

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-3-103-121>

УДК 528.88

## **Оценка средней районной урожайности озимой пшеницы по спутниковой и наземной метеорологической информации**

*А.Д. Клещенко, О.В. Савицкая, С.А. Косякин*

*Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии, г. Обнинск, Россия  
csm-dir@obninsk.ru*

Представлены результаты расчетов оценки средней районной урожайности озимой пшеницы на основе комплексирования спутниковой и наземной метеорологической информации для субъектов Северо-Кавказского и Южного федеральных округов. Используются следующие спутниковые индексы: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), VCI (Vegetation Condition Index) и LAI (Leaf Area Index). Для получения набора метеопараметров для районов, в которых метеостанции отсутствовали, применялся метод интерполяции обратных взвешенных квадратов расстояний. Для учета агроклиматических условий районы в субъектах объединялись в группы по методу агроклиматического районирования Шашко.

С помощью метода корреляционно-регрессионного анализа выбраны параметры, оказывающие наибольшее влияние на урожайность. С учетом использования этих параметров были получены соответствующие регрессионные модели для территории. Проверка количественной оценки урожайности – построенных моделей – на зависимой и независимой информации показала достаточно хорошую оправданность.

*Ключевые слова:* NDVI, LAI, интерполяция, агроклиматическое районирование по Шашко, средняя районная урожайность, метеорологическая информация

## **Estimation of the average district winter wheat yield based on satellite and ground meteorological data**

*A.D. Kleschenko, O.V. Savitskaya, S.A. Kosyakin*

*All-Russian Research Institute of Agricultural Meteorology, Obninsk, Russia  
csm-dir@obninsk.ru*

The results of estimating the average district winter wheat yield based on satellite and ground meteorological data for the subjects of the North Caucasian and Volga federal districts are presented. The following satellite indices are used: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), VCI (Vegetation Condition Index), and LAI (Leaf Area Index). The method for the interpolation of inverse weighted squared distances is used to obtain a set of meteorological parameters for the districts, where weather stations were absent. Districts were grouped using the Shashko's agroclimatic regionalization method to take agroclimatic conditions into account.

The parameters that have the greatest impact on the yield are selected using the correlation-regression analysis. The corresponding regression models are obtained for the

studied regions of the Russian Federation. The verification of the obtained models for the yield quantification based on dependent and independent data samples exhibits a rather high accuracy.

*Keywords:* NDVI, LAI, interpolation, Shashko's agroclimatic regionalization, average district yield, meteorological data

## Введение

К числу важнейших задач Росгидромета относится обеспечение правительственных организаций, федеральных и региональных управлений агропромышленного комплекса Российской Федерации информацией о складывающихся условиях роста и развития посевов сельскохозяйственных культур и их ожидаемой урожайности. Такая информация позволяет с большой заблаговременностью определять объемы ожидаемой сельскохозяйственной продукции, а также своевременно подготовиться к уборочным мероприятиям. С этой целью разработано большое количество методов оценки состояния и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур, которые позволяют проводить анализ складывающихся условий в разрезе субъектов Российской Федерации и России в целом [9, 11]. Методов прогноза урожайности по отдельным муниципальным районам в оперативной практике обслуживания зернового хозяйства России в настоящее время практически не существует, что затрудняет получение достоверной информации о состоянии и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур на районном уровне. Эта задача достаточно сложная и может быть решена при комплексном использовании наземной агрометеорологической и спутниковой информации. В последние годы появились первые попытки использования спутниковой информации для оценки средней районной урожайности [3, 5, 6], однако имеется достаточно много нерешенных вопросов. В частности, существует проблема получения агрометеорологической информации в районах, где нет гидрометеорологических наблюдений. Более подробно об этом будет сказано ниже.

В настоящее время в ФГБУ «ВНИИСХМ» разрабатывается метод оценки средней районной урожайности зерновых культур на основе комплексирования спутниковой информации Modis и данных наземных агрометеорологических наблюдений, что является одной из первых попыток решения рассматриваемой задачи. Целью данного исследования является описание применяемых методов при решении данного вопроса и оценка полученных результатов.

## Исходные данные и их обработка

Спутниковая информация предоставлена Институтом космических исследований РАН (ИКИ РАН) и с еженедельной частотой доступна на сервисе Vega-PRO [8]. В работе были использованы следующие

спутниковые индексы: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), VCI (Vegetation Condition Index) и LAI (Leaf Area Index). Эти индексы доступны в разрезе районов для территорий, покрытых различными типами растительности.

В исследовании использовалась информация с учетом маски земель, занятых озимыми культурами. По данным ИКИ РАН, региональная точность разработанных методов для распознавания озимых культур составляет от 70 до 98 % [7].

Вегетационный индекс NDVI является основным параметром, получаемым на основе спутниковых данных и применяемым для мониторинга растительности в различных регионах мира. NDVI представляет собой частное от деления разности между коэффициентом отражения в красном и ближнем инфракрасном участках спектра к их сумме. Этот показатель достаточно тесно коррелирует с такими характеристиками посевов, как биомасса, площадь листьев, густота и др. [4, 17, 18], и нашел широкое применение для оценки состояния и продуктивности посевов сельскохозяйственных культур [3, 10, 16, 20, 19].

Индекс условий вегетации VCI учитывает не отдельные значения NDVI, а изменение этих значений в течение вегетационного периода с учетом их минимальных и максимальных значений за рассматриваемый период. Новый индекс предложил F. Kogan [15], он рассчитывается по следующей формуле:

$$VCI_j = \frac{NDVI_j - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $VCI_j$  – значение индекса VCI для даты  $j$ ;  $NDVI_j$  – значение индекса NDVI для даты  $j$ ;  $NDVI_{\min}$  – минимальное значение NDVI внутри всего набора данных;  $NDVI_{\max}$  – максимальное значение NDVI внутри всего набора данных.

Индекс листовой поверхности LAI является новым спутниковым информационным продуктом ИКИ РАН. Он вычисляется на основе данных измерений коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в красном и ближнем ИК-каналах с использованием результатов «моделирования переноса фотонов в растительном покрове» [13]. Используются два подхода: физический и эмпирический. Физические принципы вычисления LAI основаны на моделировании КСЯ в красном и ближнем ИК-каналах с помощью уравнения переноса. Эмпирический подход основан на соотношении между NDVI и LAI [13].

