

Возможности региональной оценки качества зерна озимой пшеницы на основе спутниковых данных дистанционного зондирования

Ф.В. Ерошенко¹, С.А. Барталев², В.В. Кулинцев¹, И.Г. Сторчак¹, Е.О. Шестакова¹,
Т.В. Симатин¹

¹ *Ставропольский научно-исследовательский институт сельского хозяйства
Михайловск, Ставропольский край, 356241, Россия
E-mail: yer-sniish@mail.ru*

² *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: bartalev@smis.iki.rssi.ru*

Разработка объективных и оперативных методов контроля хода формирования и прогноза качества будущего урожая зерновых сельскохозяйственных культур с использованием спутниковых данных дистанционного зондирования является важной научной задачей. Предположение о существовании связи между данными дистанционных измерений отражательных характеристик посевов озимой пшеницы и качеством выращиваемого зерна основаны на совокупном учете наличия связи последнего с обеспеченностью растений азотом, тесных корреляционных зависимостей между содержанием в них азота и хлорофилла, а также между концентрацией хлорофилла и значениями нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI. Проведенный анализ данных по качеству зерна озимой пшеницы на территории Ставропольского края за период 2003–2016 гг. и регулярных спутниковых измерений NDVI посевов с использованием спектрорадиометра MODIS показал, что на различных фазах развития озимой пшеницы существует обратная связь между значениями вегетационного индекса и долей зерна высокого качества в валовом урожае. При этом наиболее тесная связь (коэффициент корреляции $-0,82$) наблюдается с измерениями NDVI посевов, выполненными во время фазы формирования зерновки озимой пшеницы. В условиях Ставропольского края статистически значимая корреляционная связь показателей качества зерна озимой пшеницы с величиной NDVI проявляется в период между 10-й и 22-й календарными неделями года.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI, озимая пшеница, качество зерна

*Одобрена к печати: 27.11.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-153-165*

Введение

Повышение устойчивого производства зерна озимой пшеницы высокого качества является важной задачей отечественной аграрной науки и сельскохозяйственного производства в России. Решение этой задачи связано, в том числе, с разработкой надежных и оперативных методов мониторинга состояния посевов, прогноза будущего урожая и его качества. В последние годы для этих целей все более широкое использование находят методы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) со спутников, позволяющие получать необходимую информацию о посевах на различных уровнях пространственной агрегации, в том числе в разрезе отдельных полей, административных районов, субъектов РФ или страны в целом (Лупян, Барталев, Савин, 2009). К числу основных достоинств методов ДЗЗ для решения задач сельскохозяйственного мониторинга могут быть отнесены возможность их применения на больших территориях, оперативность, объективность и пространственно-временная однородность получаемых оценок.

При этом достаточно большое число исследований и разработок в области методов дистанционного мониторинга сельского хозяйства посвящено решению ключевой задачи оценки и прогноза будущего урожая (Савин и др., 2010). Для этой цели, в частности, находят широкое

применение спутниковые данные о сезонной динамике значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI, позволяющие оценивать физиологическое состояние посевов и прогнозировать величину будущего урожая (Барталев и др., 2017; Куссуль и др., 2012; Муратова, Терехов, 2007; Сторчак, Ерошенко, 2014).

Вместе с тем ключевой вопрос возможностей дистанционной оценки качества урожая в научной литературе к настоящему времени пока еще не нашел должного отражения. Целью представленных в настоящей работе результатов исследований является установление связей между данными регулярных спутниковых измерений отражательных характеристик посевов озимой пшеницы и показателями качественной структуры производимого зерна с целью разработки дистанционных методов контроля хода его формирования и прогноза качества будущего урожая.

Исходные данные и методы исследования

Исследования возможностей дистанционной оценки качества зерна проводились на примере посевов озимой пшеницы, выращенных в 2003–2017 гг. в Ставропольском крае, являющемся одним из лидирующих в России регионов по производству продовольственной пшеницы (Давидянц, Ерошенко, 2017), репрезентативным для разработки методологии, способной найти широкое применение.

Многолетние данные по качеству зерна выращенной в крае озимой пшеницы представлены Ставропольским филиалом ФГБУ «Федеральный центр оценки безопасности и качества зерна и продуктов его переработки». Среди представленных государственными стандартами (ГОСТ 52554-2006) показателей качества зерна озимой пшеницы для характеристики урожая на уровне административно-территориальных образований (муниципальный район, субъект РФ) наиболее употребимыми являются выраженные в процентах значения доли веса в валовом сборе продовольственного зерна четырех различных классов, отличающихся содержанием сырой клейковины. При этом для продовольственного зерна установлен минимальный порог содержания клейковины 18%, а пшеница, для которой этот показатель превышает 23% (выше 3-го класса), относится к высококачественной.

Многолетняя динамика показателей доли веса продовольственного зерна и высококачественного зерна от валового сбора озимой пшеницы в Ставропольском крае представлена на *рис. 1*.

Анализ данных показывает, что в Ставропольском крае за последние годы отмечается выраженная тенденция к снижению качества зерна. Если в 2001–2005 гг. доля пшеницы 3-го класса в среднем составляла 47,5%, то в 2011–2015 гг. она снизилась до 31,3%. В 2016 г. было получено всего около 18% высококачественного зерна, что является самым низким показателем за всю официально документированную историю выращивания озимых в регионе, в то время как доля продовольственной пшеницы в общем объеме производимого зерна остается достаточно высокой, достигая почти 70%.

Временные ряды значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы получены с помощью сервиса ВЕГА (<http://pro-vega.ru/>) (Лупян и др., 2011; Толпин и др., 2014) по данным спектрорадиометра MODIS со спутника Terra, выполняющего, в частности, измерения отраженного излучения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах длин волн с пространственным разрешением 250 м. При этом использовались очищенные от влияния облаков и других мешающих факторов временные ряды еженедельных данных NDVI, осредненные в пределах масок посевов озимых культур, получаемых по данным инструмента MODIS (Плотников и др., 2017).

