Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала

Ф.В. Ерошенко[1], С.А. Барталев[2], И.Г. Сторчак[1], Д.Е. Плотников[2]

[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-mails: bartalev@smis.iki.rssi.ru, dmiplot@mis.iki.rssi.ru

Урожайность озимой пшеницы часто демонстрирует высокий уровень корреляции со средней, максимальной и интегрированной за период вегетации величиной NDVI. Такая взаимосвязь достаточно устойчиво проявляется при пространственной агрегации значений указанных показателей в границах территориальных образований различного уровня (муниципальные районы, субъекты РФ, почвенно-климатические зоны). Однако при их агрегации на уровне отдельных полей такая корреляционная связь не стабильна или может полностью отсутствовать. Это стимулирует проведение исследований, направленных на поиск дистанционно измеряемых показателей, позволяющих характеризовать процесс формирования урожая конкретных посевов. Получение такого рода дистанционно измеряемых характеристик в настоящей работе сопряжено с использованием знаний о механизмах и закономерностях продукционного процесса, а также ассимиляцией спутниковых данных и результатов их обработки в показатели фотосинтетической продуктивности растений. В работе предложен новый вегетационный индекс фотосинтетического потенциала, получаемый на основе данных дистанционного зондирования и позволяющий характеризовать продукционные процессы сельскохозяйственных культур и прогнозировать их урожайность. Результаты выполненных исследований предложенного показателя, оцененного на основе спутниковых данных MODIS, продемонстрировали наличие достаточно тесной корреляции с урожайностью озимой пшеницы (в среднем за годы исследований коэффициент детерминации составил 0,80), что позволяет предположить высокий уровень его информативности для оценки физиологического состояния посевов и прогнозирования их продуктивности.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, вегетационный индекс фотосинтетического потенциала, озимая пшеница, урожайность

Одобрена к печати: 16.08.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-99-112

Введение

Методы дистанционного зонирования Земли из космоса находят широкое применение для решения задач оперативной оценки характеристик и мониторинга сельскохозяйственных посевов (Барталев и др., 2005; Муратова, Терехов, 2007; Лупян и др., 2009). При этом, несмотря на многочисленные исследования (Савин и др., 2010; Куссуль и др., 2012; Becker-Reshef et al., 2010), разработка эффективных методов дистанционной оценки урожайности культур, относящейся к числу наиболее востребованных характеристик посевов, остается в фокусе внимания российских и зарубежных ученых.

Разработка методов дистанционного зондирования озимых культур, характеризуемых высокой экономической значимостью и отличительными особенностями фенологического развития, позволила к настоящему времени создать достаточно эффективные алгоритмы их автоматизированного распознавания и оценки состояния на основе спутникового мониторинга сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик посевов (Плотников и др., 2008; Страшная и др., 2014). В основе предложенных к настоящему времени методов оценки урожайности озимых культур часто лежит использование регрессионных моделей (Куссуль и др., 2012; Сторчак, Ерошенко, 2014; Becker-Reshef et al., 2010), устанавливающих

зависимость этого показателя от дистанционно измеренных значений нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI (Deering et al., 1975), вычисляемого как:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где *NIR* и *RED* − значения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в красном и ближнем инфракрасном (ИК) диапазонах длин волн.

Выбор диапазонов длин волн для расчета NDVI продиктован оптико-биофизическими свойствами зеленой растительности, а именно поглощением излучения хлорофиллом в красной (примерно 620−740 нм) и отражением поверхности растений в ближней ИК (примерно 800−1100 нм) областях спектра. Представляя собой описанную выше оптико-биофизическую характеристику посевов, NDVI обладает потенциально тесной связью с площадью ассимиляционной поверхности растений и содержанием в них хлорофилла (Шуркина и др., 2007; Ерошенко, 2014), а следовательно, и с продуктивностью сельскохозяйственных культур как функции потенциальной эффективности их фотосинтетического аппарата (Андрианова, Тарчевский, 2000).

Выполненные исследования показывают, что урожайность озимой пшеницы способна демонстрировать наличие достаточно тесной корреляции с максимальной за период вегетации величиной NDVI или интегрированными за некоторые временные интервалы значениями индекса (Куссуль и др., 2012; Ерошенко, Чередниченко, 2013; Becker-Reshef et al., 2010). Наличие таких взаимосвязей экспериментально установлено на различных уровнях территориальной агрегации, включающих отдельные поля и муниципальные районы Ставропольского края (Ерошенко, Чередниченко, 2013). Однако наличие и уровень такой корреляции не отличаются стабильностью, демонстрируя в ряде случаев слабое ее проявление или практически полное отсутствие, что диктует необходимость поиска дистанционно измеряемых индикаторов, характеризуемых более высоким уровнем инвариантности взаимосвязей, в том числе по отношению к факторам условий выращивания растений. Возможные пути поиска таких дистанционных индикаторов могут быть сопряжены, в частности, с использованием знаний о механизмах продукционного процесса сельскохозяйственных культур, а также с ассимиляцией в соответствующие биофизические модели спутниковых данных и результатов их обработки.

В основу предложенного в настоящей статье подхода к дистанционной оценке урожайности озимых культур положено фундаментальное представление о фотосинтезе как основном механизме продукционного процесса, потенциальная эффективность которого в первую очередь определяется размерами ассимиляционного аппарата растений, концентрацией в нем хлорофилла и продолжительностью его функционирования. К числу характеристик, направленных на интегральный учет указанных выше факторов продукционного процесса растительности, в частности, относятся различные показатели фотосинтетической продуктивности (Андрианова, Тарчевский, 2000). Пользуясь принципом научной аналогии с показателем хлорофиллового фотосинтетического потенциала, мы разработали

новый вегетационный индекс, рассчитываемый по данным дистанционных измерений спектрально-отражательных характеристик посевов и демонстрирующий наличие достаточно устойчивой и тесной линейной связи с величиной урожайности озимой пшеницы.