В качестве статистической информации использовались ряды средних районных значений урожайности за период с 2012 по 2017 год. Эта информация доступна на сайте Федеральной службы государственной статистики в базе данных показателей муниципальных образований [1].

Наземную метеорологическую и агрометеорологическую информацию получают по данным наблюдений на гидрометеорологических станциях (ГМС) Росгидромета. В качестве наземных данных в исследовании использовались: средняя декадная температура воздуха, сумма осадков за декаду, средний за декаду дефицит влажности воздуха.

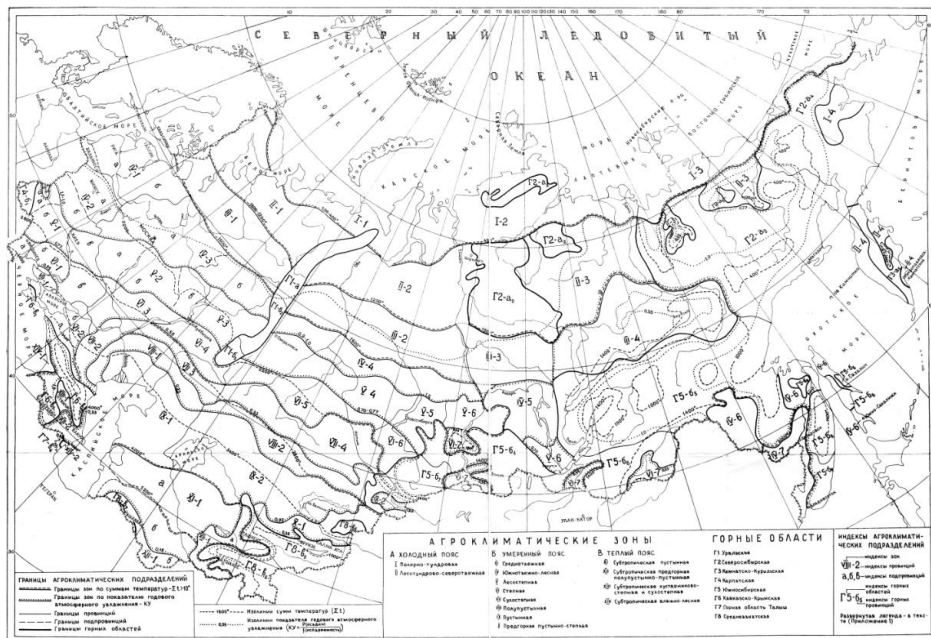
На территории субъектов расположено разное количество ГМС, оно меняется от нескольких пунктов наблюдений до нескольких десятков. Число муниципальных районов в большинстве случаев существенно превышает количество ГМС в субъекте. Например, в Ульяновской области 21 муниципальный район, а ГМС всего 10. При этом считалось, что значения метеопараметров для районов, в которых расположена ГМС, характеризуют погодные условия этого района. Таким образом, стояла задача, как получить метеорологическую информацию для тех районов, в которых не было станций. Для решения этой задачи использовался метод обратных взвешенных квадратов расстояний, о котором подробно будет сказано ниже.

Исследования проводились для районов отдельных субъектов Южно-Северо-Кавказского и Приволжского федеральных округов. Для расчетов использовались данные за период с 2012 по 2017 год. Продолжительность периода зависела от наличия информации о средней районной урожайности в базе данных показателей муниципальных образований. Для учета агроклиматической зональности районы объединялись в группы. Это позволило также увеличить объем выборки и, соответственно, улучшить точность статистических характеристик при проведении анализа полученных рядов. Для этого предварительно осуществлялась дифференциация территории субъектов на зоны на основе карты агроклиматического районирования территории, разработанной Д.И. Шашко [14] (рис. 1).

По Шашко, при агроклиматическом районировании территорию разделяют по показателям обеспеченности вегетационного периода теплом и влагой, а также по условиям перезимовки. В качестве основного показателя теплообеспеченности при районировании принята сумма температур выше 10 °С. Дифференциация территории на зоны и подзоны увлажнения проведена по показателю годового атмосферного увлажнения [14].

В пределах каждого субъекта агроклиматические зоны совмещались с контурами районов. Районы, попадавшие в одну зону, объединялись в соответствующую группу. Пример выделенных таким образом зон для Ростовской области (по Шашко) показан на рис. 2. В большинстве случаев количество групп совпадало с количеством зон в этом субъекте.

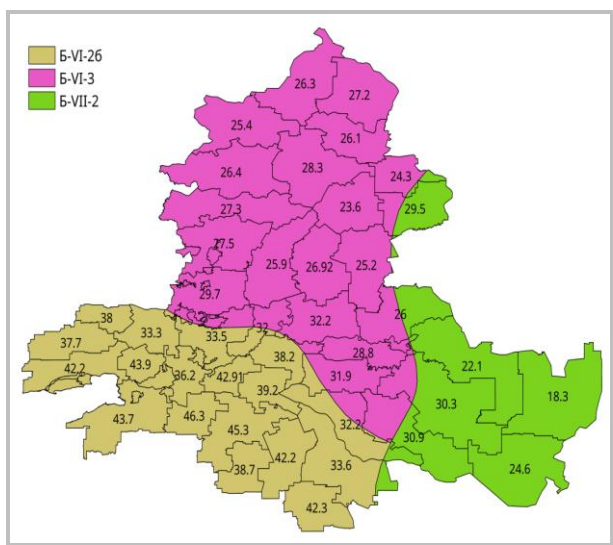
Поскольку карта агроклиматического районирования территории была разработана достаточно давно (1967 г.), осуществлялось дополнительное уточнение выделенных территорий путем сопоставления средних значений районной урожайности за шесть лет, попавших в ту или иную агроклиматическую зону.



Деталь № 119

Рис. 33. Агроклиматическое районирование СССР.

**Рис. 1.** Карта агроклиматического районирования территории, разработанная Д.И. Шашко [14].  
**Fig. 1.** Agroclimatic Regionalization map of the territory, developed by D.I. Shashko.



**Рис. 2.** Агроклиматические зоны (по Шашко) и значения средней районной урожайности (ц/га) для Ростовской области.  
**Fig. 2.** Agroclimatic zones (by Shashko) and average values of district yields (dt/ha) for the Rostov region.

