных изображений

В итоге было использовано 10 изображений размера 600×400 пикселей с различным пространственным расположением объектов каждого ЭКР, моделирующих яркости целевых классов в RGB + NIR каналах. Каждое модельное изображение имело эталонную разметку на классы и эталонное изображение концентрации классов в пределах окрестности  $D$  размером 25×25 пикселей.

Выбор рекомендуемого спектрального состава изображений ДЗЗ, позволяющего наилучшим образом классифицировать целевые ЭКР, производился путём использования всевозможных комбинаций рассматриваемых спектральных каналов (R, G, B и NIR). То есть из каждого тестового изображения предварительно формировалось изображение, имеющее определённую спектральную конфигурацию, и в качестве признаков суперпикселей на этапе кластеризации рассматривались только средние значения яркости суперпикселя в каждом выбранном спектральном канале.

В качестве значений порога суперпиксельной сегментации использовались значения  $2\epsilon = 10, 15, 20, 25$ , зарекомендовавшие себя как наилучшие по результатам сравнения качества распознавания ЭКР с поэлементной кластеризацией методом k-means [8].

Пользовательская обучающая выборка для каждого из ЭКР включала по одной области размером 15×15, т.е. суммарно составляла 0,3 % пикселей изображения. В обучающую выборку суперпиксели выбирались путём сопоставления пользовательской обучающей выборки с границами суперпиксельной сегментации при значении параметра  $T = 75\%$ . Для расчёта концентрации использовалось окно  $D$ . В экспе-

риментах и при расчёте эталонной концентрации его размер был равен 25×25 пикселей.

Наилучшие из полученных значений показателей качества  $p$  и  $\xi$ , а также соответствующие им удвоенные значения порога сегментации  $\varepsilon$  для каждой группы спектральных каналов приведены в табл. 2. Значения показателей качества рассчитаны как средние по 10 модельным изображениям. Комбинации каналов, обеспечивающие наилучшие параметры качества, выделены в табл. 2 жирным шрифтом.

Табл. 2. Наилучшие значения показателей качества и соответствующие им значения порога суперпиксельной сегментации и спектральные составы исходных изображений

Каналы	$2\varepsilon$	$p$	$\xi$
<b>NIR, R, B</b>	<b>20</b>	<b>1,00</b>	<b>0,01</b>
<b>NIR, G, B</b>	<b>25</b>	<b>1,00</b>	<b>0,01</b>
<b>NIR, R, G, B</b>	<b>25</b>	<b>1,00</b>	<b>0,01</b>
<b>NIR, R</b>	<b>10</b>	<b>1,00</b>	<b>0,01</b>
NIR, G	10	1,00	0,02
NIR, R, G	10	1,00	0,02
NIR, B	20	0,99	0,04
R, B	10	0,97	0,04
R, G, B	15	0,93	0,09
NIR	10	0,87	0,16
G, B	10	0,80	0,22
R, G	10	0,77	0,23
R	10	0,77	0,22
G	20	0,66	0,33
B	10	0,53	0,37

Из табл. 2 видно, что все комбинации спектральных каналов, обеспечивающие наилучшие значения показателей качества, содержат ближний инфракрасный и красный спектральные каналы. Вторым по частоте включения является синий канал, а зелёный канал является менее информативным и присутствует всего в двух комбинациях. При этом для всех удачных комбинаций точность классификации на ЭКР составляет в среднем 1, а СКО оценки концентрации 0,01.

Следует отметить, что полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследований качества классификации деревьев на снимках среднего разрешения в зависимости от спектральных каналов, приведённых в работах [13–14]. Авторы данных работ также отмечают высокую информативность синего, красного и ближнего инфракрасного спектральных каналов.

**Выработка требований к сезону съёмки и пространственному разрешению данных ДЗЗ**

Для исследования различных сезонов съёмки и влияния пространственного разрешения данных ДЗЗ было проанализировано десять снимков участка 1 и девять снимков участка 2 за разные даты.