Условия и методы проведения исследований

В качестве объектов экспериментальных исследований использовались посевы озимой пшеницы урожая 2013 и 2014 годов на производственных полях Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства (СНИИСХ). Месторасположение использованных для исследований посевов приведено на *рис. 1*, а их характеристика в *табл. 1*.

Таблица 1. Характеристика использованных в исследованиях посевов озимой пшеницы

№ Поля	*Сорт*	*Предшественник*	*Площадь, га*	*Урожайность, т/га*
2013 год				
1	Полевик	горох	10,0	34,1
2	Казачий атаман	горох	10,0	25,1
3	Багира	пар	25,0	64,5
4	Одесская 200	соя	8,9	32,3
5	Одесская 200	пар	12,6	68,5
6	Зустрич	пар	65,0	49,1
7	Писанка	соя	63,0	28,4
8	Скарбница	пар	35,0	53,0
2014 год				
1	Писанка	озимый рапс	68,7	48,8
2	Скарбница	пар	25,0	51,2
3	Одесская 200	горох	5,6	67,6
4	Одесская 200	горох	5,1	59,0
5	Одесская 200	горох	8,4	55,7
6	Пилипенко	горох	47,5	36,0
7	Скарбница	пар	63,5	61,0
8	Украинка одесская	озимая пшеница	43,3	50,1

Значительные вариации урожайности озимой пшеницы на разных полях обусловлены различной обеспеченностью минеральным питанием и влагой, сроками и нормами высева, влиянием культуры предшественника, сортовыми особенностями посевов, определяющими потенциал их продуктивности, уровень устойчивости к неблагоприятным метеоусловиям (морозостойкость, засухоустойчивость и др.) и болезням.

Следует также отметить существенные различия метеорологических условий выращивания озимой пшеницы урожаев 2013 и 2014 годов. Так, условия формирования посевов

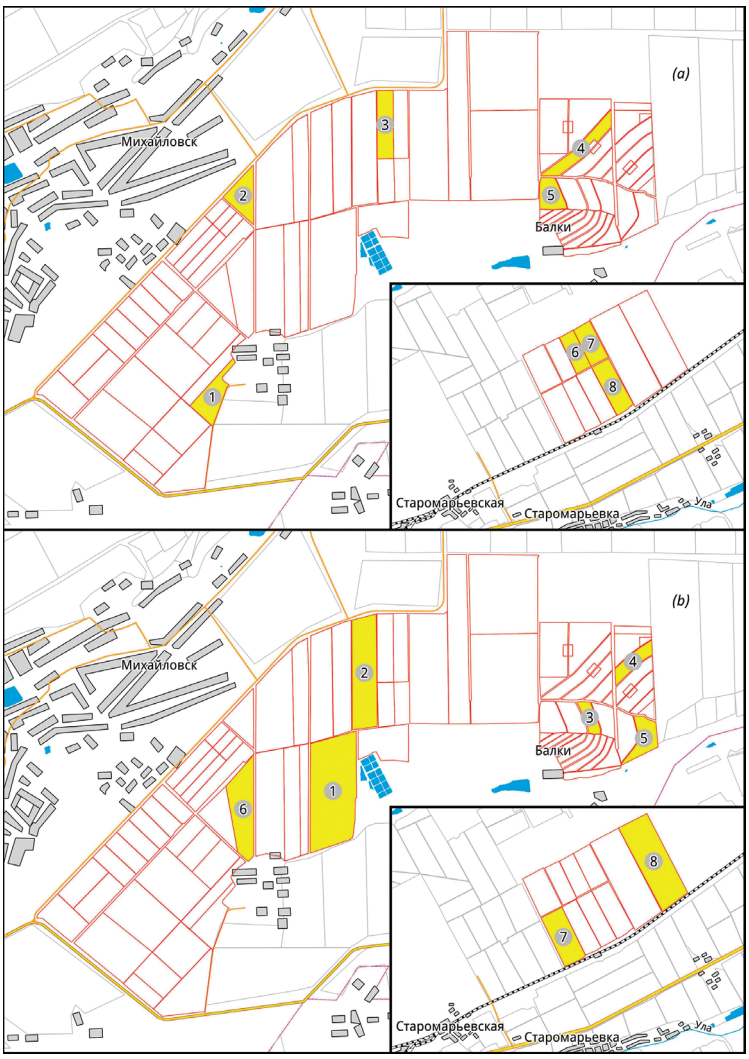

Рис. 1. Местоположение использованных в экспериментах посевов озимой пшеницы на производственных полях СНИИСХ в 2013 (а) и 2014 (б) годах

урожая 2013 года отличались наличием сильной почвенной засухи в сентябре – октябре 2012 года, влияние которой в значительной степени было скомпенсировано благоприятными условиями ноября – декабря, а также ранним возобновлением вегетации весной 2013 года и своевременным выпадением осадков в течение оставшегося репродуктивного периода. При этом рост посевов озимой пшеницы урожая 2014 года на всех стадиях своего развития отличался благоприятными температурными и влажностными условиями.