На рис. 2 можно видеть, что в южной части Ростовской области преобладают более высокие значения средней урожайности, чем в северной, что соответствует агроклиматическим зонам. Для районов, расположенных на пересечении зон, дифференциация осуществлялась в зависимости от значений средней районной урожайности. Следует отметить, что после анализа значений средней районной урожайности озимой пшеницы для Ростовской области была выделена дополнительная группа, которая располагалась на пересечении агроклиматических зон. Таким образом, для Ростовской области были определены четыре группы, включающие в себя 96, 90, 54 и 24 наблюдений соответственно. Такой подход позволил существенно увеличить объем выборки.

С целью получения метеорологической информации для районов, в которых ГМС отсутствовали, применялся метод интерполяции обратных взвешенных квадратов расстояний. Идея метода заключается в том, что информация на метеостанциях, которые расположены недалеко друг от друга, может быть более сопоставима, чем на ГМС, удаленных друг от друга. Поэтому в интерполируемое значение вносят больший вклад (вес) ближайшие точки [12]. Вес точки уменьшается как функция от расстояния:

$$w_i = \frac{1}{r_i^2}, \quad (2)$$

где  $r_i$  – расстояние от точки интерполяции до  $i$ -й точки.

Интерполируемое значение рассчитывается по следующей формуле:

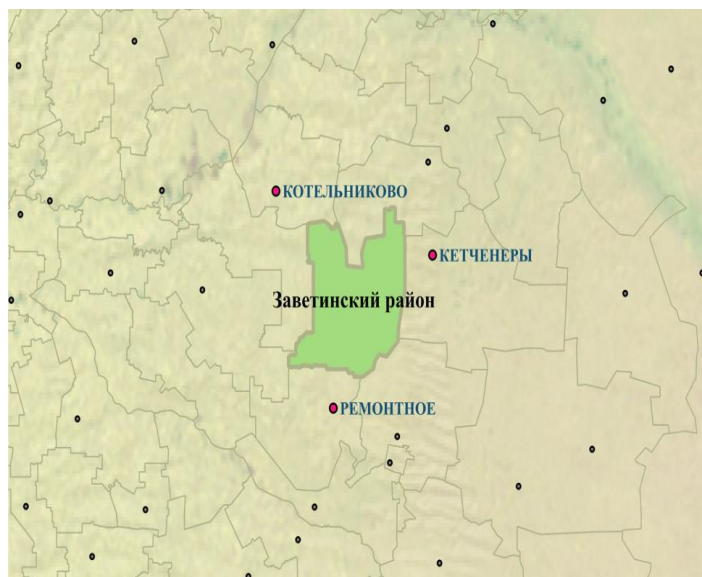
$$N = \frac{\sum_{i=1}^n w_i N_i}{\sum_{i=1}^n w_i}, \quad (3)$$

где  $N$  – рассчитываемое средневзвешенное значение метеопараметра;  $N_i$  – значение метеопараметра точек, попавших в заданную окрестность;  $w_i$  – рассчитываемый вес  $i$ -й точки.

Выбор ГМС для интерполяции осуществлялся с учетом минимального расстояния до условного центра рассматриваемого района и с учетом сторон света. Как было сказано выше, для районов, на территории которых ГМС имеется, использовались метеопараметры этой станции без интерполяции. На рис. 3 на примере Заветинского района Ростовской области показана выборка ГМС, использованных для интерполяции метеорологических данных.

После получения всего набора входной информации осуществлялась предварительная обработка данных путем их центрирования и нормирования. Эта процедура необходима, поскольку исходные статистические ряды для каждого района имеют разную вариабельность и разное среднее (табл. 1), что затрудняет объединение данных для нескольких районов

в один массив. Кроме того, этот подход позволяет избавиться от разноразмерности между параметрами в рядах данных путем приведения их к одному масштабу.



**Рис. 3.** Гидрометстанции, использованные для интерполяции метеорологических данных по Заветинскому району Ростовской области (выделены красным цветом, черным цветом отмечены гидрометстанции, информация с которых не использовалась при интерполяции).

**Fig. 3.** Hydrometeorological stations used for interpolation of meteorological data for the Zavetinsky district of the Rostov region (highlighted in red, hydrometeorological stations are marked in black, information from which was not used for interpolation).

**Таблица 1.** Среднеквадратическое отклонение и среднее значение урожайности озимой пшеницы за период с 2012 по 2017 г. для районов Ростовской области

**Table 1.** Standard deviation and average value of winter wheat yields for the period from 2012 to 2017 for the districts of the Rostov region

Группа	Средняя урожайность, ц/га		Среднеквадратическое отклонение	
	Min	Max	Min	Max
1	19,0	26,4	5,5	8,5
2	24,0	30,4	4,8	8,4
3	30,5	46,6	4,8	10,5
4	30,5	33,9	4,8	8,5

Как видно из табл. 1, в Ростовской области, например, значения средней урожайности озимой пшеницы за период с 2012 по 2017 г. для различных районов отличаются. При объединении статистических рядов, после центрирования и нормирования данных, однородность рядов существенно улучшается.

Центрирование – это линейная трансформация величин, при которой средняя величина распределения определенного признака становится равной нулю (формула 4). Направление шкалы и ее единицы остаются при этом неизменными.

$$X_i = V_i - \bar{V}, \quad (4)$$

где  $X_i$  – новое центрированное значение,  $V_i$  – текущее значение,  $\bar{V}$  – среднее значение.

При нормировании осуществляется переход к другому масштабу – стандартизированным единицам измерения. Нормирование чаще всего осуществляется с помощью среднеквадратических отклонений (формула 5):

$$x_i = \frac{X_i}{S}, \quad (5)$$

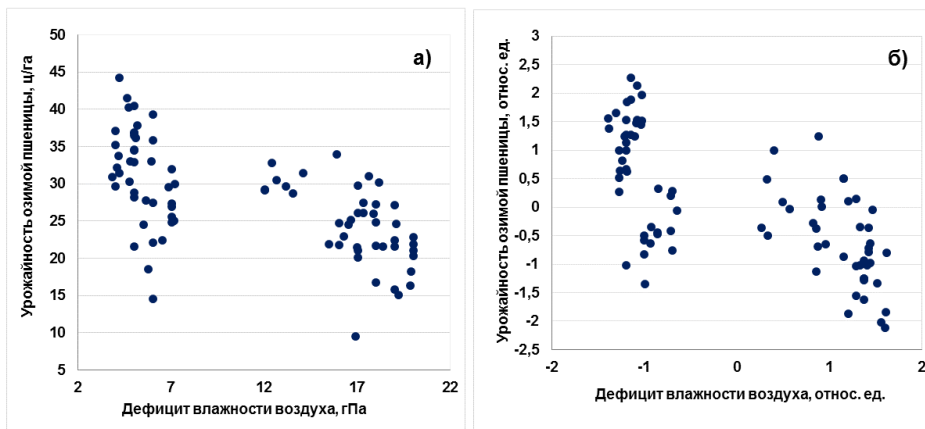
где  $x_i$  – нормированное значение,  $X_i$  – центрированное значение,  $S$  – среднеквадратическое отклонение.

