

DOI: 10.25637/TVAN2018.04.02.

УДК 631.6:556.1:528.8

Дунаева Е. А.¹, Ёлкина Е. С.², Барталёв С. А.², Плотников Д. Е.², Вечерков В. В.¹,
Головастова Е. С.¹

ОСОБЕННОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОСЕВОВ ОЗИМЫХ ЗЕРНОВЫХ СРЕДСТВАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

¹ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»;

²ФГБУН «Институт космических исследований РАН»

Реферат. Цель исследования – проведение анализа и оценка методов раннего распознавания озимых культур по спутниковым данным среднего и высокого пространственного разрешения, а также разработка методики получения региональных карт озимых культур с использованием сервиса спутникового мониторинга «ВЕГА» (sci-vega.ru). Выполненные исследования позволили создать методику и оценить возможности комплексирования данных ДЗЗ (дистанционного зондирования Земли) среднего (MODIS) и высокого (Landsat 8, Sentinel-2, Sentinel-1) пространственного разрешения в среде сервиса «ВЕГА» для оценки состояния озимых культур 2017–2018 гг. на примере двух районов Крыма. Предлагаемый подход идентификации озимых культур, основанный на интерактивной кластеризации временной серии спутниковых изображений с использованием опорных данных и с учетом связи биофизических показателей и дистанционных измерений, проверен с помощью выборочных полевых обследований. Общая точность новых региональных карт озимых культур составила для Красногвардейского района – 92 %, для Белогорского – 89 %. Использование предложенного метода позволило существенно уточнить карты озимых культур для указанных районов по сравнению с построенными по данным среднего разрешения MODIS и доступными в «ВЕГЕ» картами, а также установить природу ошибок идентификации, что в дальнейшем позволит корректировать карты озимых культур для всего Крыма. Полученные по результатам исследований разработки войдут в систему спутникового мониторинга крымского региона и будут доступны широкому кругу пользователей сервиса «ВЕГА».

Ключевые слова: спутниковый мониторинг, сервис «ВЕГА», озимые культуры, Республика Крым.

Введение

Ввиду существенного снижения водообеспеченности Крымского полуострова выращивание озимых культур и мониторинг их состояния становится стратегической основой устойчивого развития сельских территорий региона. Использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для идентификации сельскохозяйственных культур, определения площадей их возделывания, мониторинга хода развития и состояния, а также для оценки факторов, влияющих на биопродуктивность посевов, является актуальным для устойчивого сельского хозяйства на территории полуострова, позволяя снижать затраты на сбор необходимой информации, повышать ее достоверность, объективность и оперативность получения. Работа направлена на исследование возможностей и поиск эффективных путей получения информативных дистанционных характеристик культур, удовлетворяющих требованиям задач мониторинга сельскохозяйственного производства.

Значительный потенциал использования данных дистанционного зондирования со спутников для мониторинга сельскохозяйственных земель к настоящему времени продемонстрирован результатами ряда исследований [1–3].

Актуальными в исследовании посевов из космоса являются задачи идентификации культур [3], оценки биомассы растений, оценки состояния (степени угнетенности) посевов, оценки воздействия неблагоприятных факторов, прогнозирования урожайности [4–8]. К особенностям идентификации озимых культур можно, прежде всего, отнести появление их всходов в осенний период и ускоренный рост перезимовавших растений ранней весной. Такое сезонное развитие посевов напрямую влияет на интенсивное изменение спектрального отклика во времени в оптическом диапазоне [9, 10], что обеспечивает возможность классификации культур с помощью повторяемой спутниковой съемки.

Анализ состояния посевов на протяжении вегетационного сезона во многом основан на применении серий временных срезов их спектральных характеристик, например, значений вегетационных индексов [3].

На основе анализа сезонной динамики NDVI (по разности максимальных и средних выборочных значений вегетационного индекса на конкретные сроки), кроме основных этапов роста посевов, удается оценивать влияние сроков сева и условий перезимовки на их развитие [11].

Проведенные ранее исследования [12, 13] показали перспективы использования спутникового сервиса «ВЕГА» для мониторинга сельскохозяйственных посевов Крымского полуострова и определения состояния культур в динамике. Оценка точности получаемых карт в масштабе регионов [14] показывает, что данные карты в среднем демонстрируют высокую точность для значимых в сельскохозяйственном отношении регионов Южного, Центрального и Приволжского федерального округов.

При этом существующий метод получения региональных карт по данным MODIS, реализованный в сервисе «ВЕГА», имеет ряд ограничений – в частности, он ограниченно применим к регионам с невысокими среднегодовыми значениями посевной площади озимых и с небольшими размерами полей, также его особенности вызваны задействованием в технологии построения актуальных карт используемых пахотных земель России, точность которых также варьирует для различных регионов страны [15]. Исследование достоверности распознавания озимых культур в регионах с низким уровнем осадков [14, 16] указывает на достаточно высокую вероятность их совпадения с участками сухих степей, обладающих схожей фенологической динамикой после выпадения осадков в осенне-зимний или весенне-летний период [17]. Таким образом, некоторые регионы страны нуждаются в построении более точных карт озимых культур, в частности, Республика Крым [13]. Данная задача может быть решена с помощью использования временных серий спутниковых данных высокого разрешения. Предлагаемые в данной работе подходы по оценке состояния посевов озимых культур на территории тестовых участков полуострова Крым представляются перспективными в рамках построения системы мониторинга посевов на территории всей республики, а также в целях развития отечественного геоинформационного сервиса спутникового мониторинга растительности «ВЕГА».

Для проверки разрабатываемого метода отобраны репрезентативные участки в Красногвардейском (степная зона Крыма, среднегодовое количество осадков – 439 мм) и Белогорском районах (предгорная зона, расчлененный рельеф, среднегодовое количество осадков – 528 мм). Данные территории отражают структуру землепользования, характерную для степной и предгорной зон Крыма.

Цель исследований – анализ и оценка особенностей методов распознавания озимых по спутниковым данным среднего и высокого пространственного разрешения, и разработка методики получения карт в сервисе «ВЕГА» с более высокой точностью идентификации культур.

