Оценка точности выявления посевов озимых культур в весенне-летний период вегетации по данным прибора MODIS

Д.Е. Плотников, С.А. Барталев, Е.А. Лупян, В.А. Толпин

Институт космических исследований РАН, Москва, Россия
E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

В течение последних лет в ИКИ РАН были разработаны автоматические методы для распознавания посевов озимых культур на основе временных серий спутниковых данных. Это позволило сформировать серию ежегодных карт озимых за последние пятнадцать лет на всю территорию их регулярного возделывания в РФ с пространственным разрешением 250 м. Благодаря развитию систем дистанционного мониторинга и анализа сельскохозяйственной растительности семейства ВЕГА появилась возможность хранить и оценивать результаты наземных обследований для десятков тысяч полей пахотных земель, занятых озимыми и другими культурами. В работе описывается процедура и представлены результаты валидации получаемых автоматически карт озимых культур на основе репрезентативной пространственно-распределенной и разносезонной наземной информации, охватывающей десятки субъектов РФ. Показано, что региональная точность распознавания озимых по данным наземных обследований варьирует в диапазоне значений от 70% до 98%. Анализ диаграмм рассеяния при сравнении с данными региональной статистики указывает на высокую корреляцию оценок, получаемых на основе карт озимых культур, с имеющейся статистической информацией. Полученные результаты позволяют сделать вывод о применимости изучаемых карт для решения задач дистанционной оценки состояния озимых в разрезе административных районов, а также для оценки площадей, занятых озимыми культурами в крупных сельскохозяйственных регионах и федеральных округах.

Работа выполнялась с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды (Лупян и др., 2015) при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, контракт 14.616.21.0063, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61615X0063.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, методы распознавания, озимые культуры, валидация

Одобрена к печати: 26.07.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-132-145

Введение

Озимые культуры являются важным элементом обеспечения продовольственной безопасности России и целого ряда других стран благодаря повышенной устойчивости к засухам и высокой урожайности. Зерновые озимые обеспечивают высококачественное зерно с большим содержанием белка и клейковины и являются крупной статьей российского сельскохозяйственного экспорта. В России более 97% площади озимых культур засевается в Европейской части страны, а именно в Северо-Кавказском, Южном, Центральном и Приволжском федеральных округах (http://www.gks.ru/).

Ареал выращивания озимых в России, простирающийся от степных регионов на юге до преимущественно лесных территорий Вологодской и Ленинградской областей на севере, от Калининградской области на западе до Алтайского края на востоке, характеризуется существенной изменчивостью своих физико-географических и почвенно-климатических условий. Нерегулярное и фрагментарное возделывание озимых культур можно отметить почти по всей южной границе РФ вплоть до Дальнего Востока, однако суммарный вклад Сибирского и Дальневосточного регионов в общий урожай озимых очень мал. Пространственная вариабельность оптимальных дат сева и созревания озимых на территории страны зачастую превышает один месяц. В условиях столь обширного ареала регулярного воз-

делывания озимых культур данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются безальтернативным источником оперативной и объективной информации об их состоянии и динамике.

Характерные для посевов озимых культур фенологические особенности развития, позволяющие локально отделять их от посевов остальных культур, могут служить основой для разработки методов их выявления по данным ДЗЗ. К особенностям развития озимых культур можно, прежде всего, отнести появление их всходов в осенний период и ускоренный рост перезимовавших растений ранней весной.

Вопросам распознавания озимых культур на основе данных ДЗЗ посвящено значительное число исследований (Mingwei et al., 2008; Skakun et al., 2017, Wardlow, Egbert, 2008). Из работ, затрагивающих вопросы детектирования озимых культур на территории Российской Федерации, можно выделить статьи (Воробьева, Сергеев, Чернов, 2016; Терехин, 2015), описывающие методы распознавания озимых на локальном и региональном (почвенно-климатические зоны, субъекты РФ) уровнях. Описанный в работе (Плотников, Барталев, Лупян, 2008) метод позволяет детектировать озимые в осенне-зимний период на основе данных прибора MODIS на всей территории Европейской части РФ. Однако климатические особенности осеннего периода и их влияние на изменение сроков посевных кампаний нередко приводят к недостаточному накоплению биомассы растениями до выпадения снега, что накладывает ограничения на использование указанного метода. Также получаемые указанными методами данные о площадях озимых культур невозможно использовать для оценки состояния перезимовавших посевов в масштабе страны. Поэтому в ИКИ РАН был разработан метод распознавания озимых культур на Европейской территории России и пограничных с ней стран (Плотников, Барталев, Хвостиков, 2013) на основе данных прибора MODIS в весенне-летний период вегетации, совершенствование которого продолжалось в последующие годы. В настоящей работе приводятся оценки точности текущей версии этого метода для детектирования посевов озимых культур по спутниковым данным.

Краткое описание метода выявления озимых культур

Анализируемый метод является развитием ранее предложенных подходов для распознавания озимых культур на больших территориях (Плотников, Барталев, Лупян, 2008; Плотников, Барталев, Хвостиков, 2013), в основе которого лежат:

1) независимое создание локально репрезентативной обучающей выборки для класса озимых и класса других культур;

2) использование признаков распознавания, отражающих фенологию и состояние растительности в весенне-летний период вегетации;

3) выявление озимых культур методом локально-адаптивной непараметрической классификации.

