

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-111-137>

УДК 632.112:633.1+551.85

Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа

А.И. Страшная, О.В. Береза, П.С. Кланг

*Гидрометеорологический научно-исследовательский центр
Российской Федерации, г. Москва, Россия
chub@mecom.ru*

Приведены результаты исследований влияния агрометеорологических условий на урожайность зерновых и зернобобовых культур. Показана роль культуры земледелия в повышении урожайности и значение метеорологических факторов в изменчивости и колебаниях урожайности. Рассчитана повторяемость засух различной интенсивности в субъектах округа в 2001–2020 гг. по сравнению с 1981–2000 гг. Установлена тесная связь вегетационного индекса NDVI с урожайностью зерновых культур. Рассчитана средняя многолетняя динамика NDVI по неделям вегетации, что позволяет оценивать условия формирования урожайности в конкретном году по сравнению со средними многолетними. Определены периоды наиболее эффективного использования NDVI в прогнозах урожайности. Представлены разработанные регрессионные модели для прогнозирования урожайности на основе совместного использования наземных и спутниковых данных.

Ключевые слова: агрометеорологические условия, засуха, зерновые культуры, урожайность, спутниковая информация, прогноз

Forecasting grain crop yield based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Southern Federal District

A.I. Strashnaya, O.V. Bereza, P.S. Klang

*Hydrometeorological Research Center of Russian Federation,
Moscow, Russia
chub@mecom.ru*

The results of research on the effect of agrometeorological conditions on the yield of grain and leguminous crops are presented. The role of farming culture in increasing productivity and the importance of meteorological factors in the yield variability are demonstrated. The frequency of droughts of various intensities in the subjects of the Southern Federal District in 2001–2020 is calculated as compared to 1981–2000. The NDVI vegetation index highly correlates with the grain crop yield. The average long-term dynamics of NDVI for the vegetation weeks is calculated, which allows assessing conditions for the yield formation in a particular year in comparison with the average long-term ones. The periods of the most effective use of NDVI in yield forecasts are determined. The developed regression models for yield forecasting based on the joint use of ground-based and satellite data are presented.

Keywords: agrometeorological conditions, drought, grain crops, yield, satellite information, forecast

Производство зерна в Российской Федерации в настоящее время является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей сельского хозяйства. Об этом свидетельствуют данные Росстата о росте фактической урожайности и валовых сборов зерна на преобладающей территории регионов страны. В полной мере это относится и к Южному федеральному округу, выделившемуся в 2000 году из Северо-Кавказского федерального округа в составе: Краснодарский край, Астраханская, Волгоградская, Ростовская области и две республики – Калмыкия и Адыгея. В 2014 году в состав округа вошла Республика Крым. Территория округа является одним из наиболее благоприятных в почвенно-климатическом отношении регионов для производства зерна. Однако колебания урожайности и валовых сборов зерна характерны и для субъектов этого округа, особенно для востока территории, где нередки засухи, которые являются основной причиной снижения урожайности [3, 4, 9, 13, 16, 23, 26, 27]. Различия условий увлажнения наблюдаются не только в целом по региону, оно проявляется и внутри субъектов. В то же время обилие тепла и света на всей территории округа позволяет возделывать широкий набор зерновых и зернобобовых культур (далее зерновых) – от ранних яровых зерновых культур и зимующих озимых до поздних теплолюбивых.

Зерновые культуры в округе занимают площадь около 9,0 млн га (в 2020 году – 9,2 млн. га). На больших площадях в регионе возделываются озимые культуры – пшеница, ячмень, рожь, тритикале (около 7,0 млн га), остальные площади занимают ранние яровые зерновые культуры – яровой ячмень и яровая пшеница, овес, горох, а также поздние яровые – кукуруза, рис, просо, гречиха, соя, из которых на площади около 0,8 млн га возделывается кукуруза. Главной зерновой культурой является озимая пшеница, которая дает до 70–75 % валового сбора зерна, собираемого в округе.

Южный федеральный округ (далее ЮФО) играет важнейшую роль в обеспечении продовольственной безопасности Российской Федерации, так как в этом регионе выращивается до 26–27% общероссийского валового сбора зерновых культур [24]. Весьма существенна роль округа в объеме экспорта зерна. Для намечаемого увеличения экспорта зерна необходимо обеспечить дальнейший рост урожайности и стабильность производства зерна [24]. Агрометеорологические прогнозы урожайности зерновых культур, составляемые с большой заблаговременностью, способствуют более точному планированию ожидаемых объемов зерна как для внутреннего потребления, так и для возможных объемов экспорта. Составляемые в настоящее время прогнозы урожайности преимущественно базируются на методах, основой которых являются наземные данные наблюдений гидрометстанций [5, 11]. В связи с недостаточностью

этих данных по ряду культур, входящих в группу зерновых, а также в связи с внедрением в производство новых более продуктивных сортов интенсивного типа, оправдываемость прогнозов в отдельные годы бывает низкой. В связи с развитием методов и технологий спутникового мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур и возможностью получения данных спутниковых измерений в оперативном режиме (или в режиме реального времени), а также архива данных в среде созданного в ИКИ РАН специализированного веб-сервиса «ВЕГА» [1, 6, 12] в последнее десятилетие появилась возможность разработки новых методов количественной оценки состояния посевов и методов прогнозирования урожайности с использованием спутниковых данных [2, 5, 6, 10, 15, 21].

В данной работе в рамках выполнения темы 1.1.7 «Разработка и усовершенствование методов агрометеорологических прогнозов для субъектов федеральных округов Российской Федерации» Направления 1 «Методы, модели и технологии гидрометеорологических расчетов и прогнозов» Плана научно-исследовательских и технологических работ НИУ Росгидромета на 2021 год была поставлена задача разработать метод прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах ЮФО с использованием наземных наблюдений гидрометстанций Росгидромета и спутниковых данных. Для ее решения была сформирована база метеорологических данных: рассчитанные по субъектам средняя температура воздуха по месяцам вегетационного периода – апрель, май, июнь, июль, количество осадков и гидротермические коэффициенты увлажнения за эти же месяцы, а также средние гидротермические коэффициенты увлажнения за май–июнь и май–июль за период 2001–2020 гг. По отдельным субъектам использовались запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы в декаду начала активной вегетации. Для характеристики состояния растений по данным спутниковых измерений использовался наиболее распространенный спутниковый индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) по неделям вегетации, который доступен на сервисе ВЕГА-PRO [18]. Использовалась также средняя по субъектам урожайность зерновых культур (с убранный площади) по данным Росстата за тот же период.