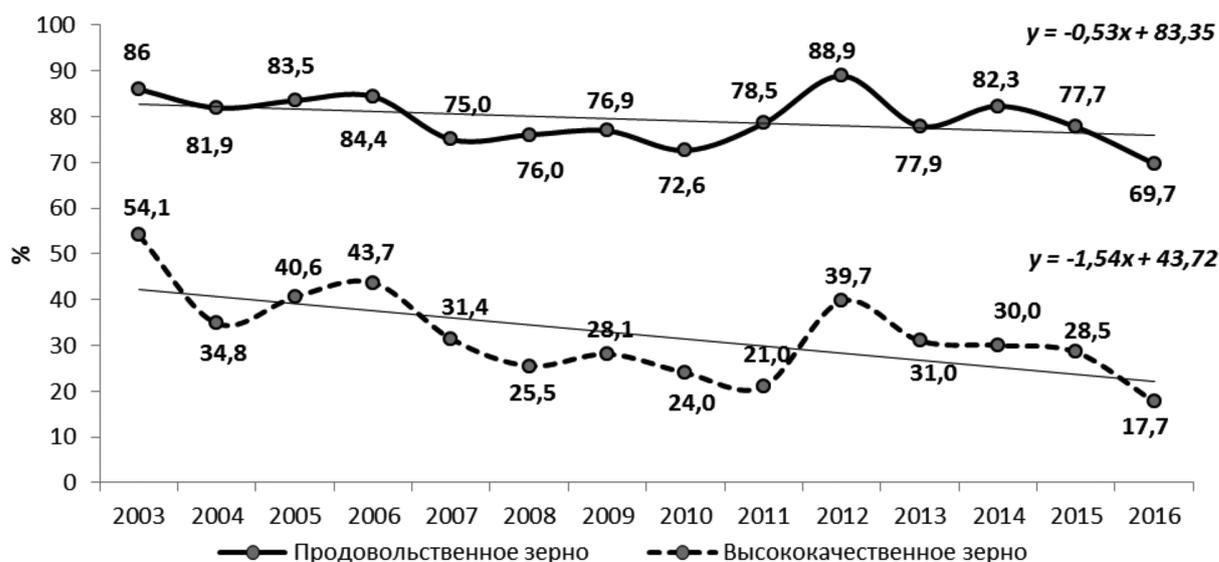


Рис. 1. Динамика показателей качества (% веса) продовольственного и высококачественного зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае

В своем анализе мы пользовались данными усредненных значений NDVI озимых культур в Ставропольском крае для установления искомым взаимосвязей с показателями качества пшеницы. Уместность такого допущения объясняется доминирующим положением пшеницы в структуре посевов озимых культур Ставропольского края, занимающей 94–97% их площади. Необходимо также учитывать сходство биологических особенностей пшеницы и ячменя, площадь которого в структуре посевов озимых доходит до 4%.

Предположения о наличии связи между значениями NDVI и показателями качества зерна озимой пшеницы основаны на следующих закономерностях, полученных в наших исследованиях и подтвержденных литературными данными:

- 1) качество зерна озимой пшеницы зависит от обеспеченности растений азотом (Гаркуша и др., 2000; Кулинцев и др., 2014);
- 2) существует тесная корреляционная связь между содержанием в растениях озимой пшеницы азота и хлорофилла (Андриянова, Тарчевский, 2000; Сторчак, 2016);
- 3) между концентрацией хлорофилла в растениях озимой пшеницы и NDVI существует обратная корреляционная связь (Ерошенко, Сторчак, Шестакова, 2015; Ерошенко и др., 2016).

Полученные с помощью сервиса ВЕГА (<http://pro-vega.ru/>) данные NDVI для каждого года мы связали с определенными фазами роста и развития озимой пшеницы (рис. 2). Это было сделано с учетом продолжительности этапов органогенеза и исходя из экспериментально проверенного предположения о соответствии момента достижения сезонного максимума NDVI посевов озимой пшеницы началу фазы колошения растений.

Результаты исследования

Исследования показали (табл. 1, рис. 3), что максимально сильная обратная корреляционная связь NDVI с долей высококачественного зерна озимой пшеницы соответствует фазе формирования зерновки (коэффициент корреляции $-0,82$), а с долей продовольственного зерна — фазам колошения и цветения (коэффициент корреляции $-0,76$). Следует отметить, что полученные коэффициенты корреляции во все фазы роста и развития растений озимой пшеницы статистически значимы ($p=0,01$). Следовательно, для Ставропольского края имеется возможность с различной степенью достоверности прогнозировать качество зерна озимой пшеницы будущего урожая, начиная с момента возобновления весенней вегетации до фазы восковой спелости.

Таблица 1. Связь показателей качества зерна озимой пшеницы со значениями NDVI посевов в различные фазы их развития

Фаза развития	Для высококачественного зерна		Для продовольственного зерна	
	R_{corr}	Уравнения регрессии	R_{corr}	Уравнения регрессии
Возобновление весенней вегетации	-0,60	$y = -77,01x + 66,08$	-0,69	$y = -49,27x + 101,09$
Весеннее кущение	-0,59	$y = -65,47x + 63,71$	-0,71	$y = -43,35x + 100,2$
Конец весеннего кущения	-0,55	$y = -59,27x + 63,63$	-0,68	$y = -40,54x + 100,91$
Начало выхода в трубку	-0,56	$y = -67,46x + 72,37$	-0,67	$y = -44,45x + 105,88$
Выход в трубку	-0,60	$y = -89,38x + 90,97$	-0,66	$y = -54,85x + 115,47$
Трубкавание	-0,60	$y = -120,66x + 117,75$	-0,60	$y = -66,26x + 126,38$
Стебление	-0,72	$y = -154,67x + 148$	-0,72	$y = -85,82x + 143,66$
Колошение	-0,75	$y = -148,07x + 145,4$	-0,76	$y = -83,26x + 143,06$
Цветение	-0,77	$y = -143,83x + 140,37$	-0,76	$y = -78,22x + 138,24$
Формирование зерновки	-0,82	$y = -137x + 130,41$	-0,73	$y = -67,02x + 127,44$
Молочная спелость	-0,76	$y = -110,17x + 104,04$	-0,60	$y = -47,97x + 110,68$
Молочно-восковая спелость	-0,70	$y = -79,95x + 77,80$	-0,57	$y = -36,125x + 100$
Восковая спелость	-0,60	$y = -69,05x + 65,21$	-0,52	$y = -32,72x + 95,042$