Концепция метода предусматривает последовательное обновление и уточнение в оперативном режиме карт посевов озимых культур в весенне-летний период по мере их развития и появления новых свободных от влияния мешающих факторов спутниковых данных MODIS; схема его работы представлена на *рис. 1*. Следует отметить, что на ранних этапах возобновления весенней вегетации эффективное использование метода ограничено недостаточным количеством чистых измерений во временном ряду данных спутниковых наблюдений в силу мешающего влияния снежного покрова, облаков и теней от них. Для расчета значений признаков распознавания озимых культур, учитывающих особенности их фенологии в весенне-летний период, на начальном этапе обработки данных ДЗЗ формируются композитные изображения за фиксированные временные интервалы, максимально свободные от влияния указанных мешающих факторов за счет применения масок снега, облачности и теней, построенных с использованием соответствующих методов предварительной обработки (Барталев и др., 2017). Рассматриваемый метод выявления озимых предусматривает использование четырехдневных композитных изображений, содержащих данные измерений отраженного земной поверхностью излучения в красном и ближнем ИК-диапазонах длин волн (Барталев и др., 2011). Для пикселей временного ряда композитных изображений вычисляются значения перпендикулярного вегетационного индекса PVI (positive volume index) (Richardson, Weigand, 1977), рассчитываемые как евклидово расстояние до линии почв в пространстве измерений яркости в красном и ближнем ИК-диапазонах и позволяющие компенсировать влияние изменения отражательной способности почвенного покрова. Для обеспечения непрерывности временных рядов PVI и дополнительной компенсации остаточного влияния случайных шумов проводится восстановление пропущенных значений методом скользящей оконной полиномиальной аппроксимации (Плотников, Миклашевич, Барталев, 2014).

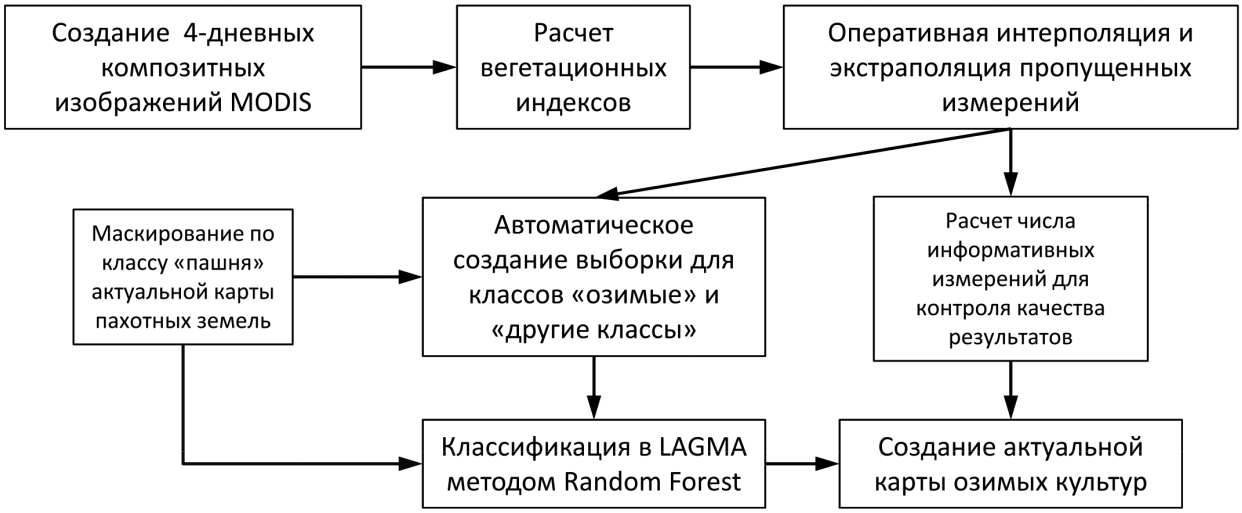


Рис. 1. Схема оперативного обновления карт посевов озимых культур по данным MODIS

При выявлении озимых культур проводится рассмотрение множества разновременных композитных изображений PVI методом классификации с обучением, направленным

на разделение растительности пахотных земель на два класса, соответствующих озимым и прочим сельскохозяйственным культурам. Необходимые для проведения классификации эталоны для двух указанных классов создаются на основе автоматического локального гистограммного анализа изображений, полученных вскоре после схода снежного покрова, когда озимые наиболее достоверно отделяются от прочих культур. Созданные спектрально-динамические эталоны проверяются с помощью собираемой в их окрестности статистики и используются в дальнейшем для проведения локально-адаптивной классификации непараметрическим классификатором RandomForest (Breiman, 2001), реализованным в среде программного комплекса LAGMA-PLUS на основе метода LAGMA (Bartalev et al., 2014). Автоматический поиск необходимых эталонов и классификация спутниковых изображений ограничивается территорией, соответствующей актуальной карте используемых пахотных земель России, ежегодно получаемой по данным MODIS (Bartalev, Plotnikov, Loupian, 2016). В результате классификации создается карта посевов озимых культур, сопровождаемая вспомогательной информацией о степени надежности результатов их выявления, определяемой на уровне пикселей MODIS с учетом количества информативных значений в используемой серии признаковых изображений.

Создание необходимых для работы алгоритмов композитных изображений и восстановление временных серий измерений MODIS реализованы в виде автоматической технологии и выполняются в оперативном режиме. Это позволяет многократно осуществлять обновление карты озимых культур по мере развития растений. Исходя из практической целесообразности, обновление карт, как правило, проводится ежемесячно. Зона оперативного мониторинга посевов озимых включает в себя территорию России и ряда соседних стран, включая Белоруссию, Украину, страны Прибалтики.

Ниже представлена оценка точности исследуемых карт озимых культур, полученная на основе использования результатов наземных обследований множества отдельных полей и многолетней информации статистической отчетности на уровне субъектов РФ.