Сбор наземных данных о характеристиках посевов озимой пшеницы проводился в различных фазах их развития, таких как весеннее кущение, трубкование, колошение, налив зерна и полная спелость. Для этого на каждом поле проводился отбор снопового материала с учетных площадок площадью 0,25 м^2, закладываемых по диагонали поля в восьмикратной повторности. В лабораторных условиях проводили биометрические исследования с оценкой биомассы (по отдельным органам растений), густоты и высоты стеблестоя растений. Площадь ассимиляционной поверхности листьев и стеблей определялась весовым методом по А.А. Ничипоровичу (1961), а колоса – по формуле В.А. Кумакова (1968). Содержание хлорофилла в органах растений измерялось спектрофотометрическим мето-

дом по оптической плотности спиртовой вытяжки зеленых пигментов (Лобков, Наполова, 2003). Величины фотосинтетических потенциалов растений рассчитывались по площади их ассимиляционной поверхности (поверхностный фотосинтетический потенциал − ПФСП, SPSP) и по содержанию в них хлорофилла (хлорофилловый фотосинтетический потенциал − ХФСП, CPSP) (Андрианова, Тарчевский, 2000; Ерошенко, Петрова, 2010).

Дистанционные измерения спектрально-отражательных характеристик посевов проводились по данным спектрорадиометра MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), установленного на борту спутника Terra. Для проведения исследований использовались прошедшие процедуру атмосферной коррекции данные измерений КСЯ в спектральных каналах 620−670 нм и 841−876 нм, имеющие пространственное разрешение около 250 м (стандартный продукт данных MOD09, см. (Vermote, Vermeulen, 1999). При этом данные ежедневных измерений проходили предварительную обработку с использованием разработанных в Институте космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН) технологий формирования очищенных от влияния облаков, снежного покрова и других мешающих факторов еженедельных композитных изображений (Барталев и др., 2011; Плотников и др., 2014), непрерывно охватывающих вегетационные периоды 2013 и 2014 годов. Сформированные таким образом композитные изображения служили основой для вычисления осредненных в границах каждого поля еженедельных значений NDVI, доступных для анализа в среде сервиса ВЕГА-Science (http://sci-vega.ru/) (Лупян и др., 2011).

Анализ взаимосвязей между урожайностью и NDVI посевов озимой пшеницы

Как было показано ранее (Ерошенко, Чередниченко, 2013; Сторчак, Ерошенко, 2014), существует достаточно тесная взаимосвязь между величиной урожайности озимой пшеницы в Ставропольском крае и дистанционно измеренными значениями сезонной динамики NDVI, характеризующими онтогенетические изменения растений. При этом вышеуказанная взаимосвязь установлена как для максимальных за сезон значений NDVI, так и для средних за весенне-летний период величин индекса. Поскольку максимум NDVI наблюдается в период колошения, использование данной величины позволяет получать прогноз урожайности уже на данном этапе органогенеза, что обеспечивает преимущество применения полученных на ее основе регрессионных моделей, характеризуемых при этом и более высокой точностью.

Полученные в настоящем исследовании экспериментальные данные позволили исследовать наличие аналогичных взаимосвязей на уровне отдельных полей с посевами озимой пшеницы. Представленные на *рис. 2* результаты показывают наличие линейной корреляции между величиной урожайности озимой пшеницы и характеристиками NDVI для посевов урожая 2014 года и отсутствие взаимосвязей между этими же показателями для посевов урожая 2013 года.

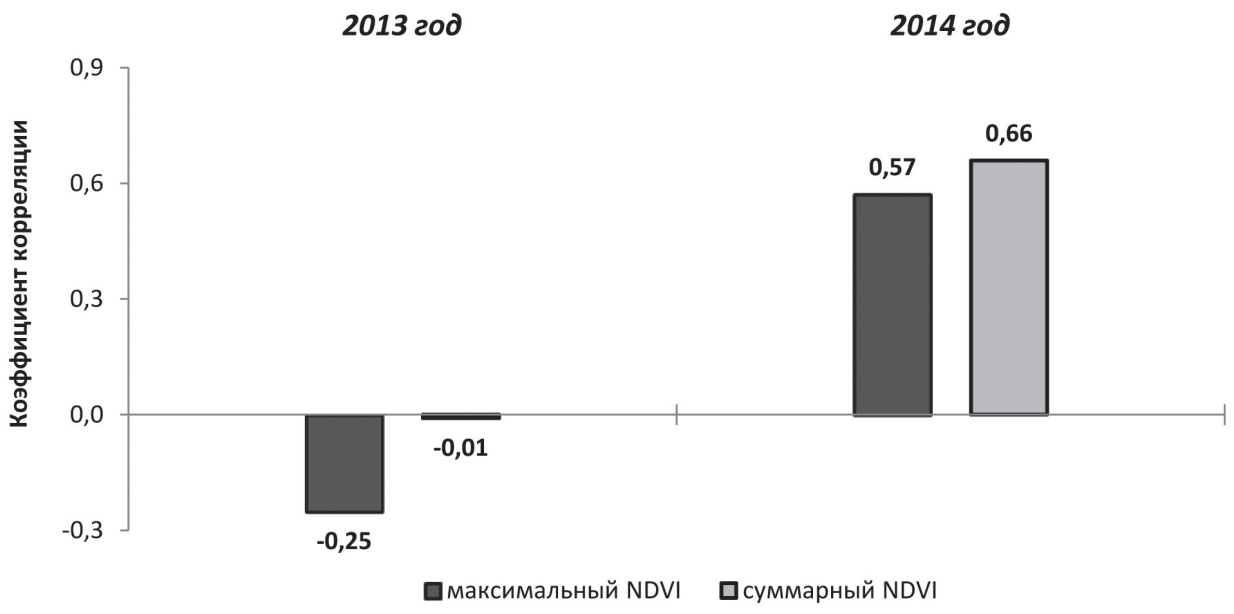

Рис. 2. Коэффициенты корреляции между урожайностью зерна посевов озимой пшеницы и характеристиками динамики NDVI за весенне-летний период

В силу отсутствия экстремальных погодных явлений в вегетативно-генеративный период условия 2014 года были более благоприятными для роста и развития озимой пшеницы по сравнению с 2013 годом. Это позволяет предположить, что в 2014 году интенсивность фотосинтетических реакций не лимитировалась отрицательным воздействием внешних факторов, а формирование урожая озимой пшеницы проходило в большей степени по экстенсивному пути. То есть продуктивность озимой пшеницы в большей степени определялась не активностью обменных и синтетических процессов, а развитостью растений, имеющей тесную взаимосвязь с оптико-биологическими характеристиками посевов.