После применения этой процедуры возрастают коэффициенты корреляции, определяющие тесноту связи урожайности с метеорологическими и спутниковыми данными наблюдений. Для примера на рис. 4 показана диаграмма рассеяния, показывающая характер связи между урожайностью и дефицитом влажности воздуха для группы районов Волгоградской области для второй декады мая за период с 2012 по 2017 г. до и после применения процедуры центрирования и нормирования. После такой обработки коэффициент корреляции изменился от -0,61 до -0,68.

Также была проведена проверка данных на наличие экстремальных значений (статистических выбросов) в выборке, которые существенно отличаются от других данных наблюдений. В теории статистического анализа нет однозначного критерия идентификации выбросов, наиболее простой и информативный способ: использование значений стандартизованных остатков.

Стандартизированные остатки вычисляются как разница между наблюдаемыми и предсказанными значениями, деленная на остаточную среднеквадратичную ошибку. Выбросами считались те наблюдения, чьи стандартизированные остатки выходили за пределы диапазона от -2 до 2. Для примера на рис. 5 показаны диаграммы рассеяния для группы районов Ульяновской области для третьей декады мая до и после выявления выбросов.

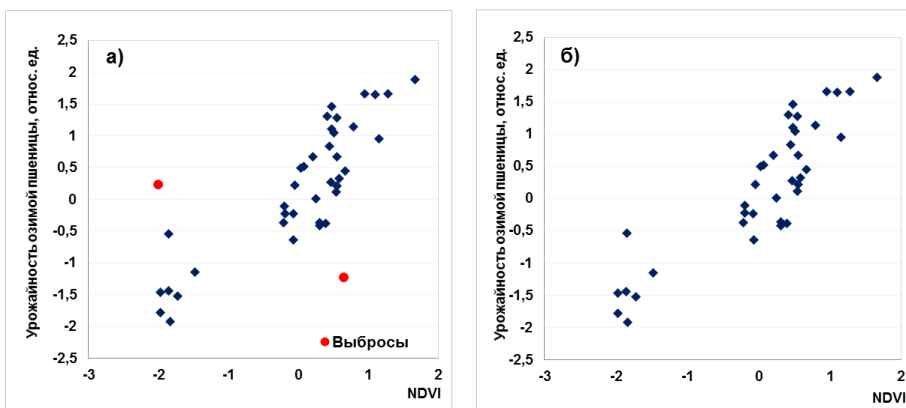




**Рис. 4.** Диаграммы рассеяния дефицита влажности воздуха и урожайности озимой пшеницы для группы районов Волгоградской области для второй декады мая за период с 2012 по 2017 г. до центрирования и нормирования (а) и после центрирования и нормирования (б).

**Fig. 4.** Scatter diagrams of humidity deficit of air and winter wheat yield for the group of districts of the Volgograd region for the 2nd decade of May for the period from 2012 to 2017 before centering and normalization (а) and after centering and normalization (б).

На рис. 5 видно, что значения выбросов существенно отличаются от значений параметров основной выборки, стандартизированные остатки для этих точек равны 2,6 и -3. После удаления выбросов коэффициент корреляции увеличился от 0,79 до 0,88.



**Рис. 5.** Диаграммы рассеяния NDVI и урожайности озимой пшеницы для группы районов Ульяновской области для третьей декады мая после центрирования и нормирования с выбросами (а) без выбросов (б).

**Fig. 5.** Scatter diagrams of NDVI and winter wheat yield for group of districts of the Ulyanovsk region for the 3rd decade of May after centering and normalization with outliers (а) without outliers (б).

## Результаты исследования

После предварительной обработки входной информации, на следующем этапе осуществлялся выбор параметров, оказывающих наибольшее влияние на урожайность озимой пшеницы. Урожайность сельскохозяйственных культур, как известно, зависит от многих факторов, некоторые из них, например почвенные условия, сортовые особенности, агротехнические мероприятия и др., меняются медленно. Агрометеорологические условия характеризуются большой изменчивостью во времени и пространстве, что приводит, соответственно, и к значительным колебаниям урожайности. Для выбора наиболее информативных параметров для построения регрессионных моделей рассчитывались коэффициенты корреляции между спутниковой, метеорологической информацией и средней районной урожайностью озимой пшеницы. Для каждого субъекта анализировался период вегетации в зависимости от ее хода в этом регионе. Например, для субъектов Южного и Северо-Кавказского федеральных округов, где в первой декаде мая уже начинается интенсивное развитие озимой пшеницы, а во второй декаде июня начинается выборочная уборка, исследования проводились с первой декады мая по первую декаду июня. Для районов в субъектах Приволжского федерального округа рассматривался период со второй декады мая по вторую декаду июня. Для примера в табл. 2 показаны коэффициенты корреляции, характеризующие тесноту связей урожайности озимой пшеницы с метеорологическими и спутниковыми данными для групп районов Ростовской области.

Из табл. 2 видно, что наиболее тесные связи наблюдаются между урожайностью озимой пшеницы и спутниковыми индексами. Коэффициенты корреляции с LAI изменяются в пределах от 0,73 до 0,96, с NDVI – от 0,65 до 0,88, с VCI от 0,63 до 0,86. Связь достаточно тесная, поскольку в субъектах на юге России эта культура занимает наибольшую площадь, т.е. преобладает однородный тип растительности, что существенно уменьшает количество помех при измерении отраженной радиации от посевов озимых культур [7]. Из метеорологических параметров наиболее высокие отрицательные коэффициенты корреляции отмечаются с дефицитом влажности воздуха и температурой воздуха, что связано с недостаточной влагообеспеченностью и частой засушливостью этих территорий. Поэтому уравнения регрессии рассчитывались отдельно как с дефицитом влажности, так и с температурой воздуха.