Валидация карт озимых культур на основе наземной информации

Наземная информация о размещении культур и их гибридов была предоставлена девятью независимыми сельскохозяйственными производителями на основе результатов посевных и уборочных кампаний на полях 14 субъектов Российской Федерации и Украины. Были получены данные наземных обследований 3067 сельскохозяйственных полей, включающие информацию о размещении более 20 культур и групп культур за последние пять лет (2012–2016), корректность границ которых была оценена визуально на основе данных высокого пространственного разрешения Landsat и Sentinel 2. На их основе был подготовлен набор опорных данных для двух классов (озимые культуры и другие сельскохозяйственные культуры) для каждого года рассматриваемого периода. Валидация осуществлялась на основе пространственного сопоставления полученных по данным MODIS карт

озимых культур и опорных данных для каждого года и региона, включая расчет метрик общей точности классификации и F-score по каждому из двух классов. Метрика F-score является класс-ориентированной и может быть рассчитана для каждого класса индивидуально, минимизируя влияние со стороны других классов, что особенно важно в случае дисбаланса представленности классов в опорной выборке. Метрика рассчитывается как гармоническое среднее двух получаемых из ошибок первого и второго рода показателей точности по искомому классу и достигает наибольшего значения, равного единице (Stehman, 1997). Оценки точности сопровождаются информацией о репрезентативности оценок в терминах количества полей обоих классов, доступных для конкретного региона и года и использованных для расчета метрик (*табл. 1*).

Таблица 1. Результаты валидации полученных по данным MODIS карт озимых культур на основе опорной наземной информации

Год	*Регион*	*Общая точность*	*F-score*		*Количество полей*		
			озимые	*другие культуры*	*всего*	*озимые*	*другие*
2016	Белгородская обл.	0,158	–	0,273	2	0	2
	Курская обл.	0,871	0,770	0,910	418	105	313
	Республика Адыгея	0,757	0,682	0,804	16	3	13
	Самарская обл.	0,928	0,905	0,942	76	29	47
	Ставропольский край	0,948	0,955	0,938	209	116	93
	Всего Россия	**0,895**	**0,862**	**0,916**	**721**	**253**	**468**
	Украина	0,808	0,862	0,684	9	4	5
	Всего	**0,894**	**0,862**	**0,914**	**730**	**257**	**473**
2015	Курская обл.	0,850	0,740	0,894	681	175	506
	Липецкая обл.	0,781	0,619	0,846	269	105	164
	Орловская обл.	0,964	–	0,982	52	0	52
	Пензенская обл.	0,818	0,720	0,865	196	89	107
	Рязанская обл.	0,905	0,765	0,941	149	37	112
	Самарская обл.	0,927	0,890	0,946	76	21	55
	Ставропольский край	0,827	0,868	0,749	191	111	80
	Тамбовская обл.	0,905	0,800	0,938	140	30	110
	Тульская обл.	0,874	0,722	0,919	298	59	239
	Всего Россия	**0,852**	**0,754**	**0,894**	**2052**	**627**	**1425**
	Украина	0,945	0,842	0,967	293	139	154
	Всего	**0,858**	**0,757**	**0,900**	**2345**	**766**	**1579**
2014	Курская обл.	0,931	0,846	0,955	676	141	535
	Липецкая обл.	0,963	0,820	0,980	250	29	221
	Пензенская обл.	0,951	0,244	0,975	191	6	185
	Республика Мордовия	1,000	–	1,000	2	0	2
	Рязанская обл.	0,956	0,657	0,977	148	8	140
	Самарская обл.	0,991	–	0,996	47	0	47
	Тамбовская обл.	0,984	0,659	0,992	140	5	135
	Тульская обл.	0,961	0,842	0,977	293	34	259
	Ульяновская обл.	0,059	0,111	–	3	3	0
	Всего Россия	**0,951**	**0,807**	**0,972**	**1750**	**226**	**1524**
	Украина	0,787	0,881	–	109	109	0
	Всего	**0,949**	**0,812**	**0,971**	**1859**	**335**	**1524**

2013	Курская обл.	0,856	0,774	0,894	557	189	368
	Липецкая обл.	0,875	0,706	0,921	173	34	139
	Орловская обл.	0,911	0,745	0,946	52	10	42
	Пензенская обл.	0,758	0,530	0,837	192	60	132
	Рязанская обл.	0,904	0,844	0,931	147	39	108
	Самарская обл.	0,933	0,860	0,956	27	9	18
	Тамбовская обл.	0,951	0,881	0,969	138	29	109
	Тульская обл.	0,886	0,837	0,912	266	107	159
	Всего Россия	**0,866**	**0,766**	**0,906**	**1552**	**477**	**1075**
	Украина	0,726	0,683	0,758	18	9	9
	Всего	**0,865**	**0,764**	**0,905**	**1570**	**486**	**1084**
2012	Курганская обл.	0,993	–	0,996	37	0	37
	Курская обл.	0,888	0,735	0,929	796	183	613
	Липецкая обл.	0,733	0,604	0,799	101	34	67
	Орловская обл.	0,716	0,643	0,764	52	31	21
	Пензенская обл.	0,763	0,484	0,846	181	57	124
	Рязанская обл.	0,809	0,562	0,878	130	34	96
	Тамбовская обл.	0,869	0,839	0,889	142	64	78
	Тульская обл.	0,813	0,690	0,866	260	97	163
	Всего Россия	**0,834**	**0,682**	**0,887**	**1699**	**500**	**1199**
	Все годы и регионы	**0,881**	**0,769**	**0,920**	**22481**	**6271**	**16210**

Следует отметить, что в случае небольшого количества полей получаемые метрики оказываются нерепрезентативными в масштабах региона, а их значения могут иметь случайный характер. Необходимо также иметь в виду, что метрика F-score технически не может быть рассчитана для одного из классов в случае отсутствия для него наземной информации, хотя общая точность классификации при этом доступна.