Для каждого из участков имелись маски ЭКР, составленные по результатам наземных обследований и визуального дешифрования снимков. В разметку ЭКР были включены области с высокой однородностью

растительного покрова, то есть можно считать, что эталонная концентрация классов ЭКР для обеих разметок составляла 95–100 %. На участке 1 было выделено три ЭКР за исключением класса высокой травы, так как полынно-злаковые ассоциации на данном участке отсутствовали. Для участка 2 использовались все четыре ЭКР.

Поскольку тени могут оказывать существенное влияние на качество классификации по снимкам высокого разрешения, были также проведены эксперименты с дополнением масок ЭКР классом теней. Тени рассчитывались с использованием пороговой обработки изображений нормализованного разностного индекса (*Normalized Difference Index, NDI*), для расчёта которого использовалось представление исходного изображения в пространстве *HSV* [15, 16]:

$$NDI = \frac{S - V}{S + V} . \tag{3}$$

Выбор порога осуществлялся вручную путём визуального контроля качества выделяемых на изображении теней.

Примеры масок классов для обоих участков с учётом и без учёта теней приведены на рис. 4 и 5 соответственно. Заметим, что на рис. 4 и 5 неразмеченные области выделены белым цветом, а на рис. 4б и 5б чёрный цвет соответствует теням.

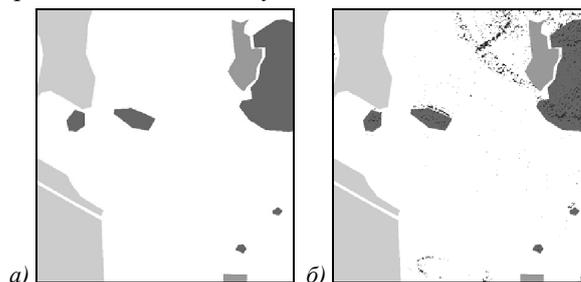


Рис. 4. Примеры масок классов для участка 1: без учёта теней (а), с учётом теней (б)

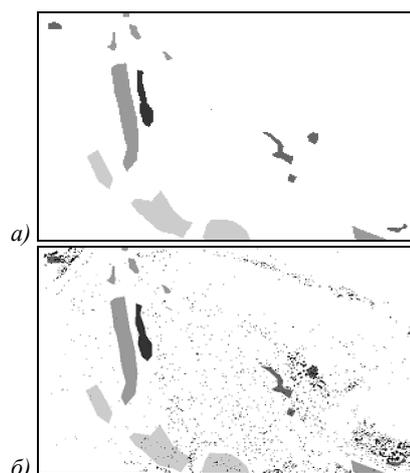


Рис. 5. Примеры масок классов для участка 2: без учёта теней (а), с учётом теней (б)

Пользовательская обучающая выборка включала области малого размера, находящиеся в пределах выделенных масок классов, и составляла не более 5 %

отсчётов изображения для всех ЭКР в сумме. Пример изображений пользовательских обучающих выборок для обоих участков приведён на рис. 6.

Наилучшие для каждой даты снимка и источника данных параметры технологии и оценки показателей качества  $p$  и  $\xi$  для участка 1 и участка 2 приведены в табл. 3 и 4 соответственно.

Из табл. 3 видно, что для участка 1 точность классификации ЭКР выше чем 80% и СКО концентрации классов 0,28 и ниже обеспечивают снимки SPOT-5 и SPOT-7 с разрешением 1,5–2,5 м, а также Ресурс-П с разрешением 0,8 м. При этом для участка 1 в большинстве случаев учёт теней ухудшает качество классификации. Предпочтительным сезоном съёмки является осень, поскольку для изображений, полученных в данный период, среднее значение качества оценки ЭКР выше, чем для весенних и летних снимков, и составляет 0,77 при СКО концентрации 0,25.