Как показал проведенный нами анализ урожайности зерновых культур, во всех субъектах округа в последние 10–15 лет наблюдалась хорошо выраженная тенденция роста урожайности. Этому способствовало внедрение в производство новых, выведенных отечественными селекционерами более продуктивных и адаптированных к местным условиям сортов, а также применение инновационных технологий возделывания зерновых культур, т. е. рост культуры земледелия [7, 14, 17]. Однако на фоне роста урожайности вследствие повышения культуры земледелия, описываемого обычно линией тренда, колебания ее вследствие погодных условий конкретных лет остаются значительными. Наши исследования и проведенные расчеты тенденций урожайности зерновых культур показали, что темпы

увеличения урожайности в субъектах округа были различными. Наиболее быстрыми темпами в рассматриваемый нами период (2001–2020 гг.) урожайность зерновых культур увеличивалась в Краснодарском крае, где средний погодичный прирост урожайности составлял 0,94 ц/га. Несколько медленнее (со скоростью 0,63 ц/га/год) урожайность росла в Ростовской области. В Волгоградской области и в Республике Калмыкия погодичный прирост урожайности составил 0,30 ц/га и 0,24 ц/га соответственно, а в Республике Крым всего 0,06 ц/га. Колебания урожайности по абсолютной величине в субъектах были различными, однако в благоприятные по погодным условиям годы, особенно по условиям увлажнения, максимальная урожайность в рассмотренный период почти во всех субъектах превышала минимальную в два – два с половиной раза (таблица 1).

Таблица 1. Изменчивость урожайности зерновых культур в субъектах ЮФО (2001–2020 гг.)

Table 1. Variability of grain crop yields in the subjects of the Southern Federal District (2001-2020)

Территория	Урожайность, ц/га						Коэф-т вариации V	
	максимальная	Год	минимальная	Год	Экстремальные отклонения от тренда			СКО
					+	-		
Волгоградская область	26,9	2017	12,0	2010	6,19	7,04	3,78	0,22
Ростовская область	40,4	2017	17,8	2003	8,49	7,35	5,82	0,21
Краснодарский край	57,4	2017	31,0	2003	7,33	8,91	7,40	0,16
Республика Калмыкия	25,6	2016	13,2	2003	4,89	5,77	3,63	0,20
Республика Крым	31,9	2011	14,5	2003	9,66	7,66	4,81	0,22

При этом значительные различия в величине урожайности наблюдались даже в смежные годы, когда культура земледелия обычно меняется мало и, следовательно, изменение/снижение урожайности происходит в основном за счет погодных условий. Чаще всего в южных регионах России резкое снижение урожайности зерновых культур происходит вследствие засушливых условий в первую половину вегетационного периода [16, 22, 25, 26]. Так, например, в Волгоградской области в засушливом 2007 году средняя урожайность зерновых культур составила 17,8 ц/га, а в смежном 2008 году, благоприятном по условиям увлажнения – 24,6 ц/га,

в 2015 году – 17,3 ц/га, а в 2016 году – 24,0 ц/га. В Ростовской области в засушливом 2018 году урожайность была 31,9 ц/га, а в 2017 году – 40,4 ц/га, в Республике Крым в засушливом 2018 году – 15,6 ц/га, а в 2019 году – 26,6 ц/га. Это хорошо отражает динамика NDVI в эти годы, приведенная нами для примера по Республике Крым на рис. 1.

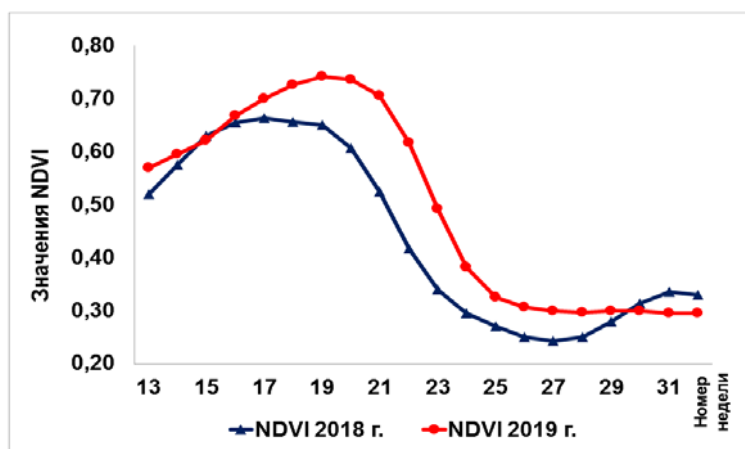


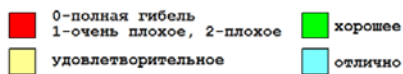
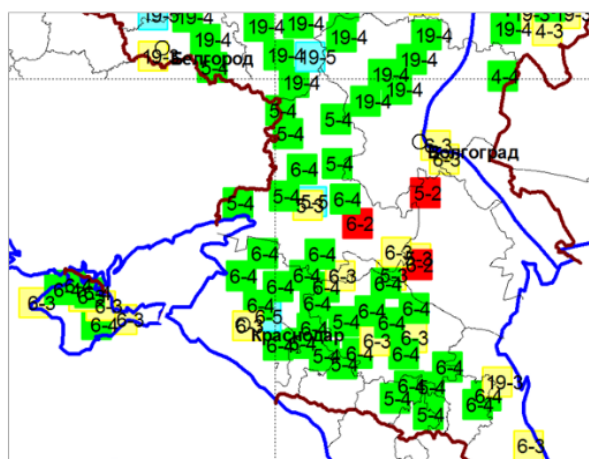
Рис. 1. Динамика NDVI (озимые культуры) по Республике Крым в 2018 и 2019 гг.

Fig.1. Dynamics of NDVI (winter crops) in the Republic of Crimea in 2018 and 2019.

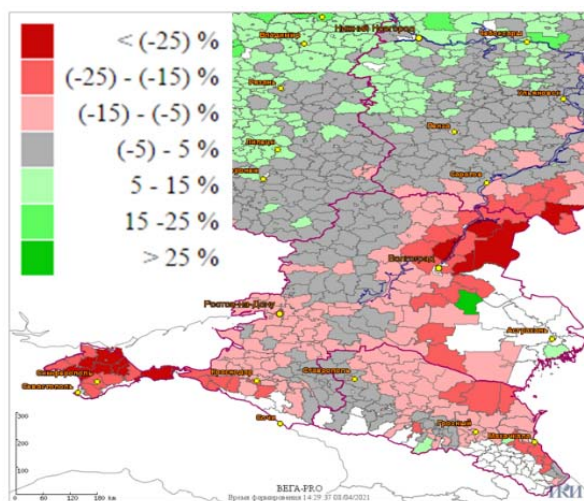
Сильная засуха в Республике Крым, начавшаяся в апреле, способствовала ухудшению состояния растений уже в конце этого месяца. Максимальное значение NDVI, характеризующее состояние посевов, в связи с засушливыми условиями составило всего около 0,66 и наблюдалось уже в 16-ю неделю вегетации, тогда как в благоприятный 2019 год максимальное значение NDVI было около 0,74 и наблюдалось позднее – в 19-ю неделю вегетации.