Для случаев с достаточно представленной в масштабе региона выборкой опорных данных общая точность классификации озимых культур варьирует в диапазоне значений 70–98%, демонстрируя зависимость от субъекта РФ и указывая на региональные ограничения применимости получаемых карт. Метрика F-score по классу «другие культуры» позволяет оценить нормализованную ошибку ложного детектирования озимых на полях других культур: для репрезентативных случаев значение этой метрики не опускается ниже 0,76, а зачастую имеет значения выше 0,9, что указывает на низкую (менее 0,1) ошибку включения других классов в карту посевов озимых культур. Это говорит в пользу достаточно высокой точности сезонных и многолетних оценок динамики и состояния озимых культур, построенных на основе этих карт. Кроме этого, используя карты в качестве источника обучающих данных для уточнения расположения и границ посевов на основе спутниковых изображений высокого пространственного разрешения, можно ожидать получение достаточно точных результатов ввиду высокой статистической чистоты обучающей выборки.

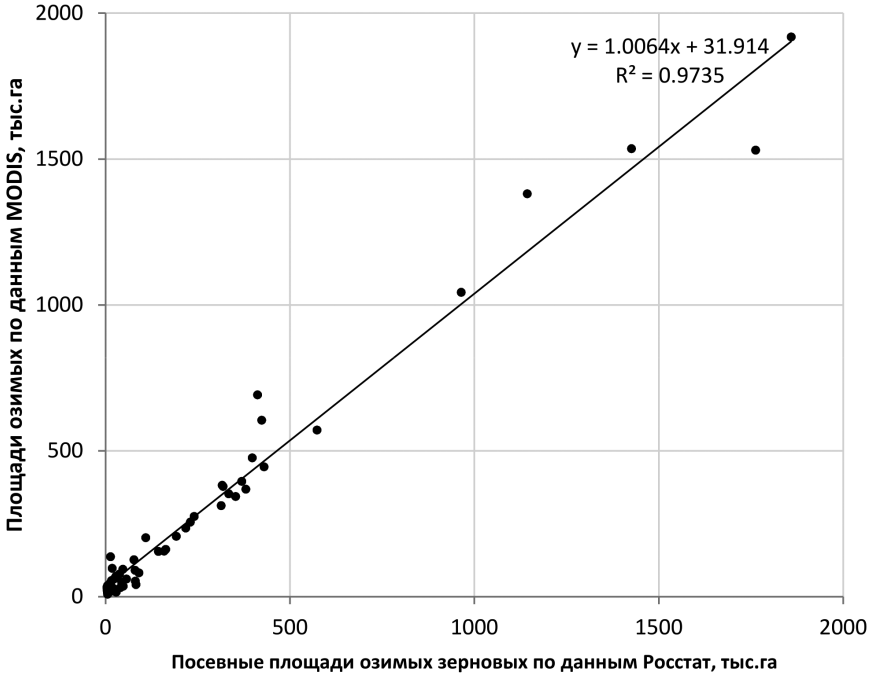
Сравнение результатов выявления озимых культур с данными Росстата

Отметим, что данные статистической отчетности, публикуемые Росстатом (www.gks.ru), в силу особенностей процедуры их сбора в ряде случаев могут содержать неточности; в то же время, на наш взгляд, они позволяют проанализировать особенности получаемых по данным MODIS карт озимых культур для территорий, характеризуемых существенными различиями агроклиматических условий. На основе ежегодных оценок площади озимых культур для субъектов РФ зоны мониторинга по данным MODIS были рассчитаны региональные среднемноголетние площади посевов. Среднемноголетние относительные отклонения оценок площади озимых в сравнении с данными Росстата позволяют оценить принципиальную применимость метода для отдельных регионов страны с учетом накопленной за многолетний период мониторинга статистики (*табл. 2*). Субъекты РФ в *табл. 2* упорядочены по возрастанию модуля относительного отклонения оценки площади озимых культур. В конце списка с максимальными относительными ошибками ожидаемо находятся регионы, расположенные у края ареала возделывания озимых культур и являющиеся преимущественно малопригодными для регулярного выращивания озимых ввиду климатических условий. Начало списка, напротив, включает важные в сельскохозяйственном отношении субъекты РФ, обеспечивающие наибольший вклад в валовой сбор зерна озимых.

Таблица 2. Среднемноголетнее относительное отклонение значений площади озимых культур в субъектах РФ, полученное по данным ДЗЗ и Росстата

Субъект федерации	*Модуль относительной ошибки*	*Субъект федерации*	*Модуль относительной ошибки*
Брянская область	0,00	Калининградская область	0,23
Пензенская область	0,00	Республика Ингушетия	0,29
Воронежская область	0,00	Псковская область	0,33
Республика Мордовия	0,01	Кабардино-Балкарская Республика	0,33
Орловская область	0,02	Оренбургская область	0,43
Самарская область	0,03	Карачаево-Черкесская Республика	0,44
Ростовская область	0,03	Республика Дагестан	0,49
Республика Татарстан	0,04	Удмуртская Республика	0,66
Республика Башкортостан	0,06	Республика Крым	0,68
Тамбовская область	0,07	Новгородская область	0,75
Краснодарский край	0,08	Кировская область	0,87
Саратовская область	0,08	Московская область	1,04
Нижегородская область	0,08	Пермский край	1,10
Тульская область	0,09	Смоленская область	1,22
Республика Адыгея	0,09	Калужская область	1,54
Чувашская Республика	0,09	Владимирская область	1,70
Республика Калмыкия	0,09	Ивановская область	1,81
Ульяновская область	0,12	Свердловская область	2,58
Ставропольский край	0,13	Ленинградская область	2,78
Чеченская Республика	0,14	Тверская область	3,32
Рязанская область	0,15	Курганская область	4,58