Материалы и методы исследований

Характерные для посевов озимых культур фенологические особенности развития, позволяющие отделять их от остальных культур, служат основой разработки методов их выявления по данным ДЗЗ. Для создания методики распознавания озимых культур по изображениям высокого разрешения использован архив данных ДЗЗ, доступный онлайн в сервисе «ВЕГА», встроенные инструменты подготовки и обработки данных, а также готовые геоинформационные продукты – карты растительного покрова, пахотных земель и озимых культур, регулярно обновляемые для территории России. Данные карты открывают потенциальную возможность их применения в качестве опорных/обучающих для классификатора [18], что позволяет использовать преимущества данных дистанционного зондирования различного пространственного и временного разрешения.

В основе предлагаемого метода получения региональных карт озимых культур лежит использование временных серий оптических и радиолокационных спутниковых данных высокого пространственного разрешения для классификации без обучения (кластеризации) с последующим экспертным решением о присвоении соответствующего класса к кластеру по опорным данным. Схема алгоритма работы метода приведена на рисунке 1 и состоит из трёх этапов: подготовительного (1), этапа классификации с целью маскирования садов, иной древесной растительности и трав (2) и этапа распознавания озимых (3) [19].

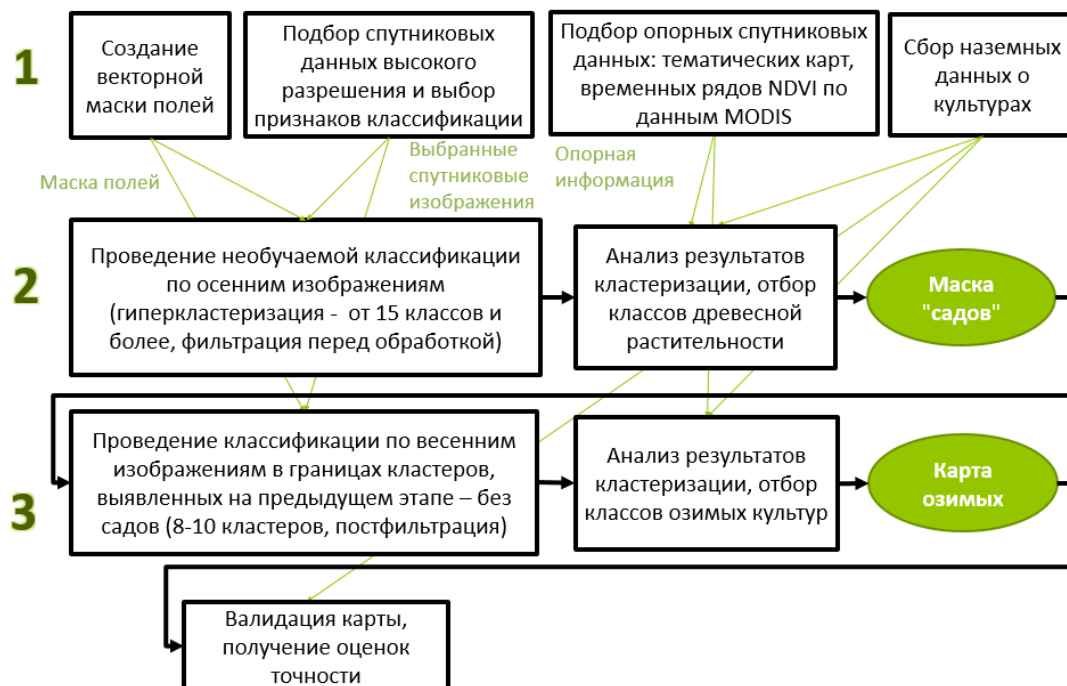


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритма работы метода для распознавания озимых культур по данным ДЗЗ интерактивными инструментами сервиса «ВЕГА»

Подготовительные работы включали в себя следующие этапы:

1. Сбор наземной информации и создание векторных границ полей.

В качестве наземной информации использовали данные структуры сельскохозяйственных посевов ФГБУН «НИИСХ Крыма» за период 2016–2018 гг., а также картографические и табличные данные, предоставленные Красногвардейской райгосадминистрацией за 2017–2018 гг. Наземные данные включали сведения о расположении посевов озимых зерновых (культура, сроки сева и уборки,

фенологические фазы), яровых культур (сроки сева и уборки), многолетних насаждений, границы населенных пунктов. Наличие данной информации необходимо для выбора сцен для классификации и идентификации озимых культур по индексу NDVI, исключения многолетних культур и насаждений.

2. Подбор спутниковых данных и выбор признаков классификации.

Правила выбора спутниковых данных определяются их способностью к описанию сезонной фенологии растений. Для выбора наиболее информативных снимков определяются периоды максимального различия развития озимых с иными культурами с помощью анализа динамики временных рядов «эталонов» типов растительности, доступных в сервисе «ВЕГА». Под эталонами понимаются временные ряды вегетационного индекса NDVI для различных типов растительности, построенные по маскам тематических карт, усредненные и сглаженные для каждого района. Наличие наземной информации о сроках сева и уборки культур позволило корректнее определить интервал выбора спутниковых изображений. Для проведения предварительной классификации с целью маскирования садов, залежей, многолетних трав, которые можно спутать с озимыми культурами весной, подбираются осенние сцены года сева озимых культур года (в данном эксперименте – конец сентября – начало ноября, рисунок 2). На этом этапе использованы данные радара с синтезированной аппаратурой (РСА), позволившие дополнить недостающий ряд безоблачных оптических данных и увеличить точность распознавания древесно-кустарниковой растительности (садов). Максимальная делимость древесной растительности (леса, садов), травянистой растительности и убранных/без всходов полей наблюдается с 36 (10 сентября) недели по 43 (29 октября).

Набор снимков, полученных в осенний период, для классификации Белогорского района: сцены SENTINEL-2 в красном и инфракрасном канале (ИК) от 14.09.2018 и 04.10.2018, сцены SENTINEL-1 в поляризации vv и vh от 02.10.2017, 20.10.2017 и 26.10.2017 гг. Набор сцен периода осенней вегетации культур для классификации для Красногвардейского района: сцены SENTINEL-2 в красном и ИК канале от 14.09.2018 и 04.10.2018, сцены SENTINEL-B в поляризации vv и vh от 19.09.2017, 01.10.2017 и 19.10.2017 гг. Радарные данные подобраны с учетом погодных условий.