Величины коэффициента корреляции между значениями NDVI и относительным содержанием хлорофилла в среднем по использованным в наших экспериментах полям составили -0,89 и -0,81 в 2013 и 2014 годах соответственно. Это говорит о достаточно высокой степени сопряжения NDVI с количеством фотосинтетических пигментов в органах растений озимой пшеницы. Отрицательные значения коэффициентов корреляции объясняются тем, что максимальная концентрация хлорофилла в растениях озимой пшеницы отмечается в начальные периоды роста и развития, а далее наблюдается так называемое «ростовое разбавление», сопровождающееся снижением количества зеленых пигментов в единице биомассы, в то время как NDVI посевов при этом возрастает.

Дистанционные показатели фотосинтетической продуктивности и оценка их возможностей для прогнозирования урожая озимой пшеницы

По результатам исследований (Андрианова, Тарчевский, 2000; Ерошенко, 2006; Ерошенко, Петрова, 2010) установлены тесные взаимосвязи между величиной урожая сель-

скохозяйственных культур и фотосинтетическими потенциалами (ФСП). Фотосинтетический потенциал – показатель, характеризующий размеры фотосинтетического аппарата посева и время его функционирования. С математической точки зрения, фотопотенциал – площадь фигуры, ограниченной осью абсцисс снизу, а сверху – функцией изменений размеров фотосинтетического аппарата (площадь ассимиляционной поверхности или количество хлорофилла) за период вегетации. Или:

$$\mathrm{PSP} = \int_{b.v.}^{e.v.} f(x)dt \ ,$$

где PSP – фотосинтетический потенциал; *b.v.* и *e.v.* – моменты времени, соответствующие началу и окончанию вегетации; *f(t)* – функция, описывающая динамику размеров фотосинтетического аппарата в течение вегетации (площадь ассимиляционной поверхности или количество хлорофилла).

Фотосинтетический потенциал, в зависимости от способа расчета, бывает поверхностным и хлорофилловым. Наиболее высокий уровень тесноты взаимосвязи продуктивности растений отмечается с хлорофилловым фотосинтетическим потенциалом (Андрианова, Тарчевский, 2000; Ерошенко, Петрова, 2010). Для практического вычисления CPSP используется следующая формула:

$$\mathrm{CPSP} = \sum_{i=1}^{n} \frac{Chl_i \cdot M_i + Chl_{i+1} \cdot M_{i+1}}{2} (d_{i+1} - d_i) \ ,$$

где CPSP – хлорофилловый фотосинтетический потенциал; *Chl* – относительное содержание хлорофилла в растениях; *M* – биомасса растений с 1 м^2 посева; *d* – дата полевого отбора растений; *i* – порядковый номер полевого отбора растений.

Формула расчета фотопотенциала предполагает, что точность его определения зависит от частоты отборов. При этом точность измерения показателя фотосинтетической продуктивности возрастает с ростом частоты отборов. Но из-за высокой трудоемкости, как правило, отборы проводят в период наступления очередной фазы роста и развития растений или этапа органогенеза. При этом вид функции, описывающей временную динамику размеров фотосинтетического аппарата посева озимой пшеницы (площадь ассимиляционной поверхности и количество хлорофилла), имеет один максимум (колошение − цветение). Поэтому отбор растительных образцов в фазах весеннего кущения, трубкования, колошения, молочной и восковой спелости довольно точно характеризуют темпы нарастания, достижения максимума и спада величины размеров ассимиляционного аппарата посева.

Наличие тесной взаимосвязи между NDVI озимой пшеницы и относительным содержанием хлорофилла открывает принципиальную возможность разработки аналога показателя CPSP с использованием дистанционно измеренных значений вегетационного индекса. При этом для гармонизации единиц измерения физических величин, используемых для получения нового показателя, нами веден ***коэффициент массовой плотности посева Ksdc***, рассчитываемый как отношение его биомассы к константе предельной

биомассы озимой пшеницы, в качестве которой нами принята эмпирически полученная величина 5000 г/м^2. Анализ результатов исследований СНИИСХ показывает, что в различных вариациях сортов, культур предшественников, минеральных удобрений, почвенного плодородия, влагообеспеченности, почвенно-климатических условий выращивания озимая пшеница не формирует посевов с биомассой, превышающей величину указанной выше константы *Ksdc*.

Новый показатель, названный нами **вегетационным фотосинтетическим потенциалом (VPSP)**, рассчитывается по следующей формуле:

$$\mathrm{VPSP} = \sum_{i=1}^{n} \frac{\mathrm{NDVI}_i \cdot Ksdc_i + \mathrm{NDVI}_{i+1} \cdot Ksdc_{i+1}}{2} (d_{i+1} - d_i),$$

где VPSP – вегетационный фотосинтетический потенциал; *Ksdc* – коэффициент массовой плотности посева.

Нами были рассчитаны поверхностные, хлорофилловые и вегетационные фотосинтетические потенциалы и проведен анализ их связи с зерновой продуктивностью озимой пшеницы (*табл. 2*). Полученные результаты свидетельствуют о том, что в условиях 2013 года сложилась классическая картина взаимосвязи поверхностного и хлорофиллового фотосинтетических потенциалов с урожайностью озимой пшеницы. Так, если коэффициент корреляции зерновой продуктивности с SPSP составлял величину 0,61, то с CPSP – 0,92.