Аналогичные примеры можно приводить и по другим субъектам. Кроме того, следует отметить, что максимальная урожайность в субъектах округа, где сосредоточены основные площади зерновых культур (Краснодарский край, Ростовская и Волгоградская области) была получена в благоприятном по условиям увлажнения 2017 году (табл. 1), а минимальная урожайность во всех субъектах (кроме Волгоградской области) в 2003 году, когда сильная засуха наблюдалась в основной период вегетации зерновых культур (май–июнь) практически на всей территории округа. В Волгоградской области минимальная за рассматриваемый период урожайность получена в 2010 году, когда засуха в этой области на фоне аномально жаркой погоды была очень сильной и наиболее продолжительной, как и на территории всего Поволжья.

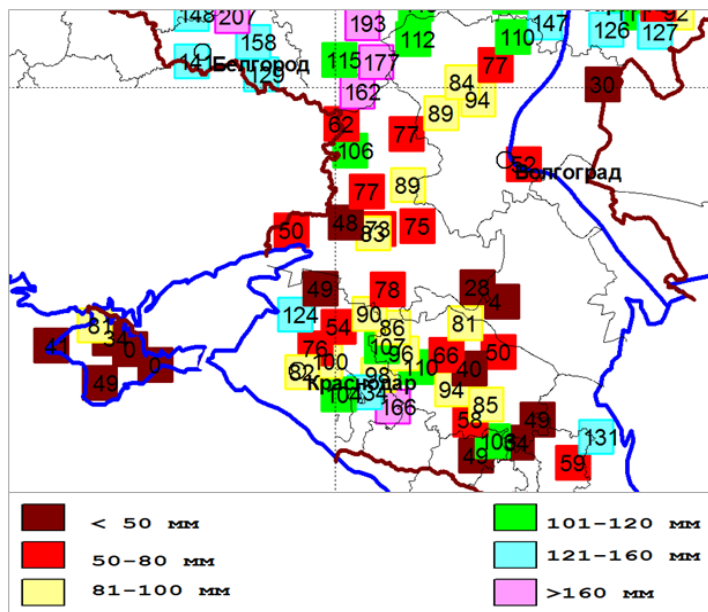
В годы засух, которые чаще всего наблюдаются в условиях повышенного температурного режима, развитие растений (темпы прохождения фенологических фаз) ускоряется, что отрицательно сказывается на преобладающих на этой территории озимых культурах (пшеница). Так, например, в 2018 году дефицит осадков наблюдался на всей территории округа и в апреле, и в мае. По данным гидрометстанций, оценки состояния озимой пшеницы на многих полях уже во второй декаде мая понизились до удовлетворительных (рис. 2а); а в ряде юго-восточных районов Ростовской, южных районов Волгоградской областей, западных районов Республики Калмыкия и в северных районах Республики Крым – и до плохих.



а)



б)



в)

Рис. 2. Ухудшение состояния растений при дефиците осадков в 2018 году: фазы развития и оценки состояния озимой пшеницы во 2-й декаде мая 2018 г. (а); отклонение значений NDVI озимых культур в 2018 г. от значений NDVI в 2017 г., достигнутых к 21-й неделе вегетации (б); запасы влаги под озимыми зерновыми культурами в слое почвы 0–100 см за 2-ю декаду мая 2018 г. (в).

Fig. 2. Deterioration of plants with a shortage of precipitation in 2018: phases of winter wheat development and assessment in the 2-nd decade of May 2018. (a); Deviation of the NDVI values of winter crops in 2018 from the NDVI values in 2017, achieved by the 21-st week of vegetation. (б); moisture reserves under winter grain crops in the soil layer of 0-100 cm for the 2nd decade of May 2018 г. (в).

Ухудшение состояния растений вполне адекватно отражалось и по данным спутниковых измерений (рис. 2б). Во многих этих районах к атмосферной засухе присоединилась почвенная засуха: запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы понизились до 45–50 мм, а на отдельных полях они были менее 40 мм (рис. 2в), что соответствует критерию сильной почвенной засухи.

Количество осадков в апреле в среднем по субъектам составляло в основном от 31 до 51 %, в Республике Крым их почти не было – выпало лишь около 10 % нормы осадков. Почти таким же дефицит осадков (от 30 % до 63% нормы) наблюдался в мае, средняя температура воздуха в этом месяце превышала норму на 2–3 °С. Гидротермический коэффициент увлажнения в апреле (ГТК₄) был в основном 0,10–0,50, что соответствует очень сильной и сильной засухе, лишь в Краснодарском крае 0,69 и в Волгоградской области 0,74 (средняя засуха).

Период апрель–май на юге округа, а май–июнь – в северных районах является «критическим» периодом для озимых культур по отношению к условиям увлажнения. В этот период происходит закладка колосков в колосе и формирование колоса. Неблагоприятным было преобладание жаркой погоды, особенно в мае, когда дневная температура воздуха в большинстве дней первой и третьей декад мая и в отдельные дни во второй декаде повышалась до 29...33 °С, а в третьей декаде на востоке региона почти до 34...39 °С. Средняя температура воздуха за эти декады на 2–5 °С превышала норму. Темпы прохождения фаз развития растений ускорились. Это хорошо заметно на рис. 3, где по данным ИКИ РАН показана динамика вегетационного индекса NDVI (наиболее распространенного показателя, характеризующего состояние посевов), в засушливом 2018 г. по сравнению с умеренно (достаточно) влажным 2017 г. На рис. 3 указаны и даты наступления основных фенологических фаз развития пшеницы в эти годы по данным гидрометстанции Гигант (юг Ростовской области).