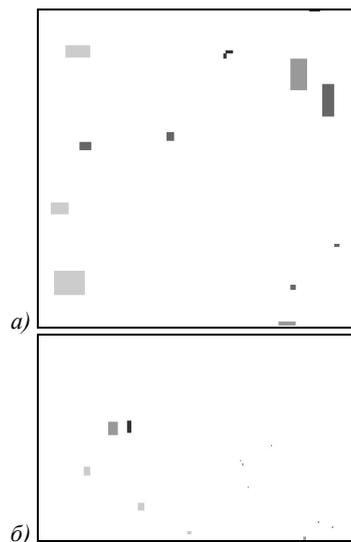


Рис. 6. Примеры пользовательских обучающих выборок

Табл. 3. Лучшие значения показателей качества, полученные по снимку 1, и соответствующие им даты съёмки и пространственные разрешения

Дата	Источник снимка, разрешение	Спектральные каналы	2ε	Учёт теней	Точность	СКО концентрации
<b>20.09.2012</b>	<b>Spot-5, 2,5 м</b>	<b>R, B</b>	<b>25</b>	<b>нет</b>	<b>0,80</b>	<b>0,28</b>
28.05.2014	Google Earth, 0,4 м	R, G, B	15	нет	0,68	0,28
01.06.2014	Google Earth, 0,4 м	R, G, B	15	да	0,74	0,23
02.06.2014	Google Earth, 0,4 м	R, B	10	нет	0,63	0,28
28.08.2015	Google Earth, 0,4 м	R, G	20	нет	0,67	0,30
22.10.2015	Google Earth, 0,4 м	R, B	20	да	0,69	0,22
<b>02.06.2016</b>	<b>Spot-7, 1,5 м</b>	<b>R, G, B</b>	<b>15</b>	<b>нет</b>	<b>0,91</b>	<b>0,29</b>
<b>23.09.2016</b>	<b>Ресурс-П, 0,8 м</b>	<b>R, B, NIR</b>	<b>20</b>	<b>нет</b>	<b>0,85</b>	<b>0,26</b>
31.08.2016	Ресурс-П, 0,8 м	B, G, NIR	25	нет	0,62	0,28

Табл. 4. Лучшие значения показателей качества, полученные по снимку 2, и соответствующие им даты съёмки и пространственные разрешения

Дата	Источник снимка, разрешение	Спектральные каналы	2ε	Учёт теней	Точность	СКО концентрации
28.07.2010	Google Earth, 0,4 м	R, B	20	нет	0,56	0,18
28.05.2014	Google Earth, 0,4 м	R, G, B	20	нет	0,38	0,19
01.06.2014	Google Earth, 0,4 м	R, B	10	нет	0,53	0,20
02.06.2014	Google Earth, 0,4 м	R, G, B	25	нет	0,59	0,19
28.08.2015	Google Earth, 0,4 м	R, B	25	нет	0,44	0,22
22.10.2015	Google Earth, 0,4 м	R, B	15	нет	0,62	0,18
<b>16.04.2016</b>	<b>Ресурс-П, 0,8 м</b>	<b>R, B, NIR</b>	<b>20</b>	<b>нет</b>	<b>0,75</b>	<b>0,16</b>
<b>31.08.2016</b>	<b>Ресурс-П, 0,8 м</b>	<b>R, B, NIR</b>	<b>20</b>	<b>да</b>	<b>0,76</b>	<b>0,18</b>
<b>23.09.2016</b>	<b>Ресурс-П, 0,8 м</b>	<b>R, NIR</b>	<b>20</b>	<b>да</b>	<b>0,83</b>	<b>0,22</b>

Для участка 2 точность классификации более 80% была получена только для снимка Ресурс-П, соответствующего осеннему периоду (дополнительный класс – тени учитывался). Источником двух других снимков, для которых точность классификации ЭКР составила более 75%, также является Ресурс-П. Для участка 2 оказалось более существенным влияние NIR-канала в составе снимка, так как все полученные наилучшие комбинации содержат NIR-канал. Не-

смотря на более высокое пространственное разрешение фрагментов снимков, полученных с ресурса Google Earth, качество полученных по ним оценок оказалось значительно ниже. Таким образом, для участка 2 необходимость наличия измерений в NIR-канале преобладает над необходимостью в высоком пространственном разрешении. Предпочтительным временем съёмки для участка 2 также является осенний период по сравнению с другими периодами

съёмки (весна и лето), поскольку по снимкам данного периода была получена наивысшая средняя точность классификации ЭКР (0,79) и СКО концентрации (0,2).