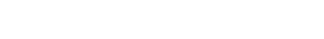
Фазы Развития растений	Всходы		Кущение осеннее, весеннее		Начало вы- хода в трубку	Выход в трубку, стеблевание			Колошение	Цветение	Рост зернов- ки	Налив зерна	Полная спе- лость	
	I	II	III	IV		V	VI	VII						VIII
Этапы органогенеза														
	Средняя продолжи- тельность этапов	160 (осень, зима)				15	4	10	6	5	12	23	8	
Элементы продуктив- ности	Густота посе- ва (шт./м ²)	460	370										Масса 1000 зёрен (г) кол- во продуктивных стеблей (шт./м ²)	
Благоприятные годы		3,5	1,5	18	165	2,4	9-10	30-36					38-40 / 540	
Засушливые годы			7	12	115	1-2	6-8	24-30					34-38/400	

Рис. 2. Фазы развития и этапы органогенеза озимой пшеницы (Кулинец и др., 2013)

Построенные уравнения регрессии могут быть использованы для прогноза (оценки) долей высококачественного и продовольственного зерна на каждой фазе роста и развития озимой пшеницы. Полученный таким образом временной ряд значений будет отражать ход формирования качества зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае в течение периода вегетации.

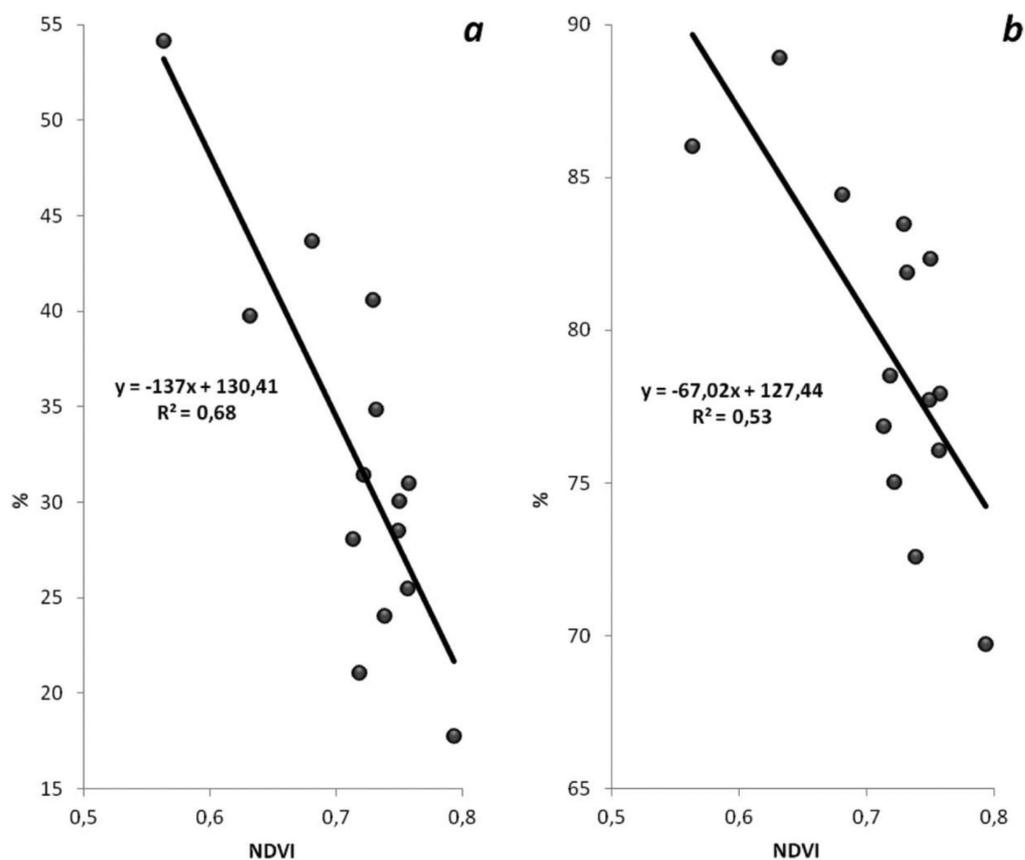


Рис. 3. Зависимости доли высококачественного зерна (а) и продовольственного зерна (б) от значений NDVI в фазу формирования зерновки озимой пшеницы

На рис. 4 представлена динамика формирования качества зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае в 2016 г. Графики показывают, что качественные характеристики зерна имеют довольно большой диапазон варьирования, что, конечно же, связано с условиями роста и развития растений. Следует отметить, что динамика прогноза характеризует лишь потенциальные возможности посевов на определенном этапе роста и развития растений озимой пшеницы сформировать урожай соответствующего качества.

На процесс накопления запасных белков в зерне значительное влияние оказывают такие климатические факторы, как влагообеспеченность, температура воздуха и инсоляция, которые изменяются в течение вегетации растений озимой пшеницы. Кроме того, изменения одного фактора в определенный период роста и развития проходит на фоне изменений других. Поэтому график динамики прогнозируемого качества зерна имеет вид неоднородно меняющейся кривой. В то же время общий тренд изменения рассматриваемых показателей указывает, что в 2016 г. формирование качества зерна озимой пшеницы характеризовалось тенденцией его снижения вплоть до уборки урожая.

Получение урожая озимой пшеницы высокого качества возможно, если в период налива зерна растения хорошо обеспечены азотом, ограничены по влаге при повышенных температурах воздуха, обеспечены интенсивной и богатой ультрафиолетовыми лучами фотосинтетически активной радиацией. Умеренный дефицит влаги и повышенная температура, с одной стороны, активизируют нитрификационную деятельность в почве, что способствует обогащению ее азотом, с другой — усиливают дыхание в растениях, которое сопровождается расходом углеводов (Кулинцев и др., 2013). Эти два процесса способствуют биосинтезу аминокислот и, как следствие, повышению содержания белка в зерне и улучшению его качества.