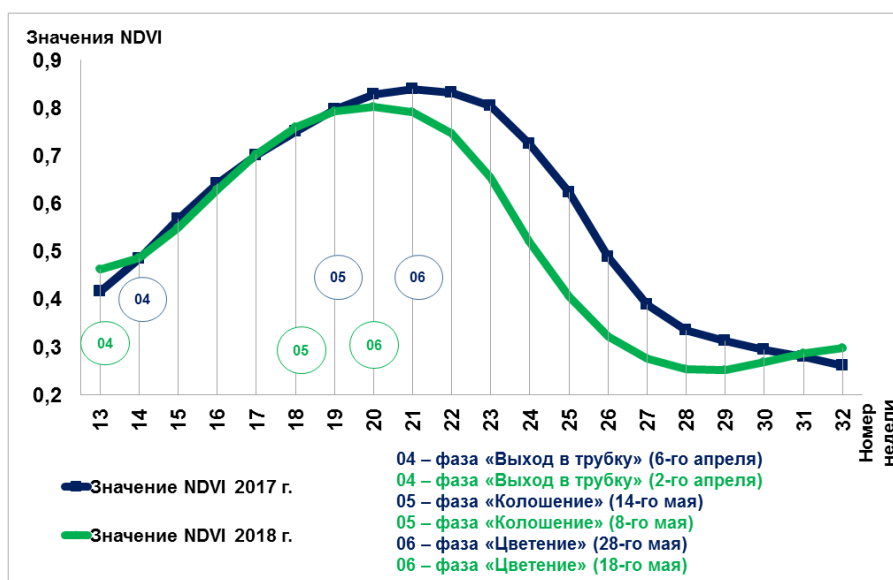


Рис. 3. Динамика NDVI по неделям вегетации озимой пшеницы в Ростовской области и фазы развития (гидрометстанция Гигант) в 2017 и 2018 г.
Fig. 3. Dynamics of NDVI by winter wheat vegetation weeks in the Rostov Region and the development phase (Gigant Hydrometeorological Station) in 2017 and 2018.

Так, фаза «выход в трубку» озимой пшеницы в 2017 г. на наблюдательном участке гидрометстанции Гигант отмечалась 6 апреля, а в засушливом 2018 году – 2 апреля, фаза «колошение», соответственно, 14 мая и 8 мая, «цветение» – 28 мая и 18 мая, т. е. «критический» период

для развития растений «выход в трубку – цветение» из-за ускоренного развития в условиях засухи и повышенной температуры воздуха в 2018 г. был существенно (на шесть дней) короче, чем в 2017 г. Оценки состояния пшеницы в конце второй декады мая понизились до удовлетворительных как в районе деятельности гидрометстанции Гигант, так и в ряде других районов, особенно на востоке Южного федерального округа (рис. 2 а,б). Значение индекса NDVI в Ростовской области в 2018 г., достигнув максимума 0,795 в 19-ю неделю вегетации, уже в 21-ю неделю начало резко уменьшаться, тогда как при достаточном увлажнении в 2017 г. максимальное значение NDVI наблюдалось на две недели позже (рис. 3), и его величина почти на 0,50 была больше (0,843).

Жаркая и засушливая погода наблюдалась в 2018 г. на большей части территории ЮФО и в июне (ГТК₆ составлял в основном 0,33–0,42, в Волгоградской области, где осадков в основном практически не было, он был 0,04, лишь в Краснодарском крае – 0,63). Положительная аномалия температуры воздуха наблюдалась в большинстве дней июня и в среднем за месяц составила 2–4 °С. Поэтому существенное различие значений NDVI сохранялось и в последующий период, когда наблюдался налив зерна. Средний ГТК за май–июнь (ГТК₅₋₆) в Ростовской области составил 0,42. Период налива зерна резко сократился, ускорилось и созревание зерна. Молочная спелость в 2018 г., по данным ГМС Гигант, наблюдалась 2 июня (рис. 3), а восковая спелость уже 18 июня, тогда как в 2017 г. эти фазы отмечались значительно позднее – 12 и 28 июня. Абсолютный вес зерна (масса 1000 зерен в 2018 г.) был значительно меньше обычного около 35 г). В таких условиях урожайность зерновых культур в Ростовской области в 2018 г. составила 79 % от величины урожайности в 2017 г., в Волгоградской области она была на 28 % меньше, чем в 2017 г., в Республике Крым – на 47 %. Лишь в Краснодарском крае различие в величине урожайности в эти годы было существенно меньше – около 10 %.

На рис. 4 показана динамика урожайности зерновых культур и динамика гидротермического коэффициента увлажнения за май–июнь (ГТК₅₋₆) за период 2001–2020 гг. в Краснодарском крае (рис. 4а) и Волгоградской области (рис. 4б), где уровень урожайности и условия увлажнения значительно различаются, но хорошая согласованность отклонений урожайности от трендов и ГТК₅₋₆ наблюдается в обоих субъектах, особенно в Волгоградской области (коэффициент корреляции между урожайностью и ГТК₅₋₆ составил 0,82).

В Краснодарском крае, где самая высокая в округе средняя урожайность этих культур, а также наибольшая изменчивость урожайности (СКО = 7,40), хорошо выражен положительный тренд урожайности ($R^2 = 0,63$) вследствие культуры роста земледелия (линия тренда 1). В среднем за период в крае наблюдалось и существенное улучшение условий увлажнения: ГТК₅₋₆ от значений 1,04 в начале периода увеличил-

ся к концу его до 1,47 (линия 2). Из этого следует, что значительному росту урожайности в крае за период 2001–2020 гг. (на 18,85 ц/га) способствовало два фактора: рост культуры земледелия и улучшение условий увлажнения. В Волгоградской области рост урожайности (линия тренда 1) был выражен слабее ($R^2 = 0,26$), урожайность увеличилась за период лишь на 6,02 ц/га, а условия увлажнения не улучшались (линия тренда 2), а напротив, отмечалось даже некоторое уменьшение $ГТК_{5-6}$: от 0,66 в начале периода до 0,62 в конце его.

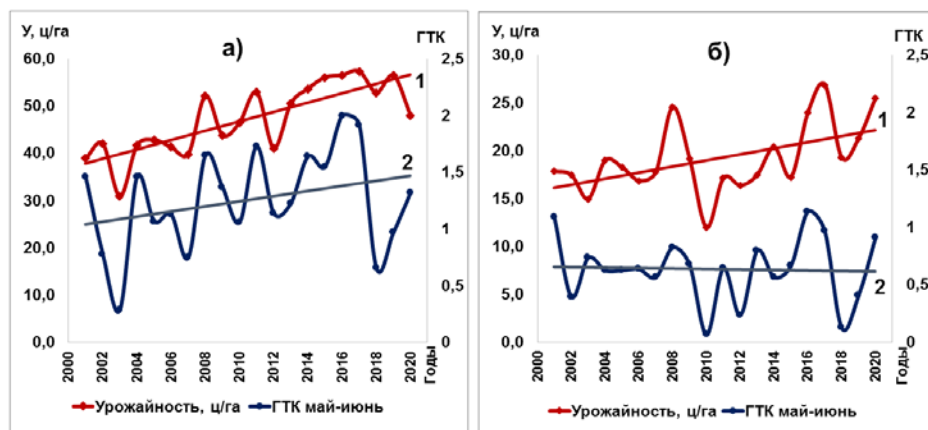


Рис. 4. Динамика урожайности зерновых и зернобобовых культур и динамика гидротермического коэффициента увлажнения за май–июнь ($ГТК_{5-6}$ за период 2001–2020 гг. в Краснодарском крае (а) и Волгоградской области (б).