Анализ коэффициентов корреляции был проведен для всех групп районов указанных выше округов. Такой анализ позволил выделить наиболее информативные параметры для построения регрессионных моделей. В табл. 3 для примера представлены регрессионные модели, описывающие зависимость между урожайностью озимой пшеницы и спутниковой и метеорологической информацией для первой группы районов Ростовской области.

**Таблица 2.** Коэффициенты корреляции между спутниковой и метеорологической информацией и средней районной урожайностью озимой пшеницы для групп районов Ростовской области

**Table 2.** Correlation coefficients between satellite and meteorological information and the average district yield of winter wheat for groups of districts of the Rostov region

Группа	Длина ряда	Декада	Спутниковая информация			Метеорологическая информация		
			NDVI	LAI	VCI	T	$\Sigma P$	D
1	96	1 мая	0,66	0,80	0,63	-0,54	0,23	-0,44
		2 мая	0,87	0,90	0,84	-0,75	0,39	-0,82
		3 мая	0,86	0,93	0,85	-0,67	0,13	-0,48
		1 июня	0,81	0,93	0,81	-0,49	0,12	-0,20
2	24	1 мая	0,68	0,81	0,65	-0,49	0,26	-0,51
		2 мая	0,68	0,79	0,65	-0,65	0,76	-0,73
		3 мая	0,79	0,81	0,81	-0,67	-0,12	-0,56
		1 июня	0,80	0,83	0,83	-0,64	0,51	-0,46
3	90	1 мая	0,68	0,73	0,67	-0,52	0,14	-0,56
		2 мая	0,82	0,89	0,80	-0,84	0,15	-0,83
		3 мая	0,88	0,96	0,86	-0,52	0,02	-0,22
		1 июня	0,81	0,88	0,76	-0,33	0,23	-0,05
4	54	1 мая	0,65	0,77	0,64	-0,63	0,24	-0,61
		2 мая	0,82	0,89	0,80	-0,79	0,40	-0,80
		3 мая	0,86	0,91	0,86	-0,66	-0,11	-0,42
		1 июня	0,78	0,84	0,76	-0,57	0,19	-0,24

*Примечание:*  $\Sigma P$  – сумма осадков за декаду, мм; T – средняя декадная температура воздуха, °C; D – дефицит влажности воздуха, гПа.

**Таблица 3.** Регрессионные модели для первой группы районов Ростовской области

**Table 3.** Regression models for the first group of districts of the Rostov region

Декада	Уравнения регрессии с NDVI	R	Уравнения регрессии с LAI	R
1 мая	$Y = 0,65 \cdot NDVI - 0,42 \cdot D$	0,78	$Y = 0,76 \cdot LAI - 0,34 \cdot D$	0,87
2 мая	$Y = 0,59 \cdot NDVI - 0,37 \cdot D$	0,90	$Y = 0,66 \cdot LAI - 0,33 \cdot D$	0,93
3 мая	$Y = 0,80 \cdot NDVI - 0,31 \cdot D$	0,92	$Y = 0,87 \cdot LAI - 0,22 \cdot D$	0,96
1 июня	$Y = 0,81 \cdot NDVI$	0,81	$Y = 0,93 \cdot LAI$	0,93

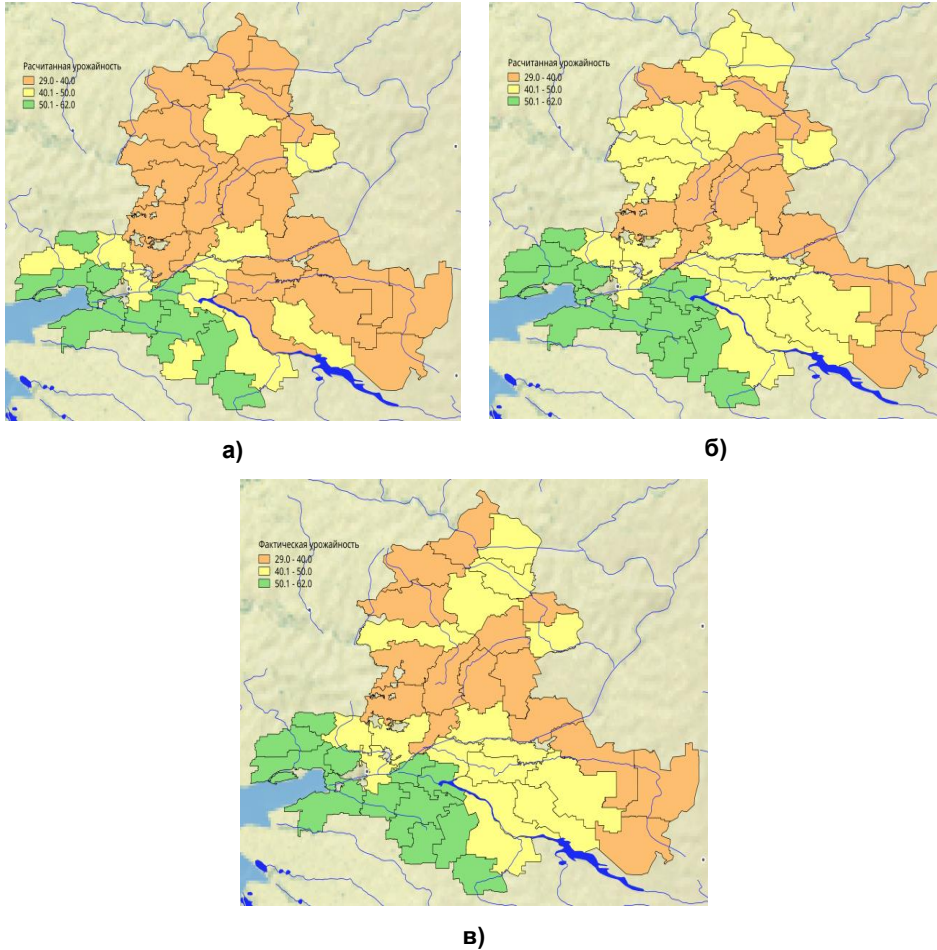
*Примечание:* Y – урожайность озимой пшеницы; D – значение дефицита влажности воздуха; NDVI, LAI – значения вегетационных индексов; R – коэффициент множественной корреляции, коэффициенты множественной корреляции от 0,258 являются значимыми на 5%-ном уровне.