Республика Марий Эл	0,15	Астраханская область	4,88
Липецкая область	0,19	Ярославская область	6,00
Курская область	0,20	Костромская область	6,90
Республика Северная Осетия-Алания	0,21	Вологодская область	9,29
Волгоградская область	0,21	Челябинская область	9,58
Белгородская область	0,21		



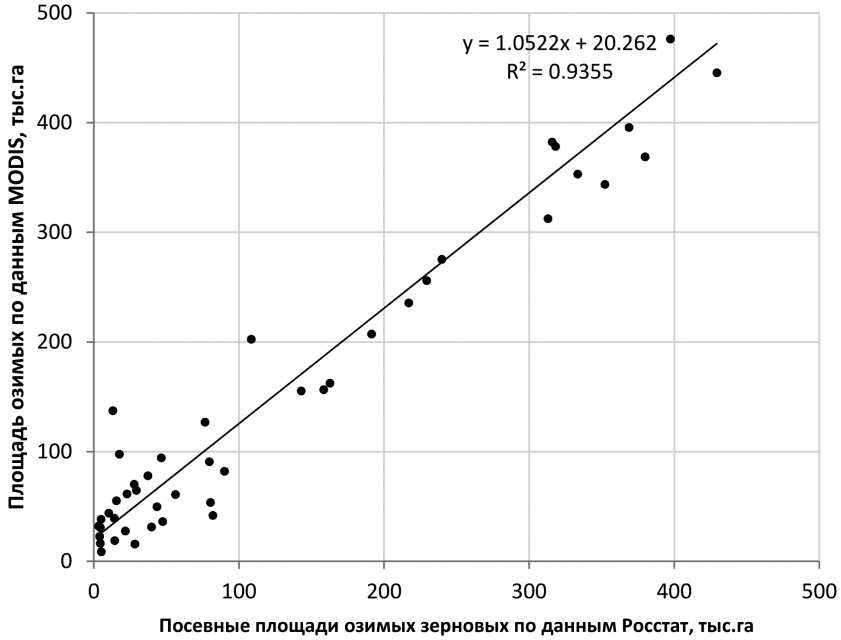


Рис. 2. Диаграммы рассеяния среднемноголетних площадей озимых культур по данным Росстата и выявленных по данным MODIS для всех субъектов РФ (вверху) и для субъектов с посевными площадями менее 500 тыс. га (внизу)

Характерными являются диаграммы рассеяния среднемноголетних значений площади озимых по данным Росстата и по результатам их выявления на основе данных MODIS (*рис. 2*). Высокий уровень соответствия между независимыми источниками — коэффициент

детерминации $R^2 = 0{,}97$ для всех субъектов РФ (верхний график) и $R^2 = 0{,}93$ для субъектов РФ с площадью посевов менее 500 тыс. га (нижний график) — говорит о высокой достоверности обоих источников при анализе среднемноголетних значений площадей озимых. Близкий к единице коэффициент наклона регрессионной прямой указывает на то, что получаемые с использованием карт озимых культур среднемноголетние кривые (статистические нормы) дистанционных индикаторов интенсивности продукционного процесса точны с высоким уровнем достоверности и могут служить надежным эталоном при поиске аномалий развития посевов и выявления сдвигов в фенологии текущего сезона вегетации. Похожий вывод был сделан при анализе результатов валидации карт озимых культур на основе наземной информации. Наличие положительного свободного коэффициента (32 тыс. га для первой диаграммы и 20 тыс. га для второй) указывает на то, что регрессионная прямая проходит несколько выше оптимальной единичной прямой. Таким образом, в среднемноголетнем разрезе метод обеспечивает получение устойчивых результатов не только для регионов-лидеров, но также для многих субъектов РФ с посевными площадями менее 500 тыс. га, учитывая при этом найденную выше систематическую погрешность. Последнее означает, что метод не применим к регионам, где среднемноголетние посевные площади озимых составляют менее 30 тыс. га либо близки к этому значению. Эти ограничения являются комплексными и связаны с невысоким пространственным разрешением и погрешностями геопривязки данных MODIS в условиях сложной геометрии агроландшафтов преимущественно несельскохозяйственных регионов страны с малыми посевными площадями озимых. Необходимо также учитывать, что технология получения карт озимых культур связана с использованием актуальных карт используемых пахотных земель России, построенных по данным MODIS, точность которых различна для регионов страны и была детально исследована ранее (Bartalev, Plotnikov, Loupian, 2016).

Таким образом, интегральные оценки площадей озимых на уровне относительно крупных административных единиц в регионах с высокой долей посевных площадей озимых могут считаться достаточно точными. К таким регионам относятся Южный, Северо-Кавказский, Приволжский и Центральный федеральные округа.

Анализ и обсуждение результатов

К настоящему времени на основе обработки данных MODIS сформирован временной ряд ежегодных карт озимых культур пространственного разрешения 250 м, охватывающий период 2001–2017 гг. Приведенный на *рис. 3* пример отражает полученную на основе созданных ежегодных карт многолетнюю динамику площадей озимых в ряде субъектов РФ.