Fig. 4. Dynamics of grain and leguminous crops yield and dynamics of hydrothermal humidification coefficient for May–June ($ГТК_{5-6}$ for the period 2001–2020 in the Krasnodar Region (a) and in the Volgograd Region (б).

Аналогичные графики за период 2001–2020 гг. были построены и для других субъектов округа. Результаты анализа изменений урожайности по всем субъектам округа приведены в табл. 2.

Для сравнительной характеристики динамики урожайности за более ранний период (1981–2000 гг.) и условий увлажнения аналогичные графики строились также по всем субъектам округа. Результаты анализа также приведены в табл. 2. Оказалось, что если в период 2001–2020 гг. во всех субъектах округа урожайность увеличивалась, то в период 1981–2000 гг. в большинстве субъектов она уменьшалась в разной степени, и лишь в Республике Калмыкия и Ростовской области наблюдаются некоторое увеличение урожайности в среднем от начала к концу периода. Условия увлажнения за период 2001–2020 гг. при наблюдавшемся росте урожайности в среднем несколько улучшились ($ГТК_{5-6}$ увеличился от начала к концу периода на 0,09–0,29, в Краснодарском крае на 0,43), в 1981–

2000 гг. условия увлажнения также в среднем несколько улучшились (ГТК₅₋₆ увеличился от 0,07 в Республике Крым до 0,14 в Волгоградской области), хотя урожайность в основном снижалась (табл. 2, 3). Основной причиной снижения урожайности в этот период являлось снижение культуры земледелия, обусловленное ухудшением материально-технического обеспечения хозяйств в условиях структурной перестройки в сельскохозяйственной отрасли в 1991–1999 годах.

Таблица 2. Изменение урожайности зерновых культур в субъектах ЮФО в периоды 1981–2000 и 2001–2020 гг.

Table 2. Change in the yield of grain crops in the subjects of the Southern Federal District in the periods of 1981-2000 and 2001-2020.

Территория	Урожайность (ц/га) по тренду: 1981–2000 гг. и 2001–2020 гг.					
	1981–2000 гг.			2001–2020 гг.		
	Начало периода	Конец периода	Разница	Начало периода	Конец периода	Разница
Волгоградская область	14,32	12,38	-1,94	16,19	22,21	6,02
Ростовская область	19,67	20,48	0,81	21,25	33,91	12,66
Краснодарский край	36,01	33,75	-2,26	37,92	56,77	18,85
Республика Калмыкия	11,25	13,82	2,57	15,03	22,22	7,19
Республика Крым	32,91	22,18	-10,73	21,65	22,78	1,13

Таблица 3. Изменение условий увлажнения (ГТК₅₋₆) в субъектах ЮФО в периоды 1981–2000 гг. и 2001–2020 гг.

Table 3. Change in humidification conditions (GТK₅₋₆) in the subjects of the Southern Federal District during the periods of 1981-2000 and 2001-2020.

Территория	Значения ГТК ₅₋₆ по тренду: 1981–2000 гг. и 2001–2020 гг.					
	1981–2000 гг.			2001–2020 гг.		
	Начало периода	Конец периода	Разница	Начало периода	Конец периода	Разница
Волгоградская область	0,67	0,81	0,14	0,66	0,62	-0,04
Ростовская область	0,79	0,92	0,13	0,79	0,88	0,09
Краснодарский край	1,26	1,31	0,05	1,04	1,47	0,43
Республика Калмыкия	0,63	0,64	0,01	0,76	0,62	-0,13
Республика Крым	0,74	0,81	0,07	0,77	1,06	0,29

Для более детальной характеристики условий увлажнения в субъектах округа нами были рассчитаны риски (вероятность, %) атмосферных засух различной интенсивности по указанным выше периодам (1981–2000 и 2001–2020 гг.) в основной период вегетации (май–июнь). Использовались при этом средние значения ГТК за эти месяцы (ГТК₅₋₆). Согласно критериям, принятым в агрометеорологической практике Росгидромета, очень сильная засуха характеризовалась значением ГТК $\leq 0,30$, сильная – 0,31–0,60 и средняя – 0,61–0,80 (табл. 4). Слабые засухи не выделялись, так как их влияние на урожайность зерновых культур сказывалось обычно незначительно.

Таблица 4. Риски (вероятность, %) очень сильных (ГТК₅₋₆ $\leq 0,30$), сильных (ГТК₅₋₆ = 0,31–0,60) и средних (ГТК₅₋₆ = 0,61–0,80) атмосферных засух в субъектах ЮФО за период 1981–2020 гг.

Table 4. Risks (probability, %) of very strong (ГТК₅₋₆ $\leq 0,30$), strong (ГТК₅₋₆ = 0,31–0,60) and medium (ГТК₅₋₆ = 0,61–0,80) atmospheric droughts in the subjects of the Southern Federal District for the period 1981–2020.

Территория	1981–2000 гг.						2001–2020 гг.					
	ГТК ₅₋₆ $\leq 0,30$		ГТК ₅₋₆ 0,31–0,61		ГТК ₅₋₆ 0,61–0,80		ГТК ₅₋₆ $\leq 0,30$		ГТК ₅₋₆ 0,31–0,61		ГТК ₅₋₆ 0,61–0,80	
	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%	ч.с.	%
Волгоградская область	3	15	6	30	2	10	2	10	5	25	8	40
Ростовская область	0	0	4	20	4	20	0	0	6	30	3	15
Краснодарский край	0	0	0	0	0	0	1	5	0	0	3	15
Республика Калмыкия	0	0	12	60	2	10	1	5	3	15	3	15
Республика Крым	0	0	7	35	3	15	2	10	2	10	6	30