Из результатов, полученных по двум участкам, видно, что в качестве предпочтительного периода съёмки следует выбирать осень, а именно вторую половину сентября. Такой результат обусловлен тем, что в осенний период различия в прохождении фаз вегетации травянистыми степными и рудеральными, а также древесными и кустарниковыми растениями выражены в резком контрасте ослабления зелёной окраски травянистым ярусом, завершающим сезонное развитие. На этом фоне свойственная периоду вегетации окраска листьев древесных растений сохраняется в большей степени, что особенно характерно для древесных интродуцентов (вяз мелколистный, лох узколистный).

Другие характеристики снимков, при которых были получены наиболее точные результаты для участка 1 и участка 2, отличаются.

Преимущество использования снимков участка 1 с разрешением от 1,5 м до 2,5 м по сравнению с использованием снимков более высокого пространственного разрешения заключается в том, что концентрация отдельно стоящих кустарников и деревьев на них является низкой, а высота мала (до 3 м). В итоге рассматриваемые массивы древесно-кустарниковой растительности для участка 1 могут быть классифицированы с большей пространственной однородностью по снимкам с меньшим пространственным разрешением, а ввиду малых отбрасываемых теней от объектов и их малой площади во всех случаях предпочтительна классификация без учёта теней.

Для снимков участка 2 наблюдается обратная ситуация, так как высота и количество отдельно стоящих экземпляров деревьев и кустарников значительно выше.

Различия в предпочтительном спектральном составе снимков участков 1 и 2 объясняются различным составом классов.

На участке 2 присутствует класс высокой травы (польнь), для устойчивой оценки которого по отношению к другим классам травянистой растительности необходим учёт различия в биомассе, который наиболее явно проявляется для пары каналов NIR + R. Тогда как учёт синего спектрального канала позволяет в паре с красным наиболее качественно разделить классы древесной растительности на фоне классов травянистой растительности. Заметим, что единственное удачное сочетание каналов без учёта синей части спектра – это NIR+R для участка 2, но оно использовано в сочетании с дополнительным классом теней на изображении.

Лучшие результаты классификации ЭКР и исходные изображения для участков 1 и 2 представлены на рис. 7 и 8 соответственно.

Результаты проведённых экспериментальных исследований можно обобщить следующим образом. Для экспертизы зарастания пашни древесно-кустарниковой растительностью необходимо использовать данные ДЗЗ следующей конфигурации:

- спектральный состав данных ДЗЗ должен включать красный, ближний инфракрасный и синий спектральные каналы;
- рекомендуемое пространственное разрешение для участков с низкорослыми редкими кустарниками составляет 1,5–2,5 м и учёт класса теней в качестве дополнительного не требуется;
- рекомендуемое пространственное разрешение для участков с большой концентрацией отдельно стоящих высоких деревьев и кустарников – 0,8 м, учёт класса теней в качестве дополнительного требуется в случае использования пары спектральных каналов NIR + R;
- благоприятный период съёмки – вторая половина сентября.

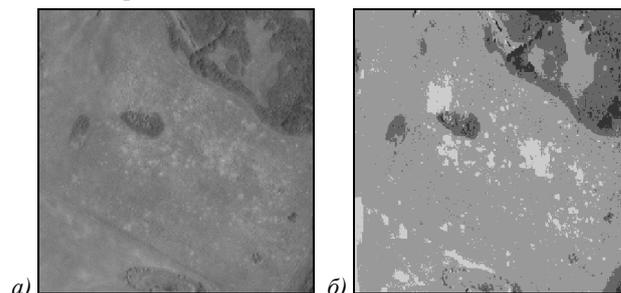


Рис. 7. Изображения участка 1: снимок от 02.06.2016 SPOT-7 (а), результат классификации на ЭКР (б)