Полученные оценки точности карт, по нашему мнению, указывают на то, что исследуемые результаты распознавания озимых культур могут использоваться при решении следующих задач.

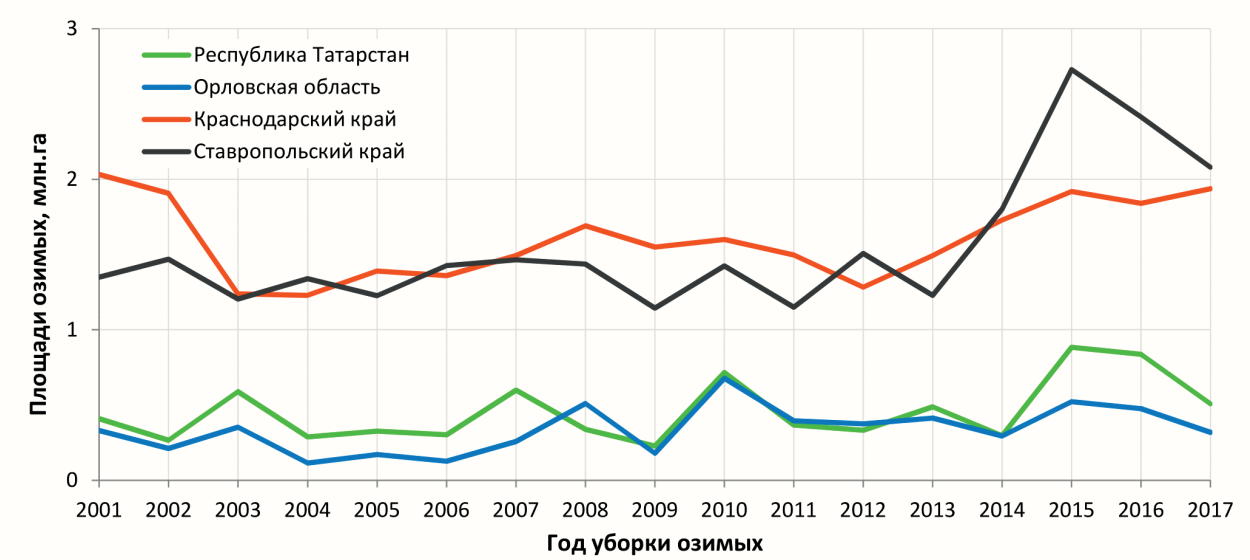


Рис. 3. Результаты многолетней дистанционной оценки площади озимых культур по спутниковым данным MODIS для ряда субъектов РФ

– *Оперативная оценка хода развития посевов озимых культур*. Такая оценка осуществляется сравнением соответствующих им кривых сезонной динамики дистанционных индикаторов эффективности продукционного процесса с локально определенными референтными кривыми, в качестве которых могут приниматься среднемноголетние значения (статистические нормы) соответствующего индикатора (Толпин и др., 2014). В реализованной в настоящее время в среде сервиса ВЕГА технологии оценки хода развития озимых культур в качестве такого дистанционного индикатора интенсивности продукционного процесса посевов используется вегетационный индекс NDVI (normalized difference vegetation index). Потенциально в этом же качестве могут применяться и другие вегетационные индексы или биофизические характеристики посевов (например, индекс листовой поверхности). Отметим, что применение данных оценок позволяет получить информацию о состоянии озимых культур на уровне регионов и муниципальных районов, которая может использоваться для прогнозирования их урожайности. В частности, можно привести прогнозы, сделанные в работах (Лупян, Барталев, Крашенинникова, 2016; Лупян и др., 2017), которые впоследствии полностью подтвердились.

– *Оценка площади посевов озимых культур*. Оценка площади посевов озимых культур, как правило, проводится на уровне административно-территориальных образований (субъекты РФ, муниципальные образования, хозяйство). Уровень точности получаемых оценок на основе использования карт озимых культур существенно меняется для различных регионов РФ, имея тенденцию к возрастанию по мере увеличения территориального охвата и региональной доли озимого клина.

– *Использование карт в качестве обучающей информации.* В случаях значительных локальных ошибок оценки площади озимых культур, производимой на основе непосредственного использования соответствующей карты, последняя может служить источником опорных данных для обучения классификатора при выявлении посевов с применением

спутниковых изображений более высокого пространственного разрешения, способствуя, таким образом, повышению точности определения искомой площади. Технология уточнения площади посевов озимых культур на основе обучаемой классификации спутниковых изображений высокого пространственного разрешения реализована в среде сервиса ВЕГА (Лупян и др., 2011, 2014).

Заключение

Таким образом, полученная в рамках этой работы разносторонняя оценка результатов выявления посевов озимых культур в весенне-летний период вегетации по данным MODIS позволила определить области применимости получаемых карт озимых культур. Также показано, что данные карты в среднем демонстрируют высокую точность для значимых в сельскохозяйственном отношении регионов Южного, Центрального и Приволжского федерального округов. Установлена высокая степень корреляции между результатами дистанционной оценки и данными среднемноголетней официальной статистики Росстата по посевным площадям озимых культур на уровне субъектов РФ. Применимость карт для региональной оценки состояния озимых культур и построения среднемноголетней динамики их развития на основе дистанционных индикаторов продукционного процесса посевов обоснована прочностью регрессионной связи, а именно близостью регрессионной линии и прямой с единичным наклоном на диаграммах рассеяния (*рис. 2*). Кроме этого, попиксельная валидация карт на основе репрезентативной наземной информации (более трех тысяч полей) на уровне субъектов РФ подтверждает установленные региональные тренды, позволяет объективно оценить результаты распознавания в контексте многолетнего мониторинга и указывает на ограничения по локальной репрезентативности данных наземных обследований.