Примечание. ч.с. – число случаев

Анализируя таблицу, можно видеть, что в первом периоде в большинстве субъектов (кроме Волгоградской области) очень сильных засух (ГТК $\leq 0,30$) не наблюдалось, тогда как во втором периоде одна – две засухи такой интенсивности наблюдались во всех субъектах, за исключением Ростовской области. Сильных засух существенно больше было в первом периоде (по сравнению со вторым периодом) лишь в республиках Крым и Калмыкия. В Волгоградской области вероятность сильных засух в первом периоде была на 5 % больше, чем во втором, и составляла 30 %, в Ростовской области во втором периоде таких засух было больше на 10 %, а в Краснодарском крае засух такой интенсивности не было (табл. 4). При этом нельзя не отметить, что сильные засухи в первом периоде (1981–2000 гг.) были более продолжительными и обширными (1981, 1995, 1998, 1999 гг.), чем во втором периоде (2003, 2007, 2009,

2018 гг.), что, на наш взгляд, явилось дополнительным фактором, оказавшим негативное влияние на урожайность зерновых культур в этот период. Исключение составила лишь жестокая засуха 2010 г., однако такая засуха в 2010 г. наблюдалась в основном только в Волгоградской области. Повторяемость засух средней интенсивности в большинстве субъектов округа во втором периоде была больше на 5–15 % (в Волгоградской области на 30 %), чем в первом периоде, лишь в Ростовской области она была меньше. Таким образом, можно констатировать, что изменение условий увлажнения и влияние засух на урожайность зерновых культур в субъектах ЮФО в разные периоды проявлялось по-разному, в значительной степени – в зависимости от культуры земледелия в том или ином временном интервале, меняющихся агроклиматических условий, а также рисков засух, что необходимо учитывать в земледелии [28].

При анализе теплообеспеченности зерновых культур в основной период вегетации выявилось существенное различие и этого фактора по периодам (1981–2000 и 2001–2020 гг.). Так, во всех субъектах округа наиболее значительный рост средней температуры воздуха за май–июнь (T_{5-6}) наблюдался во втором периоде (2001–2020 гг.), когда значение T_{5-6} от начала к концу периода увеличилось в большинстве субъектов на 2,43–2,61 °С (табл. 5) и лишь в Республике Крым на 1,9 °С.

Таблица 5. Изменение средней за май-июнь температуры воздуха (T_{5-6}) в субъектах ЮФО в 1981-2020 гг.

Table 5. Change in the average May-June air temperature (T_{5-6}) in the Southern Federal District in 1981-2020

Территория	Температура воздуха, °С					
	1981–2000 гг.			2001–2020 гг.		
	Начало периода	Конец периода	Разница	Начало периода	Конец периода	Разница
Волгоградская область	18,31	18,30	-0,01	17,61	20,04	2,43
Ростовская область	18,49	18,32	-0,18	18,03	20,57	2,54
Краснодарский край	17,96	18,36	0,40	18,12	20,73	2,61
Республика Калмыкия	19,94	18,85	-1,09	18,35	21,73	3,38
Республика Крым	17,09	17,96	0,88	17,94	19,84	1,90

В период 1981–2000 гг. небольшой рост T_{5-6} наблюдался лишь в Краснодарском крае (на 0,40 °С за период) и в Республике Крым (на 0,88 °С). В остальных субъектах отмечалось даже некоторое снижение температуры от начала к концу периода (на 0,01–1,09 °С). В целом за весь период (1981–2020 гг.) тренд средней температуры воздуха за май–июнь

(T_{5-6}) был положительным во всех субъектах: от начала к концу этого периода T_{5-6} увеличилась на 1,35–1,92 °С, в Республике Крым и Краснодарском крае – на 2,71 и 2,60 °С соответственно.

Сопоставляя полученные данные о температурном режиме и условиях увлажнения в основной период вегетации (май–июнь), можно сделать следующий вывод: в период 1981–2000 гг. при слабо выраженном улучшении условий увлажнения (слабом росте ГТК₅₋₆ от начала к концу периода) роста T_{5-6} в среднем не наблюдалось, за исключением юго-западных районов округа (Республика Крым и Краснодарский край), где в среднем за период наблюдалось некоторое увеличение T_{5-6} на 0,88 и 0,40 °С соответственно. В 2001–2020 гг. лишь в Республике Крым и Краснодарском крае, как отмечалось выше (табл. 3), наблюдалось некоторое улучшение условий увлажнения (рост значений ГТК₅₋₆ в среднем за период на 0,29 и 0,43). На остальной территории существенных изменений ГТК₅₋₆ в среднем не выявлено, однако во всех субъектах округа наблюдался значительный рост температуры: значения T_{5-6} увеличились в основном на 2,43–2,61 °С, т. е. при слабо выраженных (в среднем) изменениях условий увлажнения в обоих периодах значительные различия наблюдались в динамике температуры в мае–июне, а именно только период 2001–2020 гг. характеризовался значительным ростом средней за эти месяцы температуры воздуха. Сложившуюся тенденцию в хозяйствах необходимо учитывать при выборе сортов, а также сроков сева, особенно яровых зерновых культур.

Выше нами было показано (на примере озимой пшеницы в Ростовской области, гидрометстанция Гигант), что динамика NDVI в разные по условиям увлажнения годы, значительно отличалась. Ускорение в развитии в жаркий и засушливый 2018 г. отрицательно сказывалось на продуктивности растений, так как сокращался период формирования колоса и налива зерна. Засушливые условия в мае–июне не только снижают продуктивность колоса [20, 23, 26, 27], но и приостанавливают увеличение вегетативной массы растений и вызывают щуплость зерна [8]. Для учета особенностей (или аномалий) в развитии растений в ИКИ РАН предложен способ оценки состояния посевов как на качественном уровне (хуже/лучше), так и по алгоритму, позволяющему в автоматизированном режиме рассчитывать величины относительного отклонения текущей динамики вегетационного индекса NDVI от «средней многолетней нормы», которое можно выразить в процентах [25]. Понятно, что для каждого района и типа растительности (культуры) при этом необходимо рассчитывать «свои» средние многолетние значения NDVI по неделям или периодам вегетации.

Нами для этих целей были рассчитаны средние многолетние (за 2001–2020 гг.) значения NDVI (по озимым культурам) по неделям вегетации для каждого субъекта ЮФО. В качестве примера, средняя многолетняя динамика NDVI за период 2001–2020 гг. приведена

по Волгоградской области в сравнении с динамикой NDVI в очень засушливый 2010 год (рис. 5). Можно видеть, что уже с 14-й недели вегетации наблюдается отрицательное отклонение значений NDVI в 2010 г. по сравнению с «нормой», что указывает на существенное ухудшение состояние посевов озимых по сравнению с обычным (нормой) по значениям NDVI. При этом максимальное значение NDVI наблюдалось в 2010 г. уже в 19-ю неделю, тогда как в среднем (по норме) оно приходится на 21-ю неделю. Построенные графики при совместном использовании их с данными наблюдений ГМС позволяют более адекватно оценивать состояние посевов в каждую неделю или декаду вегетации в оперативном режиме.