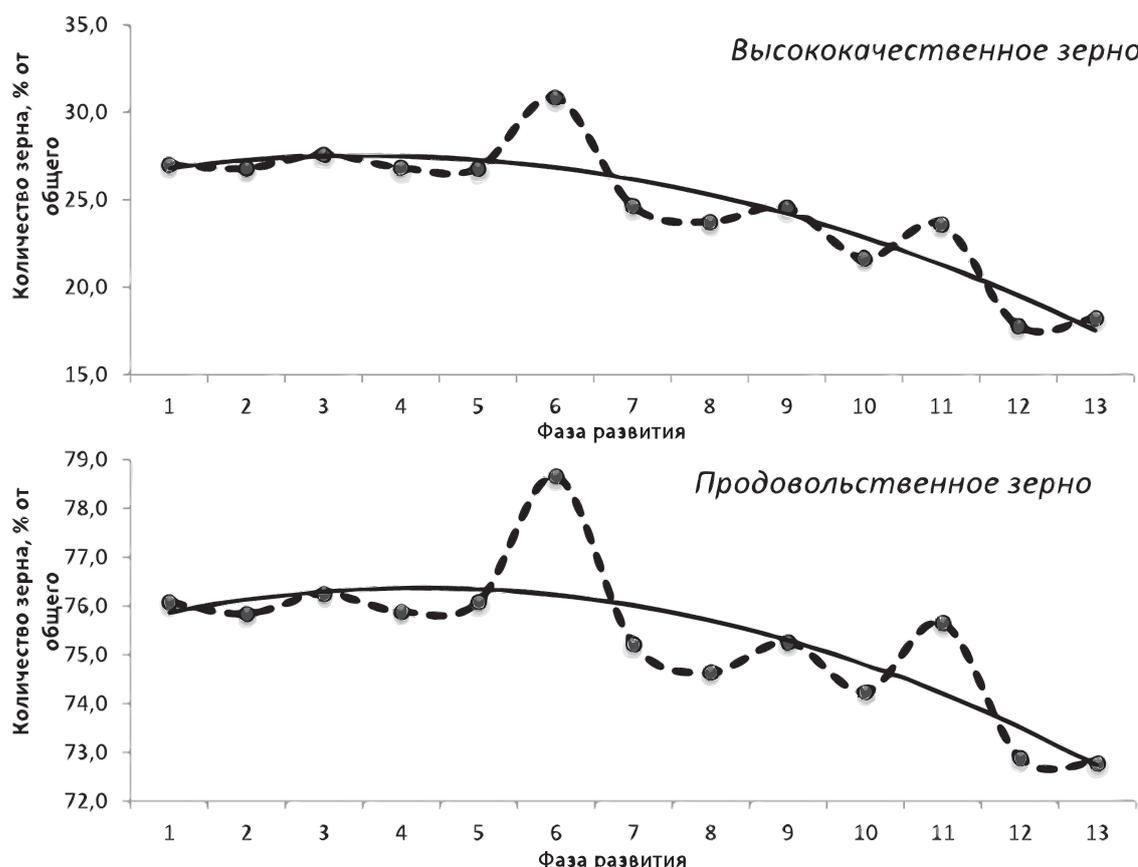


Рис. 4. Динамика формирования качества зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае в 2016 г.:
 1 — возобновление весенней вегетации; 2 — весеннее кущение; 3 — конец весеннего кущения;
 4 — начало выхода в трубку; 5 — выход в трубку; 6 — трубкование; 7 — стеблевание;
 8 — колошение; 9 — цветение; 10 — формирование зерновки; 11 — рост зерновки;
 12 — молочно-восковая спелость; 13 — восковая спелость

По данным гидрометцентра Ставропольского края весенне-летний период 2016 г. характеризовался значительным выпадением осадков. Так, в марте средняя сумма осадков по краю составила 39 мм (142% от климатической нормы), в мае — 95 мм (165% от нормы), в июне — 102 мм (131% от нормы) в июле — 91 мм (156%). Таким образом, весь период роста и развития озимой пшеницы проходил в условиях переувлажнения.

При большей влажности растения испытывают недостаток азота, так как, с одной стороны, в таких условиях формируется большая вегетативная масса, а следовательно, растения

требуют большего количества питательных веществ, с другой стороны, происходит так называемое вымывание азота в более глубокие горизонты почвы. Кроме того, в таких условиях увеличивается продолжительность вегетационного периода и периода формирования и налива зерна, а вместе с тем удлиняется и период отложения углеводов (крахмала). Все это влечет снижение содержания белка в зерне. Более того, повышенная влажность наряду с накоплением суммарного белка в зерне влияет на его фракционный состав — снижается содержание фракции глиадинов (клейковинообразующих белков) и повышается количество водо- и солерастворимых белков (альбуминов и глобулинов и незначительно глютеинов). Снижение белковости зерна в условиях повышенного увлажнения может достигать значительных величин — 3,2–7,7% (Павлов, 1967).

Все это нашло отражение в динамике прогнозируемого качества зерна озимой пшеницы в 2016 г. на Ставрополье. Так, если в период весенней вегетации прогноз высококачественного зерна составлял 27,0% и продовольственного зерна 76,1%, то к концу вегетации эти показатели снизились до 18,2 и 72,8% соответственно. Следует отметить, что по факту в Ставропольском крае в 2016 г. было собрано 17,7% высококачественного зерна, а продовольственного — 69,7%.

Таким образом, для Ставропольского края существует возможность использования вегетационного индекса NDVI как для прогноза качества зерна озимой пшеницы, так и для объективного контроля хода его формирования.

Вместе с тем следует отметить, что использованный метод оценки качества урожая зерна озимой пшеницы требует наличия региональных временных шкал развития растений для определения значений NDVI посевов в соответствии с определенными фенологическими фазами. Для снижения региональной зависимости в применимости метода был проведен анализ связи показателей качества зерна с величиной вегетационного индекса NDVI в фиксированные календарные даты (недели) года. Полученные результаты показали, что начиная с 10-й недели с определенной точностью можно прогнозировать качество будущего урожая зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае. Значимые коэффициенты корреляции при таком подходе проявляются вплоть до 22-й недели, что соответствует фазе формирования зерновки (табл. 2, рис. 5).