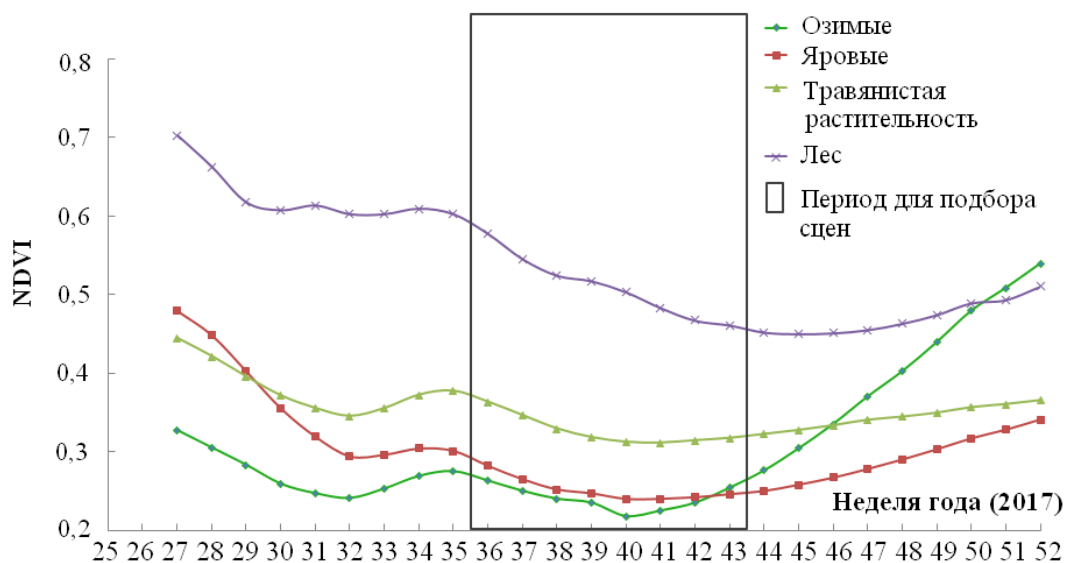


Рисунок 2 – Оптимальный временной интервал спутниковой съёмки, подходящий для решения задачи для Красногвардейского района, осень 2017

Для итоговой классификации (раннего распознавания озимых) использовали сцены конца марта–начала мая (рисунок 3): сцены SENTINEL-2A в красном и ИК канале от 07.04.2018 и 22.04.2018 для обоих районов. Использованные для классификации спутниковые изображения прошли этапы радиометрической калибровки и атмосферной коррекции. Для подавления спекл-шума на радарных изображениях и генерализации результатов классификации использованы возможности фильтрации изображений.

Максимум NDVI для озимых культур был достигнут на 15 неделе (15 апреля 2018), что примерно соответствует фазе колошения озимой пшеницы.

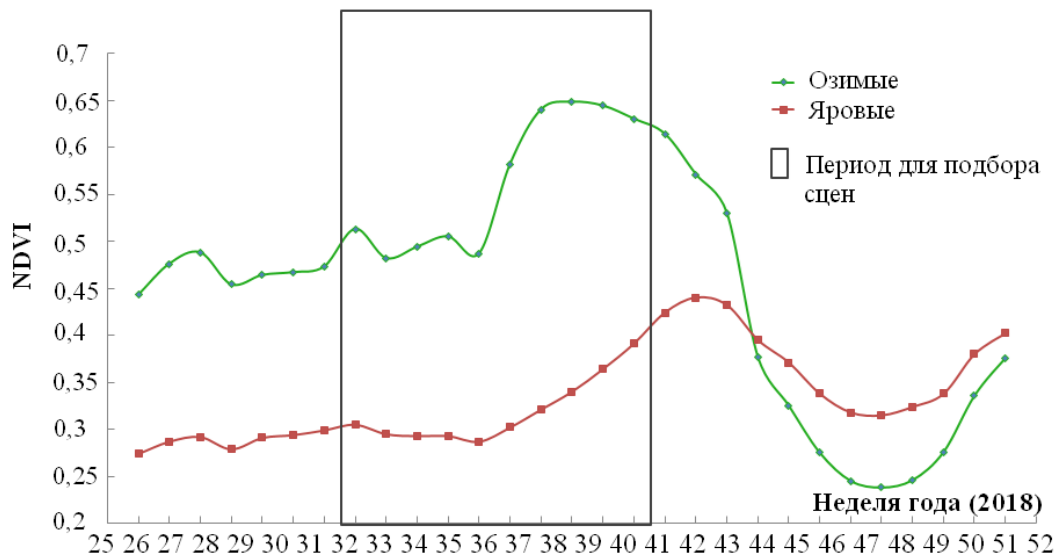


Рисунок 3 – Определение периода выбора спутниковых изображений для Красногвардейского района, весна 2018. Максимальная разделимость яровых культур и озимых культур наблюдается с 8 недели (4 марта) по 17 (29 апреля)

3. Подбор опорных спутниковых данных для территории исследования в сервисе «ВЕГА» представляет собой выбор тематических карт, упрощающих принятие решение экспертом об отнесении объекта к выделяемым кластерам. К таким данным, дающим априорную информацию о расположении озимых, относятся карты растительности, карты озимых культур по данным MODIS, регулярно и автоматически создаваемые в ИКИ РАН, временные ряды NDVI для полей и «эталонные» культуры для района.

Подготовленные данные подаются на вход классификатора без обучения. В работе использована кластеризация на основе метода k-средних, с заданием количества кластеров заведомо большим, чем требуется (гиперкластеризация), для последующего уточнения и объединения в два кластера: озимых и иных культур. Кластеризация проводится в векторных границах полей области исследования. Результат кластеризации подвергается экспертному анализу. Для анализа – определения принадлежности кластера к классу озимых и создания итоговой карты используются имеющиеся наземные данные, а также опорные спутниковые данные, доступные в сервисе «ВЕГА».

В результате формируется маска озимых культур района высокого пространственного разрешения (рисунок 4).