Таблица 2. Показатели фотосинтетического потенциала посевов озимой пшеницы и коэффициенты их корреляции с урожайностью зерна

№ поля	*Сорт*	*Предшественник*	*SPSP, (м^2/м^2)·сутки*	*CPSP, (г/м^2)·сутки*	*VPSP, NDVI·сутки*
2013 год					
1	Полевик	горох	1,19	52,1	19,1
2	Казачий атаман	горох	0,86	19,5	8,6
3	Багира	пар	1,99	89,5	37,8
4	Одесская 200	соя	1,06	44,6	13,4
5	Одесская 200	пар	1,01	88,3	28,2
6	Зустрич	пар	1,13	90,0	32,0
7	Писанка	соя	0,40	20,9	10,2
8	Скарбница	пар	1,53	65,3	28,5
Среднее			**1,15**	**58,8**	**22,3**
R_{corr} с урожаем зерна			**0,61**	**0,92**	**0,90**
2014 год					
1	Писанка	озимый рапс	2,87	68,8	17,7
2	Скарбница	пар	3,08	92,2	17,3
3	Одесская 200	горох	3,05	65,1	20,4

4	Одесская 200	горох	2,72	63,4	16,5
5	Одесская 200	горох	3,78	95,4	20,8
6	Пилипенко	горох	1,42	16,5	6,6
7	Скарбница	пар	3,22	68,4	23,5
8	Писанка	озимый рапс	2,00	41,3	14,4
Среднее			**2,77**	**64,6**	**17,5**
R_{corr} с урожаем зерна			**0,70**	**0,55**	**0,85**

Хлорофилловый фотопотенциал более точно отражает продукционный процесс, чем поверхностный, из-за того, что SPSP учитывает только площадь листьев, на которую падает солнечная радиация. Однако количество поглощенной ФАР, эффективность её усвоения, преобразования и запасания в виде стабильных связей химических высокоэнергетических соединений (АТФ и НАДФН$^+$) зависит от концентрации пигментов и их структурной организации в хлоропластах. Поэтому связь между продуктивностью и фотосинтетическим потенциалом, рассчитанным по содержанию хлорофилла в растениях, теснее, чем оценки, сделанные на основе площади ассимиляционной поверхности.

Следует отметить, что коэффициенты корреляции урожайности озимой пшеницы с величинами традиционно используемого (CPSP) и предложенного нами (VPSP) показателей фотосинтетического потенциала посевов озимой пшеницы в 2013 году оказались близкими (соответственно, 0,92 и 0,90). При этом VPSP показал преимущество по сравнению со своими аналогами в качестве предиктора урожайности озимой пшеницы в 2014 году. В среднем коэффициент корреляции между зерновой продуктивностью и ВФСП посевов озимой пшеницы составил величину, равную 0,87. Одновременно следует отметить, что, в отличие от CPSP и SPSP, оценка показателя VPSP свободна от необходимости проведения существенной части трудоемких лабораторных и полевых измерений концентрации хлорофилла и площади ассимиляционной поверхности в отборах растений.

Таким образом, предложенный нами новый показатель фотосинтетической продуктивности растений, рассчитываемый с использованием данных дистанционного зондирования, с высокой степенью достоверности характеризует формирование урожая.

Одновременно полученные результаты создают теоретический базис для разработки показателя, характеризующего продукционный процесс сельскохозяйственных культур и рассчитываемого только на основе данных дистанционного зондирования. В основу разработки такого показателя может быть положена следующая совокупность известных положений:

1. Поглощение растениями излучения в красной области спектра связано с содержанием в них зеленых пигментов – хлорофилла.
2. Отражение растениями излучения в ближней ИК области спектра преимущественно определяется площадью фотосинтезирующей поверхности.
3. Площадь ассимиляционной поверхности растений пропорциональна их общей зеленой биомассе.

Анализ приведенных выше положений дает основание предложить новый, получаемый только по данным дистанционного зондирования вегетационный индекс фотосинтетического потенциала посева (PSPI), формируемый по аналогии с ХФСП заменой в его формуле величины относительного содержания хлорофилла на коэффициент ***поглощения*** в красной области спектра, а величины биомассы растений − на коэффициент ***отражения*** в ближней ИК области, следующим образом:

$$\mathrm{PSPI} = \sum_{i=1}^{n} \frac{(1 - RED_i) \cdot NIR_i + (1 - RED_{i+1}) \cdot NIR_{i+1}}{2} (d_{i+1} - d_i),$$

где *RED* – отражение в красной области спектра; *NIR* – отражение в ближней ИК области спектра.

Анализ значений PSPI, полученных по данным MODIS с использованием коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) в красной и ближней ИК областях спектра, свидетельствуют, что новый показатель фотосинтетической продуктивности посевов хорошо характеризует продукционный процесс озимой пшеницы (*рис. 3*).