Из таблицы видно, что наблюдаются достаточно высокие коэффициенты множественной корреляции, что свидетельствует о высокой степени связи урожайности со спутниковой и метеорологической информацией. Следует также обратить внимание на более высокие коэффициенты регрессии при NDVI и LAI, чем при дефиците влажности воздуха. Отсюда можно сделать вывод, что вариабельность урожайности связана в большей степени с изменением NDVI и в меньшей степени с изменением дефицита влажности воздуха. Как было сказано ранее, такая особенность характерна в основном для южных регионов России. Для всех групп в субъектах Южного и Северо-Кавказского федеральных округов были разработаны регрессионные модели, значимые по критерию Фишера на 5%-ном уровне, а коэффициенты при переменных значимы по критерию Стьюдента на 5%-ном уровне. Необходимо отметить, что для построения регрессионных моделей использовались данные после центрирования и нормирования (формулы 4, 5). Поэтому рассчитанные оценки ожидаемой средней районной урожайности по регрессионным моделям получаются в относительных величинах и их необходимо обратно преобразовать в абсолютные величины. Для этого, как следует из формул (4), (5) для каждого района, полученную оценку нужно умножить на среднеквадратическое отклонение средней районной урожайности и к полученной величине прибавить значение средней урожайности озимой пшеницы. Нами была произведена оценка ожидаемой средней районной урожайности озимой пшеницы по полученным моделям, которая показала хорошие результаты. Для примера на рис. 6 для районов Ростовской области приведены карты значений фактической и рассчитанной средней районной урожайности озимой пшеницы за 2017 год.

На приведенных рисунках можно видеть достаточно хорошее совпадение рассчитанной и фактической урожайности озимой пшеницы, улавливается тенденция изменений, как в большую, так и в меньшую сторону. Для всех районов, за исключением Заветинского, относительная ошибка не превышает 10 %. Средняя относительная ошибка расчета по NDVI составляет 5,7 %, при использовании LAI – 3,8 %. В табл. 4 показана средняя относительная ошибка расчета за 2017 г. для субъектов Южного (Ростовская, Волгоградская области, Краснодарский край) и Северо-Кавказского (Ставропольский край) федеральных округов весенне-летней вегетации озимой пшеницы.

Для проверки точности и устойчивости полученных статистических регрессионных моделей были рассчитаны значения средней районной урожайности озимой пшеницы по метеорологическим и спутниковым данным 2019 года, которые не вошли в объем выборки, использованной для построения моделей, т. е. можно считать, что проверка оправдываемости в 2019 г. проводилась на независимом материале (табл. 5). Согласно [2], в качестве критерия оправдываемости расчетов (прогнозов), как принято в Росгидромете, использовалась формула относительной ошибки

(Р). Оправдываемость рассчитывается по формуле  $(100\% - P)$ . Качество агрометеорологических прогнозов оценивается по шкале: оправдываемость 91 % и более – 5 баллов; 90–81 % – 4 балла; 80–70 % – 3 балла; менее 70 % – 0 баллов.



**Рис. 6.** Средняя районная урожайность озимой пшеницы (ц/га) по Ростовской области: рассчитанная урожайность (ц/га) по NDVI и дефициту влажности воздуха (гПа) для третьей декады мая 2017 г. (а); рассчитанная урожайность (ц/га) по LAI и дефициту влажности воздуха (гПа) для третьей декады мая 2017 г. (б); фактическая урожайность (ц/га) за 2017 г. (в).

**Fig. 6.** Average districts yield of winter wheat (dt/ha) for Rostov region: calculated yield (dt/ha) using NDVI and humidity deficit of air (hPa) for the 3rd decade of May 2017 (a); calculated yield (dt/ha) using LAI and humidity deficit of air (hPa) for 3rd decade of May 2017 (б); actual yield for 2017 (в).

**Таблица 4.** Средняя относительная ошибка расчета ожидаемой средней районной урожайности озимой пшеницы в 2017 г.

**Table 4.** Average relative error in calculating the expected average district yield of winter wheat for 2017

Край, область	Параметр	Средняя относительная ошибка по декадам, %			
		Первая декада мая	Вторая декада мая	Третья декада мая	Первая декада июня
Краснодарский край	NDVI	11,70	4,28	4,71	2,80
	LAI	11,16	3,41	3,43	5,11
Ставропольский край	NDVI	9,04	5,06	5,96	4,35
	LAI	7,28	6,25	7,88	5,91
Волгоградская область	NDVI	15,9	8,76	8,06	8,30
	LAI	12,03	7,93	7,43	7,50
Ростовская область	NDVI	17,79	8,46	5,72	9,10
	LAI	12,86	5,21	3,84	4,43

**Таблица 5.** Оправдываемость расчетов средней районной урожайности озимой пшеницы для субъектов Южного и Северо-Кавказского федеральных округов за 2019 г.

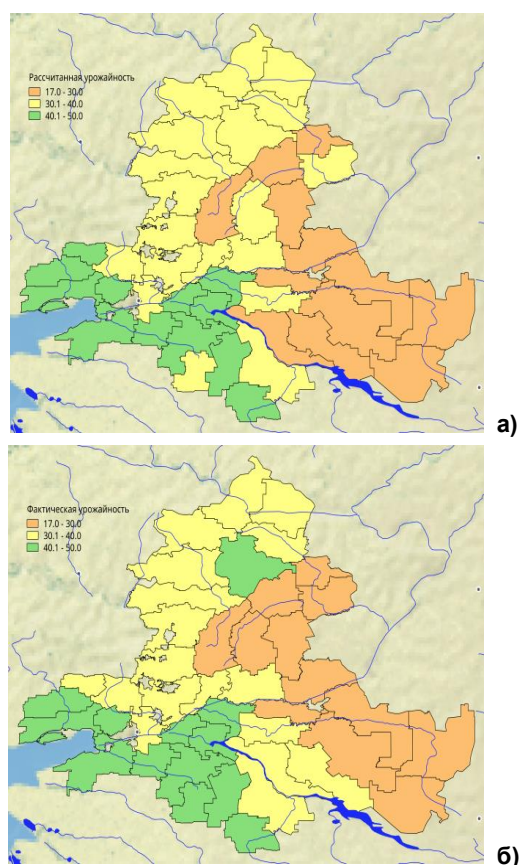
**Table 5.** Accuracy of calculations of the average district yield of winter wheat for the regions of the North Caucasus UGMS for 2019