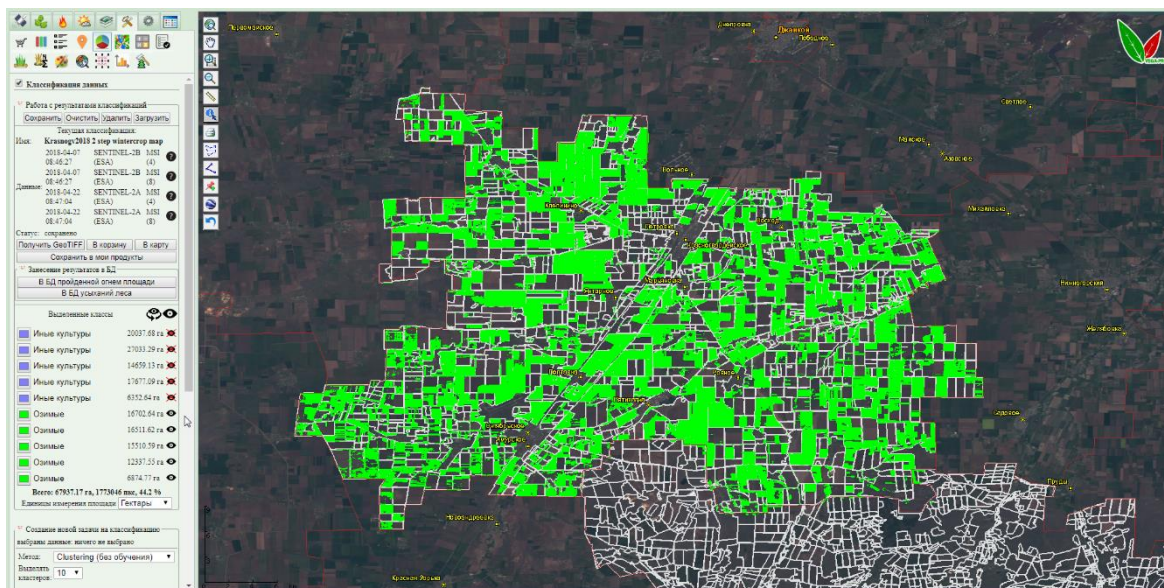


Рисунок 4 – Результат классификации (маска озимых культур (зелёный) для Красногвардейского района) в интерфейсе сервиса «ВЕГА»

Для оценок точности карты проводили выборочную верификацию и валидацию с помощью наземных данных, подробнее описанных в следующем разделе статьи.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенного исследования сформирована База данных структуры землепользования по Красногвардейскому и Белогорскому районам, включая информацию о структуре посевных площадей для пилот-территорий. Набор векторных покрытий для территории исследований сформирован в ПО QGIS 2.18 в формате *.shp. Каждому объекту присвоен уникальный идентификатор и дан тип использования земель: пахотные, непахотные, населенные пункты.

Границы полей (выделялись по данным высокого разрешения) позволили исключить непахотные земли из классификации, а наземные данные о культурах – провести валидацию карт (таблица 1).

Таблица 1 – Описание объекта исследований и наличие наземных данных для верификации

Характеристика района	Район	
	Красногвардейский	Белогорский
Климатический тип	равнинно-степной	предгорный
Средний размер поля (га)	82	28
Количество полей	1883	4053
Полей с наземными данными	128	120
из них озимые	90	60
Площадь озимых в 2018 г., га (статистика)*	73866	22079

Примечание. * предварительные статистические данные Министерства сельского хозяйства Крыма.

Во избежание наложения контуров проведена проверка топологии объектов (рисунок 5).

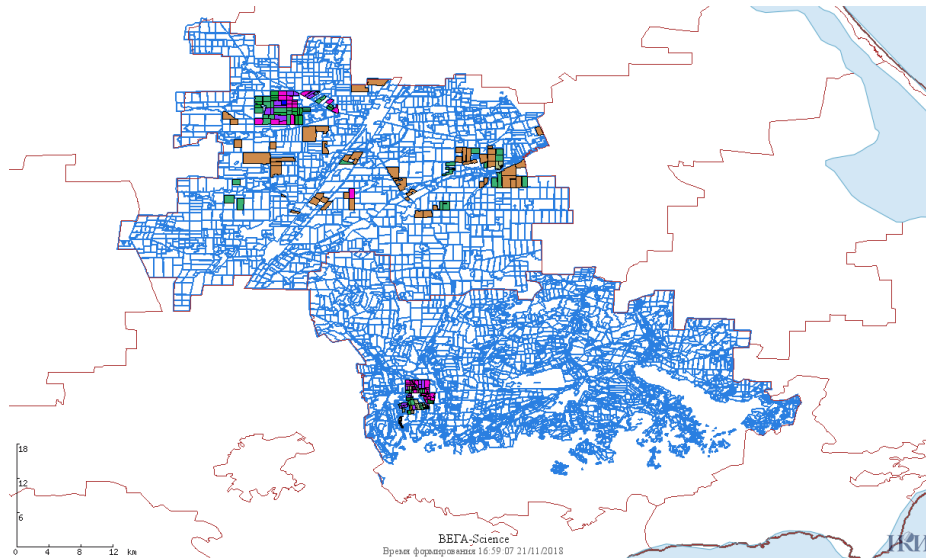


Рисунок 5 – Карта границ полей и информация о культурах (Красногвардейский и Белогорский районы)

Получены карты озимых культур сезона 2017–2018 гг. для тестовых участков (Красногвардейского и Белогорского районов) с пространственным разрешением 10 м (рисунок 6).

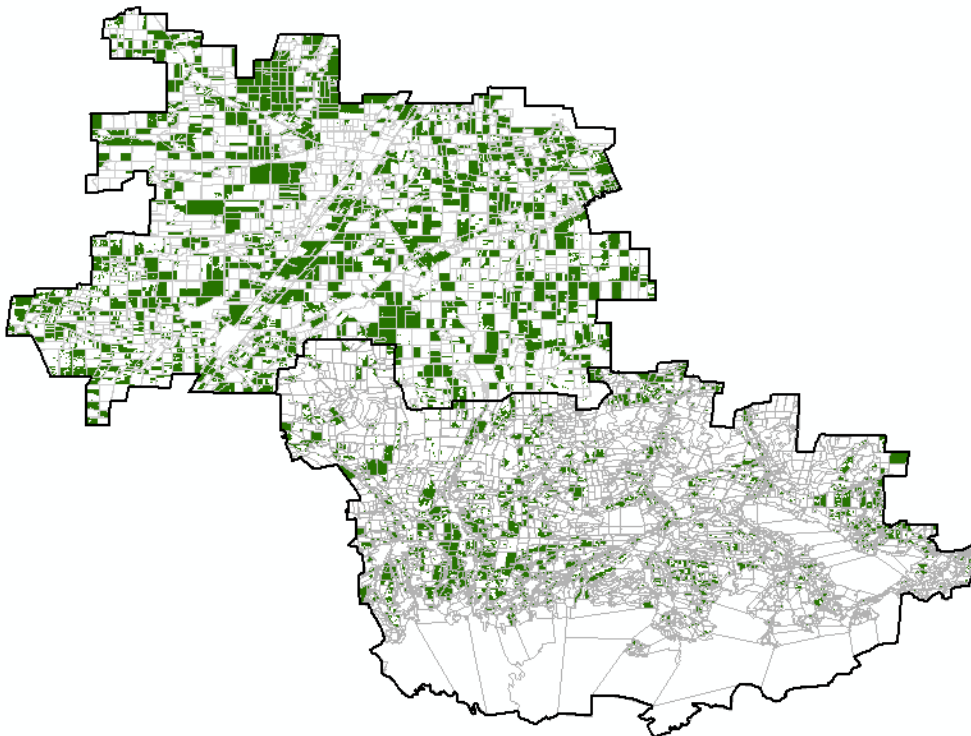


Рисунок 6 – Карты расположения озимых культур сезона 2017–2018 гг., полученные по спутниковым данным высокого разрешения на конец апреля 2018 г.