Описанные карты озимых культур в настоящее время формируются в оперативном режиме с использованием поступающих в реальном времени спутниковых данных, что наиболее актуально в задачах быстрой дистанционной оценки состояния озимых. Однако качество предварительной обработки спутниковых информации, включающей фильтрацию облачности, теней от нее и создание композитных изображений, заметно повышается при дополнительном использовании временного ряда наблюдений, полученных через некоторое время после создания оперативной карты. Запланированное обновление архивных карт озимых культур на основе улучшенных спутниковых данных позволит обеспечить дальнейшее повышение их точности и достоверности при решении задач оценки состояния и площадей озимых за предыдущие годы. Информационные продукты, отражающие пространственное размещение посевов озимых культур, доступны пользователям сервиса ВЕГА (http://pro-vega.ru/) (Лупян и др., 2011, 2014).

Литература

1. *Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В.* Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2017. 208 с.
2. *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.
3. *Воробьева Н.С., Сергеев В.В., Чернов А.В.* Информационная технология раннего распознавания видов сельскохозяйственных культур по космическим снимкам // Компьютерная оптика. 2016. Т. 40. № 6. С. 929–938. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-929-938.
4. *Лупян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С.* Наблюдение аномально раннего развития сельскохозяйственных культур в южных регионах России весной 2016 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 2. С. 240–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-240-243.
5. *Лупян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С., Плотников Д.Е., Толпин В.А.* Наблюдение раннего развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2017 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 2. С. 268–272. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-268-272.
6. *Лупян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Жарко В.О., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю.* Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 215–232.
7. *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. 247–267.
8. *Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е.* Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности (ВЕГА) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 190–198.
9. *Плотников Д.Е., Барталев С.А., Лупян Е.А.* Метод детектирования летне-осенних всходов озимых культур по данным радиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2008. Выпуск 5. Т. 2. С. 322–330.
10. *Плотников Д.Е., Барталев С.А., Хвостиков С.А.* Метод итеративной экспансии обучающей выборки и его применение для распознавания озимых культур по спутниковым данным // 11-я всероссийская открытая конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». Москва, ИКИ РАН, 11–15 ноября 2013: сборник тезисов конференции. М: ИКИ РАН, 2013. С. 346.
11. *Плотников Д.Е., Миклашевич Т.С., Барталев С.А.* Восстановление временных рядов данных дистанционных измерений методом полиномиальной аппроксимации в скользящем окне переменного размера // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 2. С. 103–110.
12. *Терехин Э.А.* Применение данных дистанционного зондирования для мониторинга посевов озимых культур Белгородской области // География и природные ресурсы. 2015. № 3. С. 175–181.
13. *Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М.* Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса ВЕГА // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 7(306). С. 581–586.
14. *Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A.* A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data // Remote Sensing Letters. 2014. Vol. 5 (1). P. 55–64. DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.
15. *Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A.* Mapping of arable land in Russia using multiyear time series of MODIS data and the LAGMA classification technique // Remote Sensing Letters. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 269–278. DOI: 10.1080/2150704X.2015.1130874.
16. *Breiman L.* Random Forests // Machine Learning, 2001. Vol. 45 (1). DOI: 10.1023/A:1010933404324.
17. *Mingwei Z., Qingbo Z., Zhongxin C., Jia L., Yong Z., Chongfa C.* Crop discrimination in Northern China with double cropping systems using Fourier analysis of time-series MODIS data // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2008. Vol. 10. P. 476–485.
18. *Richardson A.J., Weigand C.L.* Distinguishing vegetation from soil background information // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1977. Vol. 43. P. 1541–1552.
19. *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. DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.026
20. *Stehman S.V.* Selecting and Interpreting Measures of Thematic Classification Accuracy // Remote Sensing of Environment. 1997. Vol. 62. P. 77–89. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00083-7.
21. *Wardlow B., Egbert S.* Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: An assessment for the U.S. Central Great Plains // Remote Sensing of Environment. 2008. Vol. 112. P. 1096–1116.

Accuracy assessment for winter crops mapping in spring-summer growing season with MODIS data

D.E. Plotnikov, S.A. Bartalev, E.A. Loupian, V.A. Tolpin

Space Research Institute RAS, Moscow, Russia
E-mail: dmitplot@d902.iki.rssi.ru

Over the past few years IKI RAS was able to develop methods for automatic winter crops mapping with time series of remote sensing data. Fifteen-year-long time series of winter crops maps were calculated for the area of their sustainable cultivation with a spatial resolution of 250 meters. With VEGA family systems development, primarily aimed at crops remote monitoring and their state analysis, it was made possible to store and assess ground truth data for dozens of thousands of cropland parcels sown with winter crops and other crop species. The paper describes the approach for and results of validation for automatically calculated winter crops maps based on representative and spatially distributed ground truth data for dozens of regions in Russian Federation. It is shown, that region-level accuracy of winter crops maps validated against in-situ data ranges from 70 to 98%. Scatter plots show high correlation of maps-extracted and official regional statistics data. The results obtained show that these maps are suitable for winter crops state assessment at the "rayon" (sub-region) level as well as for winter crops area estimation for large agricultural regions.