Таблица 2. Связь показателей качества зерна озимой пшеницы со значениями NDVI в различные календарные недели года в период роста и развития посевов

№ п/п	Неделя года	Для высококачественного зерна		Для продовольственного зерна	
		R_{corr}	Уравнения регрессии	R_{corr}	Уравнения регрессии
1	9	-0,25	$y = -33,92x + 45,36$	-0,40	$y = -30,44x + 91,23$
2	10	-0,39	$y = -52,62x + 53,15$	-0,50	$y = -37,42x + 94,31$
3	11	-0,52	$y = -69,69x + 60,28$	-0,62	$y = -46,03x + 97,96$
4	12	-0,64	$y = -76,60x + 64,12$	-0,77	$y = -50,69x + 100,53$
5	13	-0,69	$y = -74,06x + 64,85$	-0,84	$y = -49,83x + 101,38$
6	14	-0,75	$y = -71,98x + 66,81$	-0,86	$y = -45,53x + 101,3$

7	15	-0,78	$y = -75,16x + 72,47$	-0,83	$y = -44,23x + 103,12$
8	16	-0,76	$y = -81,00x + 80,45$	-0,73	$y = -42,97x + 105$
9	17	-0,77	$y = -84,97x + 88,01$	-0,70	$y = -42,73x + 107,47$
10	18	-0,79	$y = -98,33x + 101,64$	-0,70	$y = -48,05x + 113,33$
11	19	-0,78	$y = -115,43x + 117,48$	-0,70	$y = -57,2x + 121,66$
12	20	-0,73	$y = -124,05x + 126,01$	-0,68	$y = -63,95x + 127,76$
13	21	-0,55	$y = -109,6x + 114,24$	-0,48	$y = -53,25x + 119,26$
14	22	-0,51	$y = -102,55x + 106$	-0,46	$y = -51,47x + 116,44$
15	23	-0,29	$y = -48,15x + 63,94$	-0,24	$y = -21,56x + 93,61$
16	24	-0,07	$y = -9,48x + 37,52$	0,01	$y = 0,93x + 78,85$

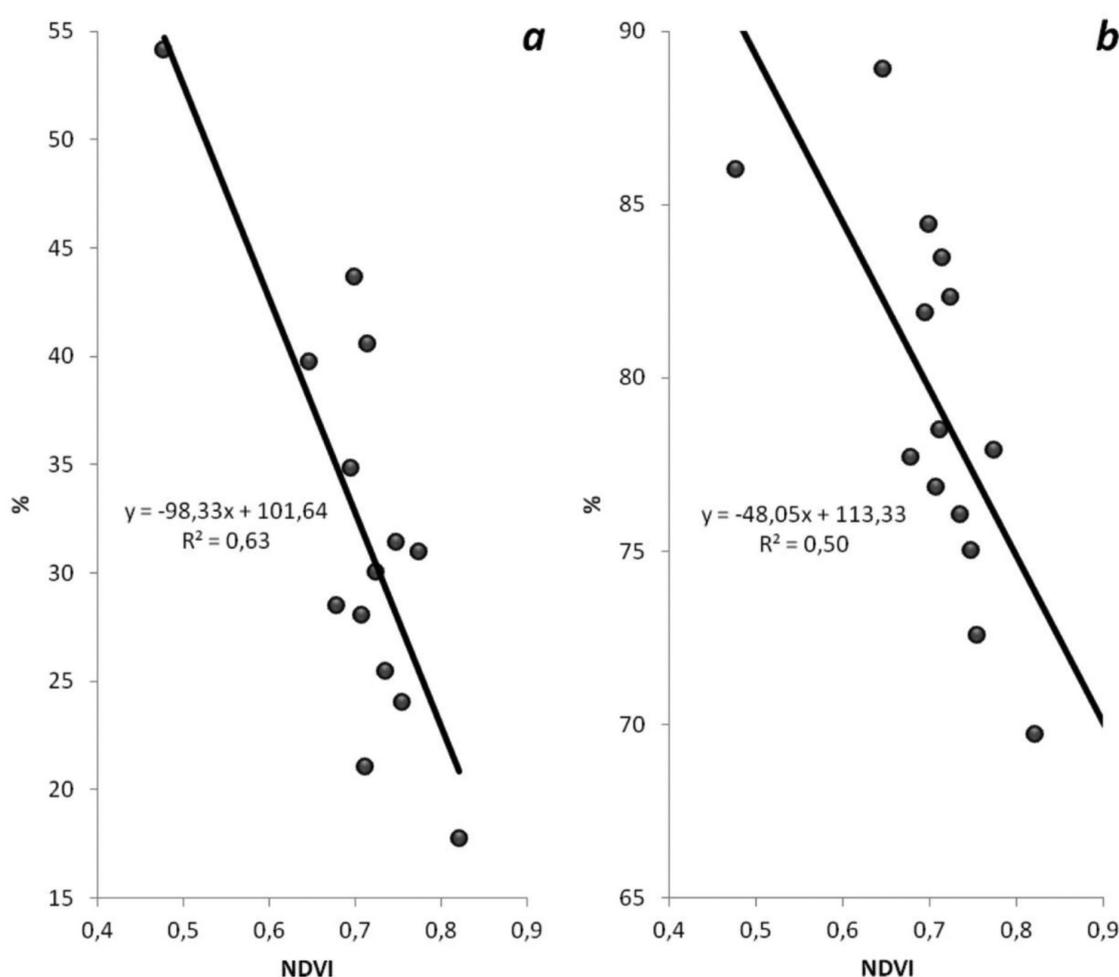


Рис. 5. Зависимости доли высококачественного зерна (а) и продовольственного зерна (б) от значений NDVI озимых культур в 18-ю неделю года

Таким образом, в период между 10-й по 22-й календарными неделями года существует значимая обратная корреляционная связь между NDVI посевов озимой пшеницы в Ставропольском крае и качеством зерна будущего урожая.