Проведено сравнение карты озимых по данным MODIS и полученной по описанной выше методике классификации спутниковых данных высокого разрешения, включая данные о площади и расположении посевов (см. таблицу 2 и рисунки 7–9). В ходе работ откорректированы участки полей и их контуры по

состоянию на 2018 г. Корректировки внесены с использованием данных Sentinel-2A и материалов наземных наблюдений.

Для оценки результатов использована таблица сопряженности (матрица ошибок) и рассчитанные метрики (см. таблицу 2). Общая точность карты идентификации озимых культур для Красногвардейского района составляет 92 %, для Белогорского – 89 %.

Таблица 2 – Сравнение методов идентификации озимых культур

Данные	Район	
	Красногвардейский	Белогорский
Площадь озимых в 2018 г., га (статистика)*	72271	18055
Площадь по данным MODIS, га	80542	12906
Расхождение со статистикой, %	11,4	-28,5
Площадь по уточненной карте, га (комплексирование данных ДЗЗ среднего и высокого пространственного разрешения)	67898	20543
Расхождение со статистикой, %	-6,05	13,8
Точность уточненной карты (overall accuracy)	0,92	0,89
F-score по классу озимых	0,94	0,87
F-score по классу неозимых	0,83	0,89
Каппа Коэна	0,77	0,77

Примечание. * предварительные статистические данные Министерства сельского хозяйства Крыма.

Удалось существенно повысить пространственную точность картирования озимых культур как для Красногвардейского, так и Белогорского района. В предгорном районе карта озимых, полученная по данным среднего пространственного разрешения, не идентифицировала более 28 % посевов озимых культур. На уточненной карте расхождение со статистическими данными Минсельхоза Крыма в два раза меньше. Сравнение карт проиллюстрировано на рисунках 8 и 9.

Метрика F-score используется при несбалансированной выборке и рассчитывается отдельно для каждого класса как гармоническое среднее двух, получаемых из ошибок первого и второго рода, показателей точности по искомому классу [20]. Значение F-score для класса «не озимых» показывает нормализованную ошибку ложного детектирования озимых на полях других культур, для обоих районов она превышает 0,8, что говорит о возможной вероятности включения других классов в карту посевов озимых культур на уровне 0,2. Коэффициент согласованности («каппа») Коэна – статистическая метрика, показывающая надежность классификации. Анализируемые карты имеют коэффициент 0,77, что говорит о высокой согласованности между наземными данными и результатом классификации.

По результатам ретроспективного анализа наземной информации и данных ДЗЗ выявлены факторы, влияющие на точность идентификации озимых культур с учетом специфики региона исследований. К числу основных ошибок, выявленных по результатам анализа идентификации сервисом «ВЕГА» посевов озимых культур сезона 2016–2017 и 2017–2018 гг. в степной и предгорной зоне Крыма, относятся: наложение идентифицированных контуров озимых культур на другие виды землепользования (карьеры, дороги); присвоение статуса озимых культур другим видам сельскохозяйственных земель (многолетние насаждения – сады, виноградники и другое). Алгоритм распознавал как озимые культуры многолетние травы, а также схожие с ними по периодам вегетации культуры.

В ходе работы выделены участки, которые требуют более подробной классификации по снимкам высокого разрешения.

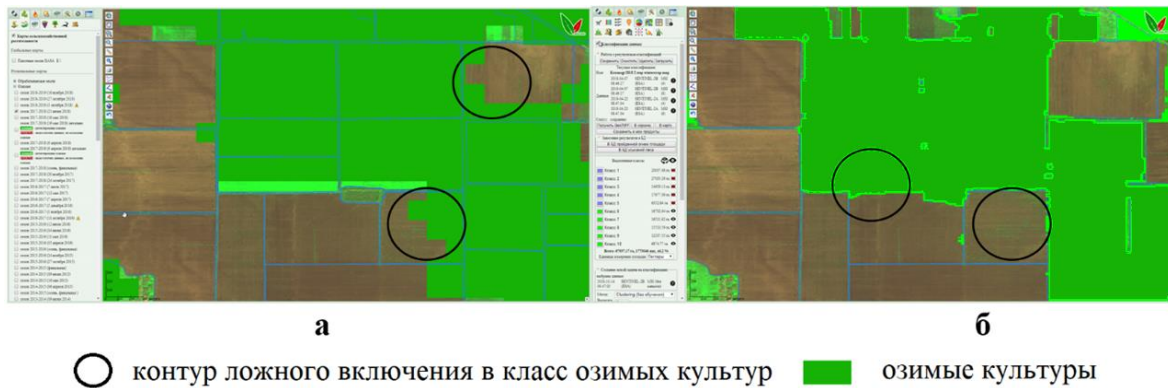


Рисунок 8 – Сравнение участков при классификации посевов (территория Красногвардейского района): а – MODIS; б – карта, полученная на основе метода комплексирования изображений

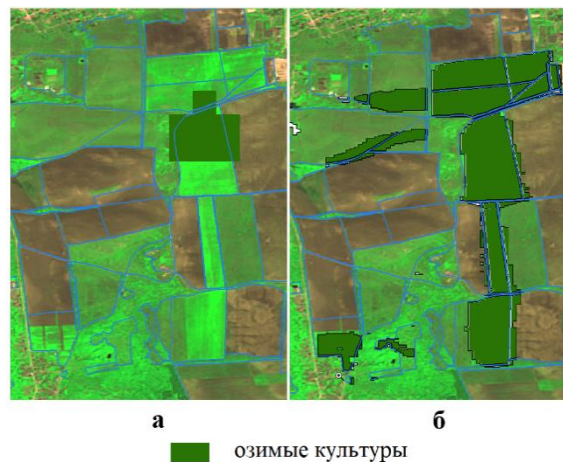


Рисунок 9 – Визуализация точности картирования на уровне полей (территория Белогорского района): а – MODIS (ошибка пропуска); б – уточненная карта участка

Важными причинами возникновения ошибок при распознавании озимых с использованием вышеизложенного метода также являются размер сельскохозяйственных полей и рельеф местности, распаханность земель, разбивка полей на участки с возделыванием разных культур внутри поля на небольших площадях (4–6 га) с разными технологиями земледелия.