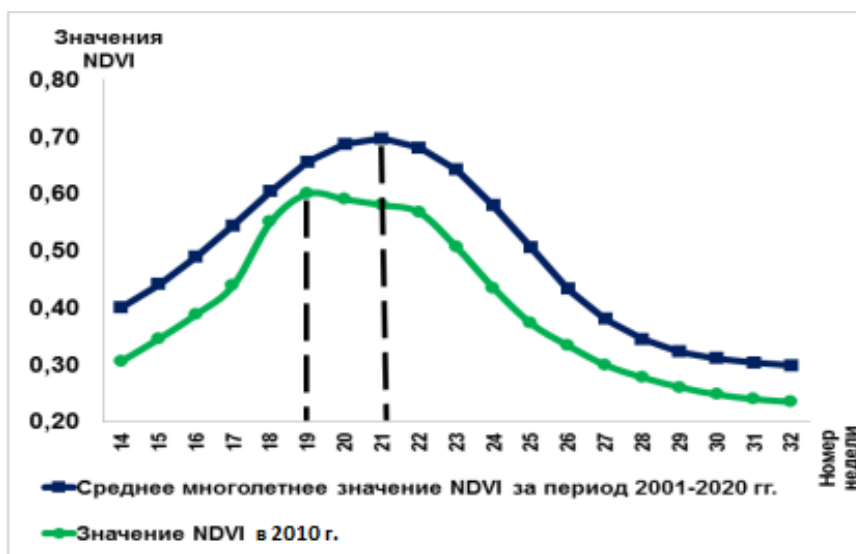


Рис. 5. Средняя многолетняя динамика NDVI за период 2001–2020 гг. и динамика NDVI в 2010 г. по Волгоградской области.

Fig.5. The average long-term dynamics of NDVI for the period 2001-2020 and the dynamics of NDVI in 2010 in the Volgograd Region.

Проведенный анализ временных рядов урожайности зерновых культур показывает, что рост урожайности, характерный для периода 2001–2020 гг., во всех субъектах округа был наиболее значительным в последние пять лет, когда в хозяйствах наиболее широко использовалась интенсивная технология возделывания этих культур и внедрялись новые более продуктивные сорта, выведенные отечественными селекционерами [7, 17]. В связи с этим, в изменившихся погодно-климатических условиях и культуры земледелия при составлении агрометеорологических прогнозов и особенно при разработке методов прогнозов необходимо тщательно учитывать обе составляющие урожайности: культуру земледелия в определенном временном масштабе и погодные условия, проводя предварительный анализ временных рядов урожайности.

Для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур по субъектам ЮФО в сроки, принятые Росгидрометом (3-я декада июня и 3-я декада июля), нами использовались методы регрессионного и корреляционного анализа, а также графический метод, позволившие установить тесноту и характер связей урожайности с гидрометеорологическими факторами и NDVI с учетом полученных результатов исследований агрометеорологических условий в субъектах ЮФО.

С целью более объективной оценки влияния на урожайность агрометеорологических условий, кроме данных Росстата по урожайности зерновых культур за 2001–2020 гг., были дополнительно за этот же период сформированы новые ряды урожайности с исключением построенных трендов урожайности, которые во всех субъектах округа вполне удовлетворительно аппроксимировались уравнениями прямой. Для Ростовской области, например, уравнение имеет вид: $Y = 0,666x + 20,584$ ($R^2=0,469$), где Y – урожайность в ц/га; x – порядковый номер года (2001 г. = 1). Связи урожайности зерновых культур с гидрометеорологическими факторами исследовались нами на основе построенных корреляционных матриц, которые были выполнены в двух вариантах: I – определялась теснота связей гидрометеорологических факторов в субъектах с урожайностью (Y) в субъектах и II – с аномалией урожайности (ΔY). Использовались рассчитанные по субъектам среднемесячная температура воздуха T по месяцам вегетационного периода апрель–июль (T_4, T_5, T_6, T_7), количество осадков R (R_4, R_5, R_6, R_7) и гидротермические коэффициенты увлажнения ($ГТК_4, ГТК_5, ГТК_6, ГТК_7$) за эти же месяцы, а также средние ГТК за май–июнь ($ГТК_{5-6}$) и май–июль ($ГТК_{5-7}$). По отдельным субъектам (Ростовская область) использовались запасы продуктивной влаги в метровом слое почвы на начало вегетации озимых культур. Хотя четкого преимущества по всем указанным факторам первого и второго вариантов исследования связей не выявлено, однако на преобладающей территории связь метеорологических факторов с аномалией урожайности (ΔY) была более тесной, чем непосредственно с урожайностью (Y).

На рис. 6а показана зависимость урожайности зерновых культур ($r=0,43$), а на рис. 6б зависимость аномалии урожайности ($r=0,63$) от средней за май температуры воздуха (T_5) в Волгоградской области, которая типична и для других субъектов.

Отметим, что во всех субъектах связь (Y) с T_5 и (ΔY) с T_5 обратно пропорциональная: повышение температуры способствует понижению урожайности и увеличению отрицательной аномалии урожайности. В апреле связь урожайности с T_4 практически не проявлялась, а в июне и июле в большинстве субъектов она была менее тесная, чем в мае, при этом в июле связь была в основном практически не значима, так как основные зерновые колосовые культуры в этот период уже созревают и идет их уборка. Для поздних культур июль – важный период для формирования урожая, но их доля (вклад в общую урожайность зерновых

культур) невелика. Во всех субъектах округа хорошо проявляется положительное влияние на урожайность условий увлажнения: увеличения осадков и ГТК по месяцам вегетации. Особенно тесными связи были в мае, а в Республике Крым, Краснодарском крае и в Ростовской области и в апреле: коэффициенты корреляции колеблются от 0,40 до 0,53–0,60. Наиболее четко проявлялась связь аномалии урожайности (ΔY), а в отдельных субъектах и урожайности (Y) со средним ГТК за май–июнь ($ГТК_{5-6}$).