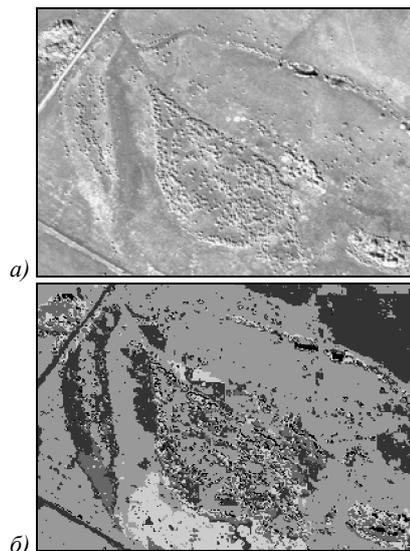


Рис. 8. Изображения участка 2: снимок от 23.09.2016, Ресурс-П (Геотон) (а), результат классификации на ЭКР (б)

### Заключение

В статье на примере авторской технологии анализа растительных сообществ по мультиспектральным данным ДЗЗ рассмотрено влияние различных характеристик снимков на результаты оценки зарастания пахотных земель древесно-кустарниковой растительностью. Исследование производилось с применением синтезированных и реальных мультиспектральных данных ДЗЗ целевых классов растительности, характеризующих растительное сообщество неиспользуемой пашни в Самарской области. Было выявлено, что

для определения древесно-кустарниковой растительности эффективно использование данных ДЗЗ за осенний период, а именно за вторую половину сентября. Требуемый спектральный состав снимков для анализа древесно-кустарниковой растительности на фоне травянистых растительных сообществ включает красный и синий спектральные каналы, а для разделения на классы различных травянистых растительных сообществ необходим учёт ближнего инфракрасного спектрального канала. Данные ДЗЗ с пространственным разрешением от 1,5 м до 2,5 м могут быть использованы для классификации сплошных древесно-кустарниковых массивов, но не позволяют выделить отдельно стоящие экземпляры деревьев. Для классификации высоких отдельно стоящих деревьев и кустарников (с высотой порядка 8 м) могут быть использованы изображения с пространственным разрешением 0,8 м. Однако дальнейшее увеличение пространственного разрешения не повышает качества классификации. Наивысшая достигнутая с помощью использованной технологии точность определения элементарных классов растительности для исследуемых участков залежей составила 90 % и 83 %, что показывает высокий потенциал применённой технологии при проведении рассматриваемого вида экспертизы пахотных земель.

#### Благодарности

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ № 16-29-09494 офи м, № 19-37-90116 Аспиранты, а также Министерства науки и высшего образования РФ в рамках выполнения работ по Государственному заданию ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН (соглашение № 007-ГЗ/Ч3363/26).