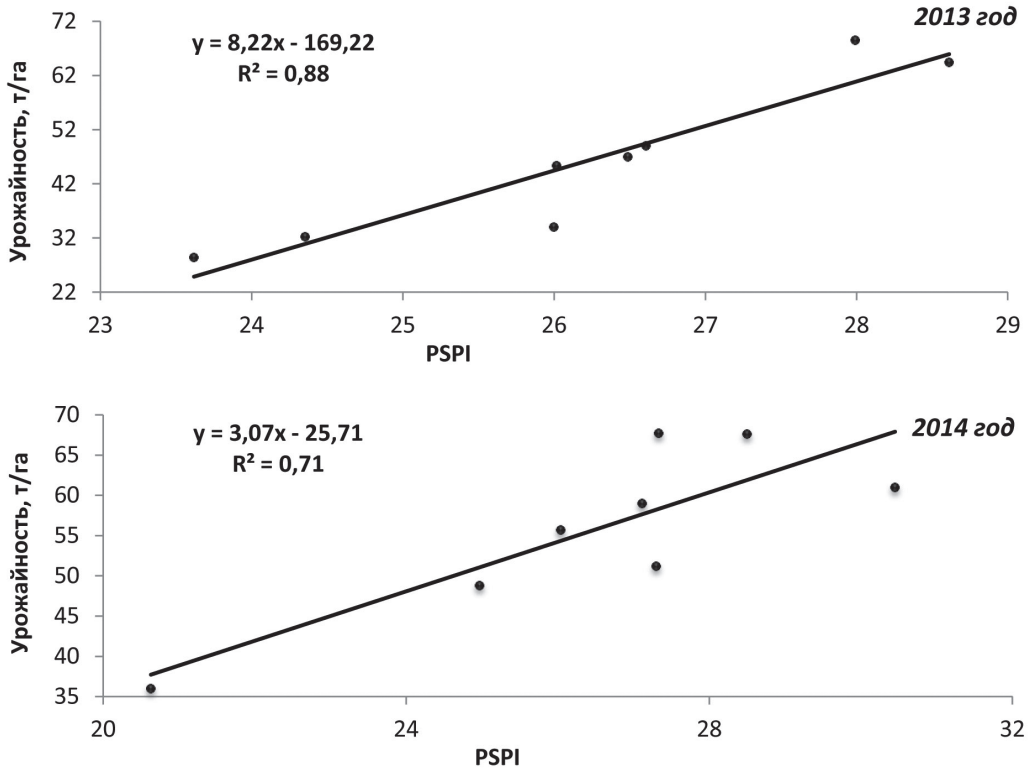

Рис. 3. Регрессионные зависимости урожайности озимой пшеницы от величины вегетационного индекса фотосинтетического потенциала PSPI

Мы проанализировали связь величин вегетационного индекса фотосинтетического потенциала, рассчитанных для определенных фаз роста и развития растений озимой пшеницы, с урожайностью их посевов (*рис. 4*).

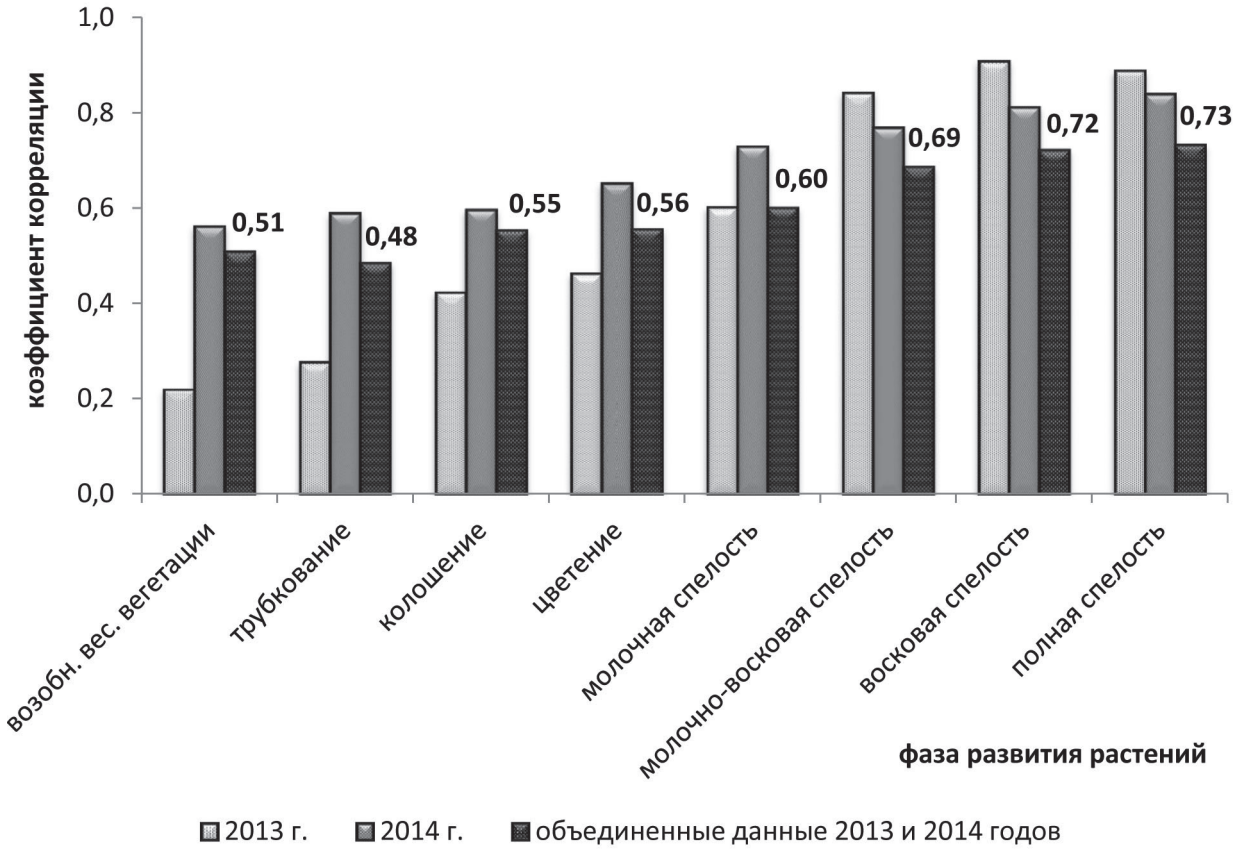

Рис. 4. Коэффициенты корреляции между урожайностью озимой пшеницы и величиной вегетационного индекса фотосинтетического потенциала PSPI, рассчитанного в различные фазы роста и развития растений

Полученные результаты свидетельствуют о том, что уже в период колошения с определенной степенью достоверности можно прогнозировать продуктивность. Точность прогноза в последующие фазы увеличивается.