На основании полученных результатов, начиная с возобновления весенней вегетации 2017 г., нами в течение всего периода роста и развития озимой пшеницы давались прогнозы

качества зерна в Ставропольском крае, соответствовавшие состоянию посевов на момент прогнозирования (рис. 6).

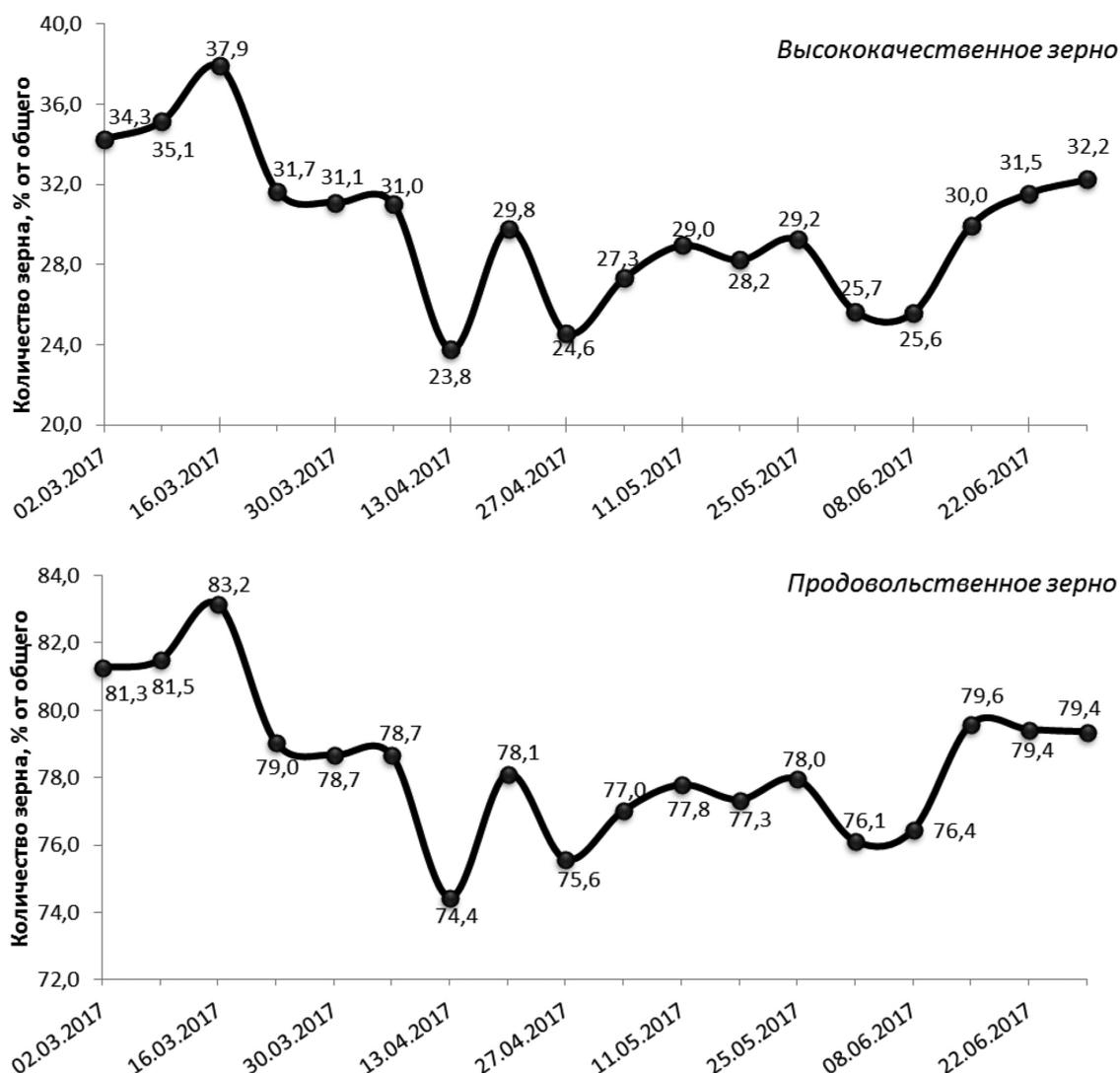


Рис. 6. Прогноз качества зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае в 2017 г.

Заключение

Полученные результаты свидетельствуют, что для Ставропольского края существует обратная связь между значениями вегетационного индекса NDVI и показателями качества зерна озимой пшеницы. Наиболее тесной она наблюдается в фазу формирования зерновки озимой пшеницы (коэффициент корреляции $-0,82$). Кроме того, в период между 10-й и 22-й календарными неделями года проявляется статистически значимая корреляционная связь показателей качества зерна озимой пшеницы с величиной NDVI.

Результаты исследований дают возможность использовать данную методологию при их распространении на другие территории, где возделывается озимая пшеница.

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.

Проведение исследований ИКИ РАН в рамках данной работы осуществлялось при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», тема НИР «Развитие автоматизированных методов и информационных технологий глобального спутникового мониторинга сельского хозяйства в поддержку программы GEOGLAM», соглашение о предоставлении субсидии от 18 ноября 2015 г. № 14.616.21.0063).