Описывая точность карт среднего разрешения, следует упомянуть, что на правильность идентификации культур существенное влияние оказывает пространственное разрешение снимков MODIS, особенно для предгорных и горных территорий с расчлененным рельефом местности. Например, по тестовому участку в Белогорском районе (сезон 2017–2018 гг.) ошибка идентификации составила около 28 % (возможная причина – засушливые условия и поздний сев озимых культур).

Неоспоримыми преимуществами карты среднего пространственного разрешения являются её автоматизированное получение, локальная адаптивность, охват и относительная тематическая точность. Ограничениями – пространственное разрешение и зависимость от точности карты пахотных земель, в границах которых

она строится. В случае предгорного Белогорского района указанные карты имеют погрешности, вызывающие недооценку площадей озимых культур в регионе.

Таким образом, подтверждается актуальность данных исследований и необходимость совершенствования методики обработки данных высокого пространственного разрешения с использованием инструментов веб-сервиса «ВЕГА» для получения карт озимых культур для территории Республики Крым.

Проведенные эксперименты по построению карт озимых культур в Крыму позволили описать методику их получения и уточнить как площади, так и пространственное расположение озимых культур для сезона 2017–2018 гг. Данная методика, реализуемая в сервисе «ВЕГА», предоставляет широкому кругу пользователей способ получения более точных региональных карт раннего распознавания озимых.

Использование данных высокого пространственного разрешения позволяет уточнить границы посевов озимых культур, а для регионов с относительно небольшими размерами полей – существенно увеличить её точность по сравнению с маской озимых культур по MODIS. В последующих исследованиях планируется проведение дополнительных оценок точности создаваемых карт с учетом количества спутниковых данных, а также более информативные оценки карты по сенсору MODIS.

Выводы

Для реализации поставленной цели исследований выполнены следующие работы:

- сбор и дополнение баз данных (БД) картографической информации по структуре землепользования с выделением типа сельскохозяйственных угодий для территории Белогорского и Красногвардейского районов. Сбор информации по структуре посевных площадей за период 2016–2018 гг. Создание набора векторных покрытий;
- разработка интерактивной методики распознавания озимых с помощью описанных методов и материалов;
- апробация и верификация алгоритмов распознавания озимых культур по данным ДЗЗ и их калибровка с использованием наземной информации.

В ходе исследований проведен эксперимент и описана методика работы в «ВЕГА» по получению локальных карт озимых культур. Выполнена оценка точности и сравнение с картами среднего разрешения, сделаны следующие выводы:

- использование оптических и радиолокационных данных ДЗЗ обеспечивает точность распознавания озимых культур около 90 % уже на ранней стадии их развития;
- наличие тематических карт среднего разрешения и временных рядов NDVI, включающих в себя временные ряды «эталонов» типов растительности, позволяет использовать их как опорные данные для создания локальных масок озимых культур методом необучаемой классификации с последующим экспертным анализом кластеров.

К ограничениям предложенного метода можно отнести интерактивность (необходимо участие эксперта и при выборе признаков, и при принятии решения о принадлежности кластера классу объектов) и необходимость в наличии векторной маски полей (данная проблема может быть решена с помощью подхода предварительной сегментации спутникового изображения).

К положительным сторонам метода относятся простота реализации за счёт формализации условий выбора спутниковых данных и использования удобных инструментов поиска и анализа данных в сервисе «ВЕГА», минимальные требования

к вычислительным ресурсам, а также то, что доступные в «ВЕГЕ» спутниковые данные автоматически предобработаны, ряды NDVI – сглажены и интерполированы, что существенно сокращает время выполнения работы.

Использование предложенного метода позволило откорректировать существующие маски озимых культур для двух районов Крыма, выявить типичные ошибки идентификации и исключить их, что в дальнейшем даст возможность корректировать карту озимых культур для Крыма в целом. Наличие актуальных данных о расположении посевов озимых культур совместно с данными мониторинга их состояния, уровня почвенных влагозапасов и прогноза метеоусловий позволит прогнозировать их урожайность для региона.

Полученные по результатам исследований разработки могут войти в систему спутникового мониторинга крымского региона и будут доступны широкому кругу пользователей сервиса «ВЕГА».

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования, науки и молодежи Республики Крым в рамках научного проекта № 18-416-910011 р_а с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды [21].

Литература

1. Кондратьев К. Я., Козодеров В. В., Федченко П. П. Аэрокосмические исследования почв и растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 226 с.
2. Wiegand C. L., Richardson A. J., Escobar D. E., Gerbermann A. H. Vegetation Indices in Crop Assessments // Rem. Sens. Environment. 1991. No. 35. P. 105–119.
3. Барталев С. А., Егоров В. А., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Уваров И. А. Распознавание пахотных земель на основе многолетних спутниковых данных спектрорадиометра MODIS и локально-адаптивной классификации // Компьютерная оптика. 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.
4. Повх В. И., Шляхова Л. А., Воробейчик Е. А. Использование технологий дистанционного зондирования Земли для решения задач прогноза урожайности зерновых культур в Республике Адыгея // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2009. Вып. 6. Т. 2. С. 419–424.
5. De Wit A. J. W., Van Diepen C. A. Crop model data assimilation with the Ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts // Agricultural and Forest Meteorology. 2007. Vol. 146. P. 38–56.
6. Береза О. В., Страшная А. И., Лупян Е. А. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 18–30.
7. Skakun S., Franch B., Vermote E., Roger J.-C., Becker-Reshef I., Justice C., Kussul N. Early season large-area winter crop mapping using MODIS NDVI data, growing degree days information and a Gaussian mixture model // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 195. P. 244–258.
8. Kogan F., Kussul N., Adamenko T., Skakun S., Kravchenko O., Kryvobok O., Shelestov A., Kolotii A., Kussul O., Lavrenyuk A. Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorological data and biophysical models // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2013. Vol. 23. P. 192–203.
9. Плотников Д. Е., Барталев С. А., Жарко В. О., Михайлов В. В., Просяникова О. И. Экспериментальная оценка распознаваемости агрокультур по данным сезонных спутниковых измерений спектральной яркости // Современные проблемы дистанционного зондирования земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 199–208.
10. Миклашевич Т. С., Барталев С. А. Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 9–24.
11. Терехин Э. А. Информативность спектральных вегетационных индексов для дешифрирования сельскохозяйственной растительности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 4. С. 243–248.
12. Дунаева Е. А., Попович В. Ф. Информационный аспект картографирования территорий и посевов сельскохозяйственных культур для целей экосистемного анализа. Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2016. № 3 (63). С. 217–224.