Keywords: remote sensing, mapping methods, winter crops, validation

Accepted: 26.07.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-132-145

References

1. Bartalev S.A., Egorov V.A., Zharko V.O., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2017, 208 p.
2. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Uvarov I.A., Raspoznavanie pakhotnykh zemel' na osnove mnogoletnikh sputnikovykh dannykh spektroradiometra MODIS i lokal'no-adaptivnoi klassifikatsii (Recognition of arable lands using multi-annual satellite data from spectroradiometermodis and locally adaptive supervised classification), *Komp'yuternayaoptika*, 2011, Vol. 35, No. 1, pp. 103–116.
3. Vorob'eva N.S., Sergeev V.V., Chernov A.V., Informatsionnaya tekhnologiya rannego raspoznavaniya vidov sel'skokhozyaistvennykh kul'tur po kosmicheskim snimkam (Information technology of early crop identification by using satellite images), *Komp'yuternaya optika*, 2016, Vol. 40, No. 6, pp. 929–938. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-6-929-938.
4. Loupian E.A., Bartalev S.A., Krasheninnikova Yu.S., Nablyudenie anomal'no rannego razvitiya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v yuzhnykh regionakh Rossii vesnoi 2016 goda na osnove dannykh distantsionnogo monitoringa (Observing an abnormally early development of crops in the southern regions of Russia in spring 2016 using remote monitoring data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 2, pp. 240–243. DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-2-240-243.
5. Loupian E.A., Bartalev S.A., Krasheninnikova Yu.S., Plotnikov D.E., Tolpin V.A., Nablyudenie rannego razvitiya ozimykh kul'tur v yuzhnykh regionakh evropeiskoi chasti Rossii vesnoi 2017 goda na osnove dannykh distantsionnogo monitoringa (Observation of early development of winter crops in spring 2017 in southern regions of Russia based on remote sensing data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 2, pp. 268–272. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-268-272.
6. Loupian E.A., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Zharko V.O., Krasheninnikova Yu.S., Oksyukevich A.Yu., Ispol'zovanie sputnikovogo servisa VEGA v regional'nykh sistemakh distantsionnogo monitoringa (VEGA satellite service applications in regional remote monitoring systems), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 3, pp. 215–232.
7. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskii A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (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, pp. 247–267.
8. Loupian E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E., Sputnikovyi servismonitoringa sostoyaniya rastitel'nosti (VEGA) (Satellite service for vegetation monitoring VEGA), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198.
9. Plotnikov D.E., Bartalev S.A., Loupian E.A., Metod detektirovaniya letne-osennikh vskhodov ozimykh kul'tur po dannym radiometra MODIS (The method for wintercrops mapping in summer-fall growing season with MODIS radiometer data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, Issue 5, Vol. 2, pp. 322–330.

10. Plotnikov D.E., Bartalev S.A., Khvostikov S.A., Metod iterativnoi ekspansii obuchayushchei vyborki i ego primenenie dlya raspoznavaniya ozimykh kul'tur po sputnikovym dannym (The method of training set iterative expansion and its usage for wintercrops mapping with remote sensing data), *11th vserossiiskaya otkrytaya konferentsiya "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa"* (11th All-Russia Open Conference ''Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space''), Moscow, IKI RAN, 11–15 Nov. 2013, Book of Abstracts, 2013, p. 346.
11. Plotnikov D.E., Miklashevich T.S., Bartalev S.A., Vosstanovlenie vremennykh ryadov dannykh distantsionnykh izmerenii metodom polinomial'noi approksimatsii v skol'zyashchem okne peremennogo razmera (Using local polynomial approximation within moving window for remote sensing data time-series smoothing and data gaps recovery), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110.
12. Terekhin E.A., Primenenie dannykh distantsionnogo zondirovaniya dlya monitoringa posevov ozimykh kul'tur Belgorodskoi oblasti (Remote sensing data application for wintercrops monitoring in Belgorod oblast)*, Geografiya i prirodnyeresursy*, 2015, No. 3, pp. 175–181.
13. Tolpin V.A., Loupian E.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M., Vozmozhnosti analiza sostoyaniya sel'skokhozyaistvennoi rastitel'nosti s ispol'zovaniem sputnikovogo servisa VEGA (Possibilities of agricultural vegetation condition analysis with the VEGA satellite service), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7 (306), pp. 581–586.
14. Bartalev S.A., Egorov V.A., Loupian E.A., Khvostikov S.A., A new locally-adaptive classification method LAGMA for large-scale land cover mapping using remote-sensing data, *Remote Sensing Letters*, 2014, Vol. 5 (1), pp. 55–64. DOI: 10.1080/2150704X.2013.870675.
15. Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Loupian E.A., Mapping of arable land in Russia using multiyear time series of MODIS data and the LAGMA classification technique, *Remote Sensing Letters*, 2016, Vol. 7, No. 3, pp. 269–278. DOI: 10.1080/2150704X.2015.1130874.
16. Breiman L., Random Forests, *Machine Learning*, 2001, Vol. 45 (1), DOI: 10.1023/A:1010933404324.
17. Mingwei Z., Qingbo Z., Zhongxin C., Jia L., Yong Z., Chongfa C., Crop discrimination in Northern China with double cropping systems using Fourier analysis of time-series MODIS data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2008, Vol. 10, pp. 476–485.
18. Richardson A.J., Weigand C.L., Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, Vol. 43, pp. 1541–1552.
19. 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, pp. 244–258. DOI: 10.1016/j.rse.2017.04.026.
20. Stehman S.V., Selecting and Interpreting Measures of Thematic Classification Accuracy, *Remote Sensing of Environment*, 1997, Vol. 62, pp. 77–89. DOI: 10.1016/S0034-4257(97)00083-7.
21. Wardlow B., Egbert S., Large-area crop mapping using time-series MODIS 250 m NDVI data: An assessment for the U.S. Central Great Plains, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, pp. 1096–1116.