Литература

1. Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А. Хлорофилл и продуктивность растений. М.: Наука, 2000. 135 с.
2. Барталев С.А., Елкина Е.С., Лупян Е.А., Плотников Д.Е., Толпин В.А. Дистанционная оценка озимых культур урожая 2017 года в Российской Федерации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 4. С. 275–280. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-275-280.
3. Гаркуша В.Ф., Уманов С.С., Петрова Л.Н., Чернов А.Я., Рындин В.М., Нешин И.В., Черкашин В.Н., Титенок Л.Н., Абалдов А.Н., Глебов А.И., Липкович Э.И., Беспмятнова Н.М., Рыков В.Б., Бондаренко А.М., Таранин В.И., Щилов В.Н., Богданович В.П., Зайцев Д.К., Бочаров И.И., Богатырев В.И., Солодкий К.В., Шевелев М.М., Удовиченко А.Д., Бурбель А.Ф. Технология возделывания зерновых колосовых культур в Ставропольском крае. Рекомендации. Ставрополь-Зерноград: Изд-во ВНИПТИМЭСХ, 2000. 84 с.
4. Давидянц Э.С., Ерошенко Ф.В. Состояние, тенденции и пути оптимизации производства качественного зерна озимой пшеницы в ставропольском крае // Достижения науки и техники АПК. 2017. № 6. С. 21–26.
5. Ерошенко Ф.В., Сторчак И.Г., Шестакова Е.О. Состояние посевов озимой пшеницы и NDVI как их оптико-биологическая характеристика // Бюллетень Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства. 2015. № 7. С. 102–110.
6. Ерошенко Ф.В., Барталев С.А., Сторчак И.Г., Плотников Д.Е. Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 99–112.
7. Кулинец В.В., Годунова Е.И., Желнакова Л.И., Удовыдченко В.И., Петрова Л.Н., Антонов С.А., Андреев Д.Ю., Черкашин В.Н., Дридигер В.К., Дзыбов Д.С., Кравцов В.В., Ерошенко Ф.В., Куприченко М.Т., Ковтун В.И., Багринцева В.Н., Кузыченко Ю.А., Шустикова Е.П., Хрипунов А.И., Шаповалова Н.Н., Чертов В.Г., Володин А.Б., Комаров Н.М., Лапенко Н.Г., Галушко Н.А., Давидянц Э.С., Чапцев А.Н., Чапцева Т.В., Шлыкова Т.Д., Браткова Л.Г., Чумакова В.В., Ерошенко А.А., Ходжаева Н.А., Федотов А.А. Система земледелия нового поколения Ставропольского края. Ставрополь: АГРУС Ставроп. гос. аграрного ун-та, 2013. 520 с.
8. Кулинец В.В., Годунова Е.И., Нешин И.В., Дуденко Н.В., Ерошенко Ф.В., Орехова А.Н., Ерошенко А.А., Черкашин В.Н., Черкашин Г.В., Малыхина А.Н., Шаповалова Н.Н., Хрипунов А.И. Рекомендации по научному обоснованному уходу за посевами озимой пшеницы для повышения урожайности зерна и его качества. Ставрополь: АГРУС, 2014. 32 с.
9. Куссуль Н.Н., Кравченко А.Н., Скакун С.В., Адаменко Т.И., Шелестов А.Ю., Колотий А.В., Грипич Ю.А. Регрессионные модели оценки урожайности сельскохозяйственных культур по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 1. С. 95–107.
10. Лупян Е.А., Барталев С.А., Савин И.Ю. Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России // Аэрокосмический курьер. 2009. № 6. С. 47–49.
11. 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.
12. Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугова 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.
13. Муратова Н.Р., Терехов А.Г. Опыт пятилетнего оперативного мониторинга сельскохозяйственных угодий Северного Казахстана с помощью спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2007. Т. 4. № 2. С. 277–283.

14. Павлов А.Н. Накопление белка в зерне пшеницы и кукурузы. М.: Наука, 1967. 339 с.
15. Плотников Д.Е., Барталев С.А., Луян 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.
16. Савин И.Ю., Барталев С.А., Луян Е.А., Толпин В.А., Хвостиков С.А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 3. С. 275–285.
17. Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В. Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12–15.
18. Сторчак И.Г. Прогноз урожайности озимой пшеницы с использованием вегетационного индекса NDVI для условий Ставропольского края: дис. ... канд. сельскохоз. наук. Ставрополь: Ставропольский гос. аграрн. ун-т, 2016. 160 с.
19. Толпин В.А., Луян 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.

Possibilities for regional assessment of winter wheat grains quality based on Earth observation data

F.V. Eroshenko¹, S.A. Bartalev², V.V. Kulintsev¹, I.G. Storchak¹, E.O. Shestakova¹, T.V. Simatin¹

¹ *Stavropol Research Institute of Agriculture, Mikhailovsk, Stavropol region 356241, Russia*
E-mail: yer-sniish@mail.ru

² *Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia*
E-mail: bartalev@smis.iki.rssi.ru

Development of the methods for crops grow operative monitoring and forecasting of the grain quality using Earth observation data is an important scientific task. An assumption on the existence of strong relationships between satellite measurements of winter wheat crops reflectance and their grain quality is based on known correlations with nitrogen supply to the plants, as well as the link between nitrogen and chlorophyll contents, and also between the chlorophyll concentration and the values of the normalized difference vegetation index NDVI. An analysis of data on winter wheat grain quality in the Stavropol region for the period 2003–2016 and regular crops NDVI measurements using MODIS instrument has shown that at different winter wheat development phases, there is an inverse relationship between the NDVI values and the high-quality grain share in the crop gross production. At the same time, a strong relationship ($R = -0.82$) between the winter wheat NDVI measurements at the grain formation phase and the grain quality has been observed. The statistically significant correlation is also shown between the winter wheat grain quality and NDVI measured at the 10th and 22nd calendar weeks of a year.

Keywords: remote sensing data, normalized difference vegetation index NDVI, winter wheat, grain quality

Accepted: 27.11.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-7-153-165

References

1. Andrianova Yu.E., Tarchevskii I.A. *Khlороfill i produktivnost' rastenii* (Chlorophyll and plant productivity), Moscow: Nauka, 2000, 135 p.
2. Bartalev S.A., Elkina E.S., Loupian E.A., Plotnikov D.E., Tolpin V.A., Distantcionnaya otsenka ozimyykh kul'tur urozhaya 2017 goda v Rossiiskoi Federatsii (Remote assessment of winter crops of the crop in 2017 in the Russian Federation), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 275–280. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-275-280.
3. Garkusha V.F., Umanov S.S., Petrova L.N., Chernov A.Ya., Ryndin V.M., Neshin I.V., Cherkashin V.N., Titenok L.N., Abaldov A.N., Glebov A.I., Lipkovich E.I., Bepamjatnova N.M., Rykov V.B., Bondarenko A.M., Taranin V.I., Shhirov V.N., Bogdanovich V.P., Zaycev D.K., Bocharov I.I., Bogatyrev V.I., Solodkiy K.V., Shevelev M.M., Udovichenko A.D., Burbel A.F., *Tekhnologiya vozdeleyvaniya zernovykh kolosovykh kul'tur*