13. Паштецкий В. С., Дунаева Е. А. Использование спутниковых сервисов для сельскохозяйственного мониторинга // Таврический вестник аграрной науки. 2017. № 3 (11). С. 124–131.
14. Плотников Д. Е., Барталев С. А., Лупян Е. А., Толпин В. А. Оценка точности выявления посевов озимых культур в весенне-летний период вегетации по данным прибора MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 132–145. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-132-145.
15. Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Loupian E. A. Mapping of arable land in Russia using multiyear time series of MO- DIS data and the LAGMA classification technique // Remote Sensing Letters. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 269–278.
16. Плотников Д. Е. Разработка методов дистанционной оценки растительного покрова на основе многолетних спутниковых измерений квазипериодических вариаций спектральной яркости. Автореф. дисс. ... канд. физико-математических наук. М.: ФГБУН «ИКИ РАН», 2011. 25 с.
17. Плотников Д. Е., Барталев С. А., Лупян Е. А., Савин И. Ю. Использование данных спутникового радиометра MODIS для распознавания пахотных земель, чистого пара и посевов озимых культур // Материалы Всероссийской научной конференции «Методическое обеспечение мониторинга земель сельскохозяйственного назначения». Сборник научных статей. М.: РАСХН, 2010. С. 417–422.
18. Кашницкий А. В., Балашов И. В., Толпин В. А., Барталев С. А. Инструменты сервиса Vega-Science для уточнения карт растительного покрова с использованием спутниковой информации различного пространственного разрешения // Четырнадцатая всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 2016. С. 92.
19. Ёлкина Е. С., Дунаева Е. А., Барталев С. А., Плотников Д. Е. Оценка возможностей выявления озимых культур с использованием инструментов сервиса Vega // Шестнадцатая Всероссийская Открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». Тезисы докладов. М.: ИКИ РАН, 2018. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=153&thesis=7343 (дата обращения 29.11.2018).
20. Stehman S. V. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy // Remote Sensing of Environment. 1997. Vol. 62. Is.1. P. 77–89.
21. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.

References

1. Kondratiev K. Ya., Kozoderov V. V., Fedchenko P. P. Aerospace studies of soil and vegetation. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1986. 226 p.
2. Wiegand C. L., Richardson A. J., Escobar D. E., Gerbermann A. H. Vegetation indices in crop assessments // Rem. Sens. Environment. 1991. No. 35. P. 105–119.
3. Bartalev S. A., Egorov V. A., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Uvarov I. A. Recognition of arable lands using multi-annual satellite data from spectroradiometer MODIS and locally adaptive supervised classification // Computer Optics. 2011. Vol. 35. No. 1. P. 103–116.
4. Povkh V. I., Shlyakhova L. A., Vorobeychik E. A. Application of the Earths remote sensing technologies to solve problems of the grain-crops yield forecast in Adygeya Republic // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2009. Is. 6. Vol. 2. P. 419–424.
5. De Wit A. J. W., Van Diepen C. A. Crop model data assimilation with the Ensemble Kalman filter for improving regional crop yield forecasts // Agricultural and Forest Meteorology. 2007. Vol. 146. P. 38–56.
6. Bereza O. V., Strashnaya A. I., Loupian E. A. On the possibility to predict the yield of winter wheat in the Middle Volga region on the basis of integration of land and satellite data // Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2015. Vol. 12. No. 1. P. 18–30.
7. Skakun S., Franch B., Vermote E., Roger J.-C., Becker-Reshef I., Justice C., Kussul N. Early season large-area winter crop mapping using MODIS NDVI data, growing degree days information and a Gaussian mixture model // Remote Sensing of Environment. 2017. Vol. 195. P. 244–258.
8. Kogan F., Kussul N., Adamenko T., Skakun S., Kravchenko O., Kryvobok O., Shelestov A., Kolotii A., Kussul O., Lavrenyuk A. Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorological data and biophysical models // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2013. Vol. 23. P. 192–203.
9. Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Zharko V. O., Mihailov V. V., Prosyannikova O. I. An experimental assessment of crop types recognisability using time-series of intra-seasonal spectral reflectance

measurements by satellite sensor // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2011. Vol. 8. No. 1. P. 199–208.

10. Miklashevich T. S., Bartalev S. A. Method for estimating vegetation cover phenological characteristics from satellite data time series // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2016. Vol. 13. No. 1. P. 9–24.

11. Terekhin E. A. The efficiency of spectral indices for interpretation agricultural vegetation // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2012. Vol. 9. No 4. P. 243–248.

12. Dunaieva Ie. A., Popovych V. F. Information aspect of mapping of territories and crops of agricultural cultures for the purpose of ecosystem analysis // *Puti povysheniya effektivnosti oroshaemogo zemledeliya*. 2016. No. 3 (63). P. 217–224.

13. Pashtetskiy V. S., Dunaieva Ie. A. Satellite service use for agricultural monitoring // *Taurida Herald of the Agrarian Sciences*. 2017. No. 3 (11). P. 124–131.

14. Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Loupian E. A., Tolpin V. A. Accuracy assessment for winter crops mapping in spring-summer growing season with MODIS data // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmos*. 2017. Vol. 14. No. 4. P. 132–145. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-132-145.

15. Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Loupian E. A. Mapping of arable land in Russia using multi-year time series of MODIS data and the LAGMA classification technique // *Remote Sensing Letters*. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 269–278.

16. Plotnikov D. E. Development of methods for remote assessment of vegetation on the basis of long-term satellite measurements of quasi-periodic variations of spectral brightness. Authors' abstract Cand. Sc. (Physics and Mathematics). Moscow: ISR RAS, 2011. 25 p.

17. Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Loupian E. A., Savin I. Yu. Use of MODIS satellite radiometer data for recognition of arable land, clean steam and winter crops // *Materials of the All-Russian scientific conference "Methodological support of monitoring of agricultural lands"*. Collection of scientific articles. Moscow: RAAS, 2010. P. 417–422.

18. Kashnitskiy A. V., Balashov I. V., Tolpin V. A., Bartalev S. A. Vega-Science service tools for specifying land cover maps using satellite information of different spatial resolution // *Fourteenth All-Russian Open Conference "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"*. Abstracts. Moscow. Space Research Institute of the RAS, 2016. P. 92.

19. Elkina E. S., Dunaieva Ie. A., Bartalev S. A., Plotnikov D. E. Assessing the possibility of identifying winter crops using the tools of the Vega service // *Sixteenth All-Russian Open Conference "Modern Problems of Remote Sensing of the Earth from Space"*. Abstracts. Moscow. Space Research Institute of the RAS, 2018. [Electronic resource]. Access point: http://smiswww.iki.rssi.ru/d33_conf/thesisshow.aspx?page=153&thesis=7343 (reference's date 29.11.2018).

20. Stehman S. V. Selecting and interpreting measures of thematic classification accuracy // *Remote Sensing of Environment*. 1997. Vol. 62. Is. 1. P. 77–89.

21. Loupian E. A., Proshin A. A., Burtsev M. A., Balashov I. V., Bartalev S. A., Efremov V. Yu., Kashnitskiy A. V., Mazurov A. A., Matveev A. M., Sudneva O. A., Sychugov I. G., Tolpin V. A., Uvarov I. A. IKI center for collective use of satellite data archiving. Processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring // *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2015. Vol. 12. No. 5. P. 263–284.

UDC 631.6:556.1:528.8

Dunaieva Ie. A., Elkina E. S., Plotnikov D. E., Bartalev S. A., Veчерkov V. V.,
Golovastova E. S.

FEATURES OF WINTER GRAIN CROPS IDENTIFICATION BY MEANS OF REMOTE SENSING

Summary. *The purpose of the study was to analyze and evaluate methods for early recognition of winter crops using satellite data of medium and high spatial resolution, as well as to develop methods for obtaining regional maps of winter crops using the 'VEGA' satellite monitoring service (sci-vega.ru). The studies made it possible to create the methodology and evaluate the possibility of combining medium remote sensing data (MODIS) and high (Landsat 8, Sentinel-2, Sentinel-1) spatial resolution in the 'VEGA' service environment for assessing the condition of winter crops 2017–2018 on the example of two regions of the Crimea. The proposed approach of identifying winter crops based on interactive clustering of a time series of satellite images using reference data was verified using random field surveys and taking into account the relationship of biophysical*

indicators and remote measurements. The overall accuracy of the new regional maps of winter crops was 92 % for Krasnogvardeisky district and 89 % for Belogorsky district. The use of the proposed method made it possible to refine the maps of winter crops for the indicated areas compared to the maps constructed according to the average resolution of MODIS and available in 'VEGA', as well as to establish the nature of identification errors, which will make it possible to correct winter crop maps for the whole Crimea. The developments obtained from the results of the research will be included in the satellite monitoring system of the Crimean region and will be available to a wide range of users of the 'VEGA' service.

Keywords: *satellite monitoring, 'VEGA' service, winter crops, Republic of Crimea.*

Дунаева Елизавета Андреевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории ГИС технологий и моделирования агроэкосистем, ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295453, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: dunaeva_e@niishk.ru.

Ёлкина Евгения Сергеевна, инженер лаборатории спутникового мониторинга наземных экосистем, ФГБУН «Институт космических исследований РАН»; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32; e-mail: elkina@d902.iki.rssi.ru.

Плотников Дмитрий Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории спутникового мониторинга наземных экосистем, ФГБУН «Институт космических исследований РАН»; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32; e-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru.

Барталев Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией спутникового мониторинга наземных экосистем, ФГБУН «Институт космических исследований РАН»; 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная 84/32; e-mail: bartalev@d902.iki.rssi.ru.

Вечерков Валентин Валериевич, младший научный сотрудник лаборатории ГИС технологий и моделирования агроэкосистем, ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295453, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: v.valenteen11@yandex.ru.

Головастова Екатерина Сергеевна, младший научный сотрудник, лаборатории ГИС технологий и моделирования агроэкосистем, ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма»; 295453, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, 150; e-mail: k.golovastova96@mail.ru.

Dunaieva Ielizaveta Andreevna, Cand. Sc. (Techn.), senior researcher of GIS technology and agroecosystem modeling Laboratory, FSBSI "Research Institute of Agriculture of Crimea"; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; e-mail: dunaeva_e@niishk.ru.

Elkina Evgenia Sergeevna, engineer, Terrestrial Ecosystems Monitoring Laboratory, Space Research Institute (IKI) of the Russian Academy of Sciences; 84/32, Profsoyuznaya Str., Moscow, 117997, Russia; e-mail: elkina@d902.iki.rssi.ru.

Plotnikov Dmitry Evgenievich, Cand. Sc. (Phys.-Math.), senior researcher, Terrestrial Ecosystems Monitoring Laboratory, Space Research Institute (IKI) of the Russian Academy of Sciences; 84/32, Profsoyuznaya Str., Moscow, 117997, Russia; e-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru.

Bartalev Sergey Aleksandrovich, Dr. Sc. (Techn.), Professor, leading researcher, head of Terrestrial Ecosystems Monitoring Laboratory, Space Research Institute (IKI) of the Russian Academy of Sciences; 84/32, Profsoyuznaya Str., Moscow, 117997, Russia; e-mail: bartalev@d902.iki.rssi.ru.

Vecherkov Valentin Valerievich, junior researcher of GIS technology and agroecosystem modeling Laboratory, FSBSI "Research Institute of Agriculture of Crimea"; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; e-mail: v.valenteen11@yandex.ru.

Golovastova Ekaterina Sergeevna, junior researcher of GIS technology and agroecosystem modeling Laboratory, FSBSI "Research Institute of Agriculture of Crimea"; 150, Kievskaya str., Simferopol, Republic of Crimea, 295493, Russia; e-mail: k.golovastova96@mail.ru.

*Дата поступления – 03.09.2018.
Дата принятия в печать – 24.10.2018.*