Таким образом, вегетационный индекс фотосинтетического потенциала PSPI посевов озимой пшеницы, рассчитанный по данным дистанционного зондирования, отражает процесс формирования урожая зерна. Значения коэффициента детерминации между значениями PSPI и урожайностью зерна озимой пшеницы в 2013 и 2014 годах составили соответственно 0,88 и 0,71, что позволяет предположить высокий уровень информативности нового показателя для оценки физиологического состояния посевов и прогнозирования продуктивности сельскохозяйственных культур.

Проведение исследований Института космических исследований Российской академии наук в рамках данной работы осуществлялось при финансовой поддержке Минобрнауки России, контракт 14.616.21.0063, уникальный идентификатор ПНИЭР RFMEFI61615X0063.

Литература

1. *Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А.* Хлорофилл и продуктивность растений // М.: Наука, 2000. 135 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. Самара: ИСОИ РАН, 2011. Т. 35. № 1. С. 103–116.
3. *Барталев С.А., Лупян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю.* Дистанционная оценка параметров сельскохозяйственных земель по спутниковым данным спектрорадиометра MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2005. Т. 2. № 2. С. 228–236.
4. *Ерошенко Ф.В, Чередниченко И.Г.* Регрессионные модели оценки урожайности озимой пшеницы в Ставропольском крае с использованием NDVI // Бюллетень Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства. 2013. № 5. С. 58–64.
5. *Ерошенко Ф.В.* Оптические свойства растений и оценка их физиологического состояния // Бюллетень Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства. 2014. № 6. С. 84–90.
6. *Ерошенко Ф.В.* Особенности фотосинтетической деятельности сортов озимой пшеницы. Ставрополь: Сервисшкола, 2006. 200 с.
7. *Ерошенко Ф.В., Петрова Л.Н.* Фотосинтетическая продуктивность озимой пшеницы // Вестник Российской академии сельскохозяйственных наук. 2010. № 3. С. 36–38.
8. *Кумаков В.А.* Структура фотосинтетического потенциала разных сортов яровой пшеницы // Сельскохозяйственная биология. 1968. Т. 3. № 3. С. 362–368.
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. *Лобков В.Т., Наполова Г.В.* Способ определения хлорофилла в растениях гречихи: Патент на изобретение RU 2244916. 2003.
11. *Лупян Е.А., Барталев С.А., Савин И.Ю.* Технологии спутникового мониторинга в сельском хозяйстве России // Аэрокосмический курьер. 2009. № 6. С. 47–49.
12. *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.
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. *Ничипорович А.А.* Фотосинтетическая деятельность растений в посевах. М.: Изд-во АН СССР, 1961. 136 с.
15. *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. Т. 2. № 5. С. 322–330.
16. *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.
17. *Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян 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.
18. *Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В.* Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12–15.
19. *Страшная А.И., Барталев С.А., Максименкова Т.А., Чуб О.В., Толпин В.А., Плотников Д.Е., Богомолова Н.А.* Агрометеорологическая оценка состояния озимых зерновых культур в период прекращения вегетации с использованием наземных и спутниковых данных на примере Приволжского федерального округа // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2014. № 351. С. 85–107.
20. *Шуркина А.И., Шевырногов А.П., Зоркина Т.М.* Исследование современного растительного покрова республики Хакасия на основе интеграции спутниковых и наземных данных // Вестник КрасГАУ. 2007. № 5. С. 65–71.
21. *Becker-Reshef I., Vermote E., Lindeman M., Justice C.* A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data // Remote Sensing of Environment. 2010. 114 (6). P. 1312–1323.
22. *Deering D.W., Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A.* Measuring “forage production” of grazing units from Landsat MSS data // Proc. 10th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment. Univ. Michigan, 1975. pp. 1169–1178.
23. *Vermote E.F., Vermeulen A.* Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09). Version 4.0. Algorithm Theoretical Background Document. 1999. 107 p. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf.

The possibility of winter wheat yield estimation based on vegetation index of photosynthetic potential derived from remote sensing data

F.V. Eroshenko[1], S.A. Bartalev[2], I.G. Storchak[1], D.E. Plotnikov[2]

[1]Stavropol Research Institute of Agriculture, Mikhajlovsk 356241, Stavropolsky Krai, Russia
E-mail: yer-sniish@mail.ru
[2]Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mails: bartalev@smis.iki.rssi.ru, dmiplot@mis.iki.rssi.ru

It is known that winter wheat yield correlates with various characteristics derived from NDVI intra-seasonal time-series, such as, e.g. average, maximum and integrated over the growing period values. Such relationships are established at different levels of geographical aggregations (municipal and federal regions, soil-climatic zones and etc.). However, for individual agricultural fields, this correlation could be not stable or low. This stimulates further researches aimed at design of Earth observation data derived metrics characterizing the crop yield formation process. In our research such metric was designed that involved knowledge on the crop production process mechanisms and assimilation of satellite remote sensing data in vegetation photosynthetic productivity indicators. In the paper we propose a new vegetation index of photosynthetic potential retrieved from remote sensing data and allowing to characterize the production processes of crops and to predict their yield. The results of the examination of the proposed indicator estimated on MODIS satellite data showed a fairly close correlation with the yield of winter wheat (the average determination coefficient is 0,80), which suggests a high level potential for assessing of the physiological status of crops and forecasting their productivity.