#### Литература

1. Постановление Правительства РФ от 23.04.2012 № 369 [Электронный ресурс]. – URL: <http://base.garant.ru/70167784/> (дата обращения 11.05.2019).
2. **Жаворонков, Ю.М.** Судебная дендрохронология / Ю.М. Жаворонков, А.Б. Чхобадзе // Экспертная практика. – 2008. – № 64.
3. **Матвеева, Е.Ю.** Залежь как приём восстановления стабильности агроэкосистем / Е.Ю. Матвеева // Аграрный вестник Урала. – 2009. – № 4. – С. 61-63.
4. **Yu, Q.** Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery / Q. Yu, P. Gong, N. Clinton, G. Biging, M. Kelly, D. Schirokauer // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2006. – Vol. 72, Issue 7. – P. 799-811.
5. **Carleer, A.P.** Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations / A.P. Carleer, O. Debeir, E. Wolff // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2005. – Vol. 71, Issue 11. – P. 1285-1294.
6. **Mathieu, R.** Mapping private gardens in urban areas using object-oriented techniques and very high-resolution satellite imagery / R. Mathieu, C. Freeman, J. Aryal // Landscape and Urban Planning. – 2007. – Vol. 81, Issue 3. – P. 179-192.
7. **Næsset, E.** Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve / E. Næsset, T. Økland // Remote Sensing of Environment. – 2002. – Vol. 79, Issue 1. – P. 105-115.
8. **Варламова А.А.** Информационная технология обработки данных ДЗЗ для оценки ареалов растений / А.А. Варламова, А.Ю. Денисова, В.В. Сергеев // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 5. – С. 864-876. – DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-864-876.
9. ScanEx Image Processor® [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.scanex.ru/software/obrabotka-izobrazheniy/scanex-image-processor/> (дата обращения: 12.07.2019).
10. Google Earth [Электронный ресурс]. URL: <https://www.google.com/intl/ru/earth/> (дата обращения: 12.07.2019).
11. **Alsabti, K.** An efficient k-means clustering algorithm / K. Alsabti, S. Ranka, V. Singh // Electrical Engineering and Computer Science. – 1997. – Vol. 43.
12. **Soifer, V.A.** Computer image processing, part II: Methods and algorithms / V.A. Soifer, M.V. Gashnikov, N.I. Glumov, N.Yu. Ilyasova, V.V. Myasnikov, S.B. Popov, V.V. Sergeev, A.G. Khramov, A.V. Chernov, M.A. Chicheva, V.A. Fursov. – Saarbrücken, Germany: VDM Verlag, 2010. – 584 p. – ISBN: 978-3-639-17545-5.
13. **Denisova, A.Y.** Tree species classification for clarification of forest inventory data using Sentinel-2 images / A.Y. Denisova, L.M. Kavelenova, E.S. Korchikov, N.V. Prokhorova, D.A. Terentyeva, V.A. Fedoseev // Proceedings of SPIE. – 2019. – Vol. 11174. – 1117408. – DOI: 10.1117/12.2531805.
14. **Zharko, V.O.** Forest tree species recognizability assessment based on satellite data on their spectral reflectance seasonal changes / V.O. Zharko, S.A. Bartalev // Current problems in remote sensing of the Earth from space. – 2014. – Vol. 11, Issue 3. – P. 159-170.
15. **Singh, K.K.** Shadow detection and removal from remote sensing images using NDI and morphological operators / K.K. Singh, K. Pal, M.J. Nigam // International journal of computer applications. – 2012. – Vol. 42, Issue 10. – P. 37-40.
16. **Hussain, Z.M.** Shadow detection and removal in video sequence using color-based method / Z.M. Hussain, A.A. Jebur // Journal of Kerbala University. – 2013. – Vol. 11, Issue 4. – P. 239-257.

#### Сведения об авторах

**Денисова Анна Юрьевна**, 1988 года рождения, в 2011 году окончила Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (ныне Самарский университет) по специальности «Прикладная математика и информатика». В 2014 году защитила диссертацию на соискание степени кандидата технических наук. Работает доцентом кафедры геоинформатики и информационной безопасности (Самарский университет). Область научных интересов: обработка изображений, геоинформационные системы. E-mail: [denisova\\_ay@geosamara.ru](mailto:denisova_ay@geosamara.ru).

**Егорова Анна Александровна**, 1995 года рождения, в 2017 году окончила Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет) с отличием по специальности «Информационная безопасность автоматизированных систем». В настоящее время является аспирантом Самарского университета. Основные сферы научных интересов: обработка изображений, обнаружение изображений на цифровых изображениях, защита информации. E-mail: [varlamova.anna.95@mail.ru](mailto:varlamova.anna.95@mail.ru).

**Сергеев Владислав Викторович**, 1951 года рождения, в 1974 году окончил Куйбышевский авиационный институт, в 1993 году защитил диссертацию на соискание степени доктора технических наук. Основное место работы – заведующий кафедрой геоинформатики и информационной безопасности Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва (Самарский университет). По совместительству работает заведующим лабораторией математических методов обработки изображений в ИСОИ РАН – филиале ФНИЦ «Кристаллография и фотоника» РАН. Круг научных интересов: цифровая обработка сигналов, анализ изображений, распознавание образов, геоинформатика. E-mail: [vserg@geosamara.ru](mailto:vserg@geosamara.ru).