- v Stavropol'skom krae. Rekomendatsii (Technology of cultivation of cereal grains in the Stavropol Territory. Recommendations), Stavropol'-Zernograd: Izd-vo VNIPTIMESKh, 2000, 84 p.
4. Davidiyants E.S., Eroshenko F.V., Sostoyanie, tendentsii i puti optimizatsii proizvodstva kachestvennogo zerna ozimoi pshenitsy v stavropol'skom krae (State, Trends and Ways to Optimize the Production of Quality Wheat of Winter Wheat in the Stavropol Territory), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2017, No. 6, pp. 21–26.
 5. Eroshenko F.V., Storchak I.G., Shestakova E.O., Sostoyanie posevov ozimoi pshenitsy i NDVI kak ikh optiko-biologicheskaya kharakteristika (State of winter wheat and NDVI crops as their optical-biological characteristics) *Byulleten' Stavropol'skogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skogo khozyaistva*, 2015, No. 7, pp. 102–110.
 6. Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Storchak I.G., Plotnikov D.E., Vozmozhnosti distantsionnoi otsenki urozhainosti ozimoi pshenitsy na osnove vegetatsionnogo indeksa fotosinteticheskogo potentsiala (Possibilities of remote evaluation of the yield of winter wheat on the basis of vegetative index of photosynthetic potential), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2016, Vol. 13, No. 4, pp. 99–112.
 7. Kulintsev V.V., Godunova E.I., Zhelnakova L.I., Udovydchenko V.I., Petrova L.N., Antonov S.A., Andreyanov D. Ju., Cherkashin V.N., Dridiger V.K., Dzybov D.S., Kravtsov V.V., Eroshenko F.V., Kuprichenkov M.T., Kovtun V.I., Bagrintseva V.N., Kuzychenko Yu.A., Shustikova E.P., Hripunov A.I., Shapovalova N.N., Chertov V.G., Volodin A.B., Komarov N.M., Lapenko N.G., Galushko N.A., Davidiyants Je.S., Chaptsev A.N., Chaptseva T.V., Shlykova T.D., Bratkova L.G., Chumakova V.V., Eroshenko A.A., Khodzhaeva N.A., Fedotov A.A., *Sistema zemledeliya novogo pokoleniya Stavropol'skogo kraya* (The system of agriculture of the new generation of the Stavropol Territory), Stavropol': AGRUS Stavropol. gos. agrarnogo un-ta, 2013, 520 p.
 8. Kulintsev V.V., Godunova E.I., Neshin I.V., Dudenko N.V., Eroshenko F.V., Orekhova A.N., Eroshenko A.A., Cherkashin V.N., Cherkashin G.V., Malykhina A.N., Shapovalova N.N., Khripunov A.I., *Rekomendatsii po nauchnomu obosnovannomu ukhodu za posevami ozimoi pshenitsy dlya povysheniya urozhainosti zerna i ego kachestva* (Recommendations on the scientifically grounded care of winter wheat crops for increasing the yield of grain and its quality), Stavropol', 2014.
 9. Kussul' N.N., Kravchenko A.N., Skakun S.V., Adamenko T.I., Shelestov A.Yu., Kolotii A.V., Gripich Yu.A., Regressionnye modeli otsenki urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur po dannym MODIS (Regression models for yield estimation of agricultural crops according to the MODIS), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 1, pp. 95–107.
 10. Loupian E.A., Bartalev S.A., Savin I.Yu., Tekhnologii sputnikovogo monitoringa v sel'skom khozyaistve Rossii (Technologies of satellite monitoring in agriculture of Russia), *Aerokosmicheskii kur'er*, 2009, No 6, pp. 47–49.
 11. Loupian E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E., Sputnikovyi servis monitoringa sostoyaniya rastitel'nosti "VEGA" (Satellite service for monitoring vegetation "VEGA"), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 190–198.
 12. 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 sputnikovyykh 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.
 13. Muratova N.R., Terekhov A.G., Opyt pyatiletnego operativnogo monitoringa sel'skokhozyaistvennykh ugodii Severnogo Kazakhstana s pomoshch'yu sputnikovyykh dannykh (Experience five years of operational monitoring of agricultural lands of Northern Kazakhstan by means of satellite data), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2007, Vol. 4, No. 2, pp. 277–283.
 14. Pavlov A.N. *Nakoplenie belka v zerne pshenitsy i kukuruzy* (The accumulation of protein in wheat and corn kernels), Moscow: Nauka, 1967, p. 339.
 15. Plotnikov D.E., Bartalev S.A., Loupian E.A., Tolpin V.A., Otsenka tochnosti vyyavleniya posevov ozimyykh kul'tur v vesenne-letnii period vegetatsii po dannym pribora MODIS (Assessment of the accuracy of the detection of winter crops in the spring-summer vegetation period according to the MODIS), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 4, pp. 132–145. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-132-145.
 16. Savin I.Yu., Bartalev S.A., Loupian E.A., Tolpin V.A., Khvostikov S.A., Prognozirovanie urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove sputnikovyykh dannykh: vozmozhnosti i perspektivy (Forecasting crop yields based on satellite data: opportunities and prospects), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2010, Vol. 7, No. 3, pp. 275–285.
 17. Storchak I.G., Eroshenko F.V., Ispol'zovanie NDVI dlya otsenki produktivnosti ozimoi pshenitsy v Stavropol'skom krae (Using NDVI to assess the productivity of winter wheat in the Stavropol Territory), *Zemledelie*, 2014, No. 7, pp. 12–15.
 18. Storchak I.G. *Prognoz urozhainosti ozimoi pshenitsy s ispol'zovaniem vegetatsionnogo indeksa NDVI dlya uslovii Stavropol'skogo kraya. Diss. kand. s.-kh. nauk* (Forecast of the yield of winter wheat using the vegetative index NDVI for the conditions of the Stavropol Territory. Cand. agr. sciences), Stavropol: StGAU, 2016, 160 p.
 19. 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 for analyzing the condition of agricultural vegetation using the satellite service "VEGA"), *Optika atmosfery i okeana*, 2014, Vol. 27, No. 7 (306), pp. 581–586.