Область, край	Оправдываемость по декадам, %			
	Первая декада мая	Вторая декада мая	Третья декада мая	Первая декада июня
Краснодарский край	94	92	95	81
Ставропольский край	74	81	80	86
Волгоградская область	88	82	82	89
Ростовская область	92	91	85	92

Как видно из табл. 5, наблюдается хорошая оправдываемость, за исключением Ставропольского края. Это объясняется тем, что в Ставропольском крае в первой декаде мая агрометеорологические условия были благоприятными. С наблюдаемыми погодными условиями ожидалась урожайность выше средней многолетней. В конце третьей декады мая агрометеорологические условия ухудшились, и половина края была охвачена атмосферной засухой средней интенсивности. До конца первой декады июня на большей части Ставропольского края наблюдалась атмосферная засуха сильной и средней интенсивности. Засуха поразила значительную часть посевов, что привело к снижению их продуктивности. По расчетам,

выполненным на конец первой декады июня, ожидалась более низкая урожайность, чем на конец первой декады мая. Рассчитанные значения ожидаемой урожайности за первую декаду июня наиболее близки к фактическим значениям. Можно предположить, что при отсутствии засушливых условий урожай мог быть гораздо выше и соответствовал бы расчетным значениям для первой декады мая.

Для примера сравнение фактических и рассчитанных значений средней районной урожайности озимой пшеницы по Ростовской области за первую декаду июня 2019 г. показано на рис. 7, где можно видеть, что рассчитанные данные хорошо согласуются с фактическими, улавливается пространственная изменчивость урожайности.



**Рис. 7.** Средняя районная урожайность озимой пшеницы (ц/га) по Ростовской области: рассчитанная урожайность (ц/га) по NDVI и дефициту влажности воздуха (гПа) для первой декады июня 2019 г. (а); фактическая урожайность (ц/га) за 2019 г. (б).

**Fig. 7.** Average districts yield of winter wheat (dt/ha) for the Rostov region: calculated yield (dt/ha) using NDVI and humidity deficit of air (hPa) for 1 decade of June 2019 (a); actual yield (dt/ha) for 2019 (b).

Разработанный метод позволяет проводить мониторинг динамики условий развития и формирования продуктивности посевов сельскохозяйственных культур от декады к декаде и выявлять районы с оптимальными и неблагоприятными условиями формирования урожая.

### Заключение

Проведенные исследования выявили достаточно высокую статистическую связь между средней районной урожайностью озимой пшеницы и спутниковыми индексами в виде NDVI, VCI и LAI и метеорологическими параметрами (средний дефицит влажности воздуха за декаду, средняя декадная температура воздуха и сумма осадков за декаду). При этом более тесная корреляция наблюдается с показателями спутниковой информации, что подчеркивает важность ее использования при мониторинге состояния посевов озимой пшеницы, в первую очередь для регионов с достаточно большими посевными площадями. Для получения метеорологической информации в районах, где не было гидрометеорологических наблюдений, использовался метод интерполяции обратных взвешенных квадратов расстояний.

С помощью метода корреляционно-регрессионного анализа были выбраны наиболее статистически значимые параметры и разработаны соответствующие статистические регрессионные модели количественной оценки урожайности по субъектам Южного и Северо-Кавказского федеральных округов, где сосредоточены большие площади озимой пшеницы. Проверка моделей показала достаточно хорошую оправдываемость, средняя относительная ошибка не превышала 15 %.

Следующим этапом исследований является проведение производственных испытаний полученных регрессионных моделей, что запланировано на 2020–2021 годы. Представляется также необходимым проведение дальнейших исследований как по расширению территорий, для которых возможно построение соответствующих моделей, так и по уточнению зависимостей с использованием новых методов статистического анализа.

### Список литературы

1. База данных показателей муниципальных образований. Федеральная служба государственной статистики (Росстат). <https://www.gks.ru/dbscripts/munst>.
2. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. М.: Гидрометеиздат, 1983.
3. Клеценко А.Д., Савицкая О.В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизованного индекса осадков (SPI) по спутниковой и наземной информации // Труды ГГО. 2014. Вып. 571. С. 147-161.
4. Клеценко А.Д. Оценка состояния зерновых культур с применением дистанционных методов. Л.: Гидрометеиздат, 1986. 190 с.



5. Кононенко С.М., Старостина Т.В. Спутниковые данные в прогнозе урожайности пшеницы для административных районов Сибири // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2018. Т. 1, № 4. С. 94-101.

6. Луян Е.А., Барталев С.А., Крашенинникова Ю.С., Плотников Д. Е., Толпин В.А., Уваров И.А. Анализ развития озимых культур в южных регионах европейской части России весной 2018 года на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 2. С. 272-276.

7. 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. 132-148.

8. Спутниковый сервис анализа вегетации. <http://pro-vega.ru>.

9. Страшная А.И., Русакова Т.И., Зойдзе Е.К. Развитие системы оперативно-агрометеорологического обеспечения аграрного сектора экономики // Развитие сельскохозяйственной метеорологии в России. Обнинск, 2009. С. 306-331.

10. Страшная А.И., Тарасова Л.Л., Богомолова Н.А., Максименкова Т.А., Береза О.В. Прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в центральных черноземных областях на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Труды Гидрометцентра России. 2015. Вып. 353. С. 128-153.

11. Страшная А.И. Состояние и проблемы оперативного агрометеорологического обеспечения сельского хозяйства на федеральном уровне в условиях глобального изменения климата // Труды ВНИИСХМ. 2007. Вып. 36. С. 78-91.

12. Качева Ю.В. Методика интерполяции кусочно-линейных данных об эмиссиях автотранспорта на регулярную модельную сетку // Труды Гидрометцентра России. 2018. Вып. 368. С. 170-180.

13. Шабанов Н.В., Барталев С.А., Ерошенко Ф.В., Плотников Д.Е. Развитие возможностей дистанционной оценки индекса листовой поверхности по данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15, № 4. С. 166-178.

14. Шашко Д.И. Агроклиматическое районирование СССР. М.: Колос, 1967. 336 с.