**Кавеленова Людмила Михайловна**, 1958 года рождения, в 1981 году окончила Куйбышевский государственный университет, в 2004 году защитила диссертацию на соискание степени доктора биологических наук. Основное место работы – заведующий кафедрой экологии, ботаники и охраны природы Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва (Самарский университет). По совместительству работает заведующим лабораторией физиологии растений и зимостойкости в ГБУ СО НИИ «Жигулевские сады». Круг научных интересов: биоиндикация, экологическая физиология растений, сохранение фиторазнообразия. E-mail: [lkavelenova@mail.ru](mailto:lkavelenova@mail.ru).

ГРНТИ: 28.21.15, 28.17.19, 89.57.35, 89.57.45.

Поступила в редакцию 15 августа 2019 г. Окончательный вариант – 11 сентября 2019 г.

## Requirements for multispectral remote sensing data used for the detection of arable land colonization by tree and shrubbery vegetation

A.Y. Denisova<sup>1</sup>, A.A. Egorova<sup>1</sup>, V.V. Sergeyev<sup>1,2</sup>, L.M. Kavelenova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Samara National Research University, 443086, Samara, Russia, Moskovskoye Shosse 34,

<sup>2</sup> IPSI RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS, 443001, Samara, Russia, Molodogvardeyskaya 151

### Abstract

We discuss requirements for the multispectral remote sensing (RS) data utilized in the author's technique for estimating plant species concentration to detect arable land colonization by tree and shrubbery vegetation. The study is carried out using available high-resolution remote sensing data of two arable land plots. The paper considers the influence of resolution, combinations of spectral channels of RS data, as well as the season RS data is acquired on the quality of identification of elementary vegetation classes that form the basis of the plant community – a fallow land. A fallow land represents a piece of arable land that has not been cultivated for a long time. The study was conducted using a technology that is based on image superpixel segmentation. We found out that for determining tree and shrub vegetation, it is preferable to use RS data acquired in autumn, namely, in late September. The combination of red and blue spectral channels turned out to be the best for the analysis of tree-shrub vegetation against the background of grassy plant communities, and the presence of a near-infrared channel is necessary to range the various grassy plant communities in different classes. RS data with a spatial resolution of 2.5 m can be used to define tree-shrub plant communities with a high closeness of crowns (90 % or more), but cannot be used to classify isolated trees. Trees and shrubs (with a height of 8 m) can be classified in images with a spatial resolution of 0.8 m. An increase in spatial resolution does not improve the quality of the classification. The highest accuracies achieved for the land areas studied are 90 % and 83 %. Therefore, the suggested technology can be used in arable land expertise.

**Keywords:** arable land, fallow land, multispectral remote sensing data, shooting season, spatial resolution, spectral channel, superpixel, vegetation class.

**Citation:** Denisova AY, Egorova AA, Sergeyev VV, Kavelenova LM. Requirements for multispectral remote sensing data used for the detection of arable land colonization by tree and shrubbery vegetation. *Computer Optics* 2019; 43(5): 846-856. DOI: 10.18287/2412-6179-2019-43-5-846-856.

**Acknowledgements:** The work was supported by the RFBR grants #16-29-09494, #19-37-90116 and the Russian Federation Ministry of Science and Higher Education within a state contract with the "Crystallography and Photonics" Research Center of the RAS under agreement 007-Г3/Ч3363/26.