Keywords: remote sensing data, vegetation index of photosynthetic potential, winter wheat, yield

Accepted: 16.08.2016
DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-4-99-112

References

1. Andrianova Yu.E., Tarchevskii I.A., *Khlorofill i produktivnost' rastenii* (Chlorophyll and plant productivity), Moscow: Nauka, 2000, 135 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 based on multi-year satellite data Spectroradiometer MODIS and locally adaptive classification), *Komp'yuternaya optika*, Samara: ISOI RAN, 2011, Vol. 35, No. 1, pp. 103–116.
3. Bartalev S.A., Loupian E.A., Neishtadt I.A., Savin I.Yu., Distantsionnaya otsenka parametrov sel'skokhozyaistvennykh zemel' po sputnikovym dannym spektroradiometra MODIS (Remote estimation of parameters of agricultural land from satellite data of MODIS), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2005, Vol. 2, No. 2, pp. 228–236.
4. Eroshenko F.V, Cherednichenko I.G., Regressionnye modeli otsenki urozhainosti ozimoi pshenitsy v Stavropol'skom krae s ispol'zovaniem NDVI (Regression models for estimating the yield of winter wheat in the Stavropol region using NDVI), *Byulleten' Stavropol'skogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skogo khozyaistva*, No. 5, 2013, pp. 58–64.
5. Eroshenko F.V., Opticheskie svoistva rastenii i otsenka ikh fiziologicheskogo sostoyaniya (Optical properties of plants and their physiological state), *Byulleten' Stavropol'skogo nauchno-issledovatel'skogo instituta sel'skogo khozyaistva*, 2014, No. 6, pp. 84–90.
6. Eroshenko F.V., *Osobennosti fotosinteticheskoi deyatel'nosti sortov ozimoi pshenitsy* (Features of the photosynthetic activity of winter wheat varieties), Stavropol': Servisshkola, 2006, 200 p.
7. Eroshenko F.V., Petrova L.N., Fotosinteticheskaya produktivnost' ozimoi pshenitsy (Photosynthetic productivity of winter wheat), *Vestnik Rossiiskoi akademii sel'skokhozyaistvennykh nauk*, 2010, No. 3, pp. 36–38.
8. Kumakov V.A., Struktura fotosinteticheskogo potentsiala raznykh sortov yarovoi pshenitsy (Structure of the photosynthetic capacity of different varieties of spring wheat), *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 1968, Vol. 3, No. 3, pp. 362–368.
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. Lobkov V.T., Napolova G.V., *Sposob opredeleniya khlorofilla v rasteniyakh grechikhi*, Patent RF, No. RU 2244916, 2003.
11. 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.
12. 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.
13. Muratova N.R., Terekhov A.G., Opyt pyatiletnego operativnogo monitoringa sel'skokhozyaistvennykh ugodii Severnogo Kazakhstana s pomoshch'yu sputnikovykh 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. Nichiporovich A.A., *Fotosinteticheskaya deyatel'nost' rastenii v posevakh* (Photosynthetic activity of plants in crops), Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1961, 136 p.
15. Plotnikov D.E., Bartalev S.A., Loupian E.A., Metod detektirovaniya letne-osennikh vskhodov ozimykh kul'tur po dannym radiometra MODIS (Method of detecting the summer-autumn germination of winter crops according to the MODIS radiometer), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2008, No. 5, Vol. 2, pp. 322–330.
16. 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 (The restoration of the time-series data of remote measurements by the method of polynomial approximation in the sliding window variable size), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, Vol. 11, No. 2, pp. 103–110.
17. Savin I.Yu., Bartalev S.A., Loupian E.A., Tolpin V.A., Khvostikov S.A., Prognozirovanie urozhainosti sel'skokhozyaistvennykh kul'tur na osnove sputnikovykh 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.
18. Storchak I.G., Eroshenko F.V., Ispol'zovanie NDVI dlya otsenki produktivnosti ozimoi pshenitsy v Stavropol'skom krae (The use of NDVI to evaluate the productivity of winter wheat in the Stavropol region), *Zemledelie*, 2014, No. 7, pp. 12–15.
19. Strashnaya A.I., Bartalev S.A., Maksimenkova T.A., Chub O.V., Tolpin V.A., Plotnikov D.E., Bogomolova N.A., Agrometeorologicheskaya otsenka sostoyaniya ozimykh zernovykh kul'tur v period prekrashcheniya vegetatsii s ispol'zovaniem nazemnykh i sputnikovykh dannykh na primere Privolzhskogo federal'nogo okruga (Agrometeorological assessment of winter grain crops during the period of cessation of vegetation using ground-based and satellite data on the example of Volga Federal district) *Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo tsentra Rossiiskoi Federatsii,* 2014, No. 351, pp. 85–107.
20. Shurkina A.I., Shevyrnogov A.P., Zorkina T.M., Issledovanie sovremennogo rastitel'nogo pokrova respubliki Khakasiya na osnove integratsii sputnikovykh i nazemnykh dannykh (A study of the present vegetation cover of the Khakassia Republic on the basis of integration of satellite and terrestrial data), *Vestnik KrasGAU*, 2007, No. 5, pp. 65–71.
21. Becker-Reshef I., Vermote E., Lindeman M., Justice C., A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114 (6), pp. 1312–1323.
22. Deering D.W., Rouse J.W., Haas R.H., Schell J.A., Measuring "forage production" of grazing units from Landsat MSS data, Version 4.0, *Proc. 10th Int. Symp. on Remote Sensing of Environment*, Univ. Michigan, 1975, pp. 1169–1178.
23. Vermote E.F., Vermeulen A., *Atmospheric correction algorithm: spectral reflectances (MOD09), Algorithm Theoretical Background Document*, 1999, 107 p. URL: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod08.pdf.