15. Kogan F. N. NOAA / AVHRR Satellite Data-Based Indices for Monitoring Ag-ricultural Droughts // Monitoring and Predicting Agricultural Drought. Oxford: University Press. 2005. P. 79-89.

16. Saeed U., Wajid S.A., Dempewolf J., Becker-Reshef I., Khan A., Ahmad A. Forecasting wheat yield from weather data and modis ndvi using random forests for punjab province, Pakistan // International Journal of Remote Sensing. 2017. Vol. 38, no. 17. P. 4831-4854.

17. Saha S.K. Retrieval of agrometeorological parameters using satellite remote sensing data // Satellite Remote Sensing and Gis Applications in Agricultural Meteorology. 2004. No. 1182. P. 175-194.

18. Tucker C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // Remote Sensing of the Environment. 1979. Vol. 8. P. 127-150.

19. Wiegand C.L., Richardson A.J., Escobar D.E., Gebermann A.H. Vegetation indices in crop assessments // Remote Sensing of the Environment. 1991. No. 35. P. 105-119.

20. Zhang N., Zhao C., Quiring S.M., Li J. Winter wheat yield prediction using normalized difference vegetative index and agro-climatic parameters in Oklahoma // *Agronomy Journal*. 2017. Vol. 109, no 6. P. 2700-2713.

### References

1. Baza dannykh pokazatelei munitsipal'nykh obrazovaniy. Federal'noi sluzhby gosudarstvennoi statistiki. Available at: <https://www.gks.ru/dbscripts/munst>. [in Russ.].

2. Instruktsiya po otsenke opravdyvaemosti agrometeorologicheskikh prognozov. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1983. [in Russ.].

3. Kleshchenko A.D. Savitskaya O.V. Estimation of space-time distribution yield of grains and standardized precipitation index on satellite and land information. *Trudy GGO [Proceedings of Voeikov Main Geophysical Observatory]*, 2014, vol. 571, pp. 147-161. [in Russ.].

4. Kleshchenko A.D. Otsenka sostoyaniya zernovykh kul'tur s primeneniem distantsionnykh metodov [Assessment of the state of grain crops using remote sensing methods]. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1986, 190 p. [in Russ.].

5. Kononenko S.M., Starostina T.V. Satellite data in forecast for wheat yield for areas of the kemerovo region. *Interexpo Geo-Sibir' [Interexpo Geo Siberia]*, 2018, vol. 1, no 4. pp. 94-101. [in Russ.].

6. Lupyay E.A., Bartalev S. A., Krashennikova Yu. S., Plotnikov D. E., Tolpin V. A., Uvarov I. A. Analysis of winter crops development in the southern regions of the european part of russia in spring of 2018 with use of remote monitoring. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2018. vol. 15, no 2, pp. 272-276. [in Russ.].

7. Plotnikov D.E., Bartalev S.A., Lupyay E.A., Tolpin V.A. Accuracy assessment for winter crops mapping in spring-summer growing season with modis datal. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2017, vol. 14, no 4, pp. 132-148. [in Russ.].

8. Sputnikovyi servis analiza vegetatsii. Available at: <http://pro-vega.ru> [in Russ.].

9. Strashnaya A.I., Rusakova T.I., Zoidze E.K. Razvitie sistemy operativnogo agrome-teorologicheskogo obespecheniya agrarnogo sektora ekonomiki. Razvitie sel'skokhozyaistvennoi meteorologii v Rossii [Development of agricultural meteorology in Russia]. Obninsk, 2009, pp. 306-331. [in Russ.].

10. Strashnaya A.I., Tarasova L.L., Maksimenkova T.A., Bogomolova N.A., Bereza O.V. Forecasting of the yield of grain and leguminous crops in the Central Chernozem Regions based on integration of land and satellite data. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2015, vol. 353, pp. 128-153 [in Russ.].

11. Strashnaya A.I. Sostoyanie i problemy operativnogo agrometeorologicheskogo obespecheniya sel'skogo khozyaystva na federal'nom urovne v usloviyah global'nogo izmeneniya klimata. *Trudy VNIISKHM*, 2007, vol. 36, pp. 78-91 [in Russ.].

12. Tkacheva Yu.V. Metodika interpol'yatsii kusochno-lineinykh dannykh ob emissiyakh av-totransporta na regul'yarnuyu model'nyuyu setku. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2018, no 368, pp.170-180. [in Russ.].

13. Shabanov N.V., Bartalev S.A., Eroshenko F.V., Plotnikov D.E. Development of capabilities for remote sensing estimate of leaf area index from modis data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2018, vol. 15, no 4, pp. 166-178. [in Russ.].

14. Shashko D.I. Agroklimaticheskoe raionirovanie SSSR [Agroclimatic zoning of the USSR]. Moscow, Kolos publ., 1967, 336 p. [in Russ.].

15. Kogan F.N. NOAA / AVHRR Satellite Data-Based Indices for Monitoring Agricultural Droughts. *Monitoring and Predicting Agricultural Drought*. Oxford, University Press, 2005, pp. 79-89.

16. Saeed U., Wajid S.A., Dempewolf J., Becker-Reshef I., Khan A., Ahmad A. Forecasting wheat yield from weather data and modis ndvi using random forests for punjab province, Pakistan. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, vol. 38, no 17, pp. 4831-4854.

17. Saha S.K. Retrieval of agrometeorological parameters using satellite remote sensing data. *Satellite Remote Sensing and Gis Applications in Agricultural Meteorology*, 2004, no 1182, pp. 175-194.

18. Tucker, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of the Environment*, 1979, vol. 8, pp. 127-150.

19. Wiegand C.L., Richardson A.J., Escobar D.E., Gebermann A.H. Vegetation indices in crop assessments. *Remote Sensing of the Environment*, 1991, no 35, pp. 105-119.

20. Zhang N., Zhao C., Quiring S.M., Li J. Winter wheat yield prediction using normalized difference vegetative index and agro-climatic parameters in Oklahoma. *Agronomy Journal*, 2017, vol. 109, no 6, pp. 2700-2713.

*Поступила 29.08.2020 г., одобрена после рецензирования 17.09.2020,  
принята в печать 09.10.2020.*

*Submitted 29.08.2020; approved after reviewing 17.09.2020;  
accepted for publication 09.10.2020.*