### References

- [1] RF Government Resolution No. 369 of April 23, 2012. Source: (<http://base.garant.ru/70167784/>).
- [2] Zhavoronkov YM, Chkhobadze AB. Judicial dendrochronology [In Russian]. *Ekspertnaya praktika* 2008; 64.
- [3] Matveeva EY. Deposit as a way to restore the stability of agroecosystems [In Russian]. *Agrarnyj vestnik Urala* 2009; 4: 61-63.
- [4] Yu Q, Gong P, Clinton N. Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 2006; 72(7): 799-811.
- [5] Carleer AP, Debeir O, Wolff E. Assessment of very high spatial resolution satellite image segmentations. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 2005; 71(11): 1285-1294.
- [6] Mathieu R, Freeman C, Aryal J. Mapping private gardens in urban areas using object-oriented techniques and very high-resolution satellite imagery. *Landscape and Urban Planning* 2007; 81(3): 179-192.
- [7] Næsset E, Økland T. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment* 2002; 79(1): 105-115.
- [8] Varlamova AA, Denisova AY, Sergeyev VV. Earth remote sensing data processing technology for obtaining vegetation types maps. *Computer Optics* 2018; 42(5): 864-876. DOI: 10.18287/2412-6179-2018-42-5-864-876.
- [9] ScanEx Image Processor®. Source: (<http://www.scanex.ru/software/obrabotka-izobrazheniy/scanex-image-processor/>).
- [10] Google Earth. Source: (<https://www.google.com/intl/ru/earth/>).
- [11] Alsabti K, Ranka S, Singh V. An efficient k-means clustering algorithm. *Electrical Engineering and Computer Science* 1997; 43.
- [12] Soifer VA, ed. *Computer image processing, part II: Methods and algorithms*. Saarbrücken, Germany: VDM Verlag; 2010. ISBN: 978-3-639-17545-5.
- [13] Denisova AY, Kavelenova LM, Korchikov ES, Prokhorova NV, Terentyeva DA, Fedoseev VA. Tree species classification for clarification of forest inventory data using Sentinel-2 images. *Proc SPIE* 2019; 11174: 1117408. DOI: 10.1117/12.2531805.
- [14] Zharko VO, Bartalev SA. Forest tree species recognizability assessment based on satellite data on their spectral reflectance seasonal changes [In Russian]. *Current Problems in Remote Sensing of the Earth from space* 2014; 11(3): 159-170.
- [15] Singh KK, Pal K, Nigam MJ. Shadow detection and removal from remote sensing images using NDI and morphological operators. *Int J Comput Appl* 2012; 42(10): 37-40.
- [16] Hussain ZM, Jebur AA. Shadow detection and removal in video sequence using color-based method. *J Kerbala Univ* 2013; 11(4): 239-257.

### Author's information

**Anna Yurievna Denisova** (b. 1988) graduated from Samara National Research University (Samara University) in 2011 as Master of Mathematics and Computer Science. She received a degree of Candidate in Technical Sciences in 2014. Now works at Samara University. The area of research interest includes image processing and geoinformational systems. E-mail: [denisova\\_ay@geosamara.ru](mailto:denisova_ay@geosamara.ru).

**Anna Aleksandrovna Egorova** (b. 1995) graduated with honors from Samara National Research University (Samara University) majoring in Information Security of Computer-Aided Systems in 2017. Nowadays she is a postgraduate at Samara National Research University. Main research interests: image processing, digital image forgery detection and information security. E-mail: [varlamova.anna.95@mail.ru](mailto:varlamova.anna.95@mail.ru).

**Vladislav Victorovich Sergeyev** (1951 b.) graduated from Kuibyshev Aviation Institute in 1974 (presently, Samara National Research University, short – Samara University). He received his PhD in Technical Sciences (1978) and DrSc degree in Applied Mathematics and Physics (1993). At present he is a head Geoinformation Science and Information Security sub-department in Samara University and holding a part-time position as the head of laboratory at the Image Processing Systems Institute of RAS – Branch of the FSRC “Crystallography and Photonics” RAS. The area of interests includes digital signals and image processing, geoinformatics and pattern recognition. E-mail: [vserg@geosamara.ru](mailto:vserg@geosamara.ru).

**Lyudmila Mikhailovna Kavelenova** (1958 b.), graduated from Kuibyshev State University. She received her PhD in Biological Sciences (1990) and DrSc degree in Biological Sciences (2004). At present, she is a head of Ecology, Botany and Nature Preservation chair in Samara University and holding a part-time position as the head of laboratory at the Zhigulevsky Sady Scientific Research Institute. The area of interests includes bioindication, ecological physiology of plants, and conservation of phytodiversity. E-mail: [lkavelenova@mail.ru](mailto:lkavelenova@mail.ru).

*Received August 15, 2019. The final version – September 11, 2019.*