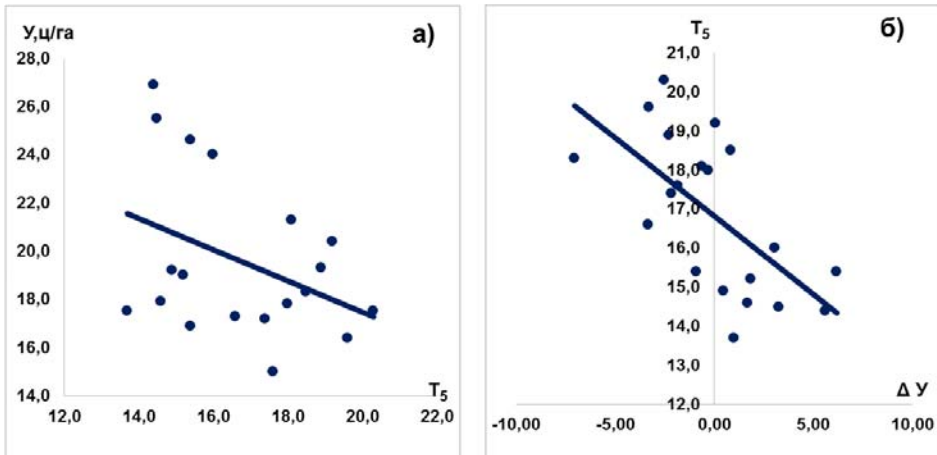


Рис. 6. Зависимость урожайности (Y) зерновых культур (а) и зависимость аномалии урожайности (ΔY) (б) от средней за май температуры воздуха (T_5) в Волгоградской области.

Fig. 6. Dependence of the yield (Y) of grain crops (a) and the dependence of the yield anomaly (ΔY) (б) on the average air temperature (t_5) for May in the Volgograd region.

На рис. 7а показана связь $ГТК_{5-6}$ с урожайностью зерновых культур ($r=0,59$) по Ростовской области, а на рис. 7б – связь аномалии урожайности (ΔY) с $ГТК_{5-6}$ ($r=0,66$), которая типична для большинства субъектов округа. Можно отметить, что наиболее значительные положительные аномалии урожайности наблюдались в основном при $ГТК_{5-6}$, около 0,80–0,90 и более.

Слабее, чем с $ГТК_{5-6}$ проявлялось положительное влияние осадков и ГТК по отдельным месяцам, как и с запасами продуктивной влаги в почве на начало вегетации озимых культур, но в большинстве случаев в июле, а в отдельных субъектах в июне связь (Y) и (ΔY) с этими параметрами (например, в Республике Крым) была ниже значимой на 5%-ном уровне.

В качестве примера временно-корреляционные функции зависимости отклонений урожайности зерновых культур от трендов, или аномалии урожайности (ΔY), по Краснодарскому краю и Республике Крым от агрометеорологических факторов – температуры воздуха, количества осадков

и ГТК по месяцам вегетационного периода (апрель–июль) приведены на рис. 8 а,б.

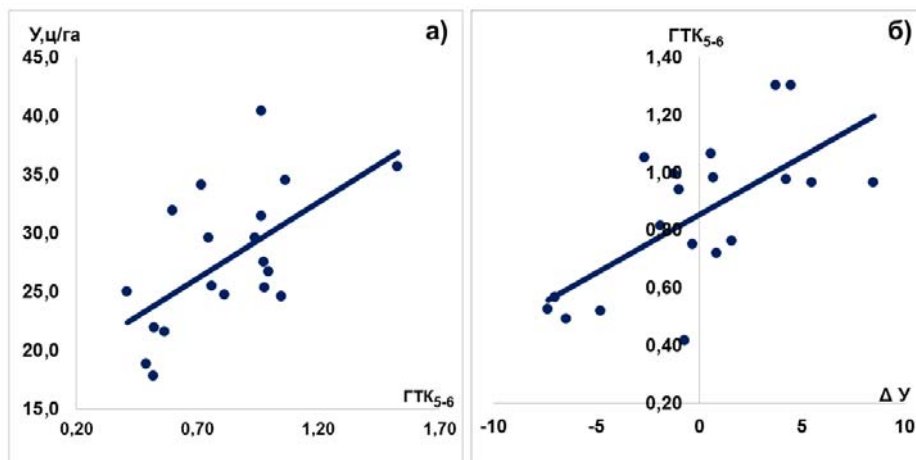


Рис. 7. Зависимость урожайности (Y) зерновых культур (а) и аномалии урожайности (ΔY) (б) от среднего за май–июнь ГТК в Ростовской области.
Fig. 7. Dependence of yield (Y) of grain crops (а) and dependence of yield anomaly (ΔY) (б) on the average for May-June GTC in Rostov Region.

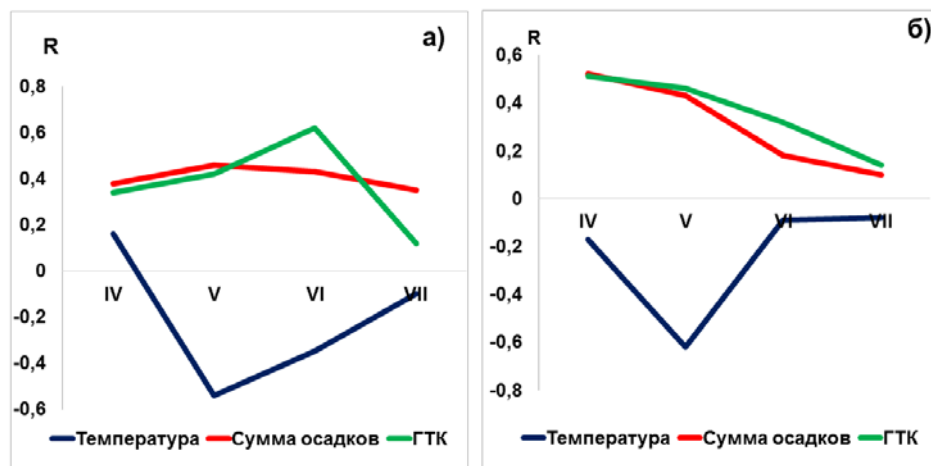


Рис. 8. Временно-корреляционные функции зависимости отклонений урожайности зерновых культур от трендов (аномалии урожайности, ΔY) по Краснодарскому краю (а) и Республике Крым (б) от агрометеорологических факторов: температуры воздуха, количества осадков и ГТК по месяцам вегетационного периода (апрель–июль).
Fig. 8. Temporal-correlation functions of dependence of grain crop yield deviations on trends (yield anomalies, ΔY) in the Krasnodar Krai (а) and the Republic of Crimea (б) on agrometeorological factors - air temperature, rainfall and GTC by months of the growing period (April–July).

Нами также были построены графики связей урожайности зерновых культур с NDVI. На рис. 9 показана связь урожайности (Y) и аномалии урожайности (ΔY) с NDVI по Ростовской (а, б) и Волгоградской (в, г) областям. Отметим, что в этих субъектах, как и во всех остальных субъектах округа, более тесная связь NDVI проявляется с урожайностью (Y), чем с аномалией урожайности (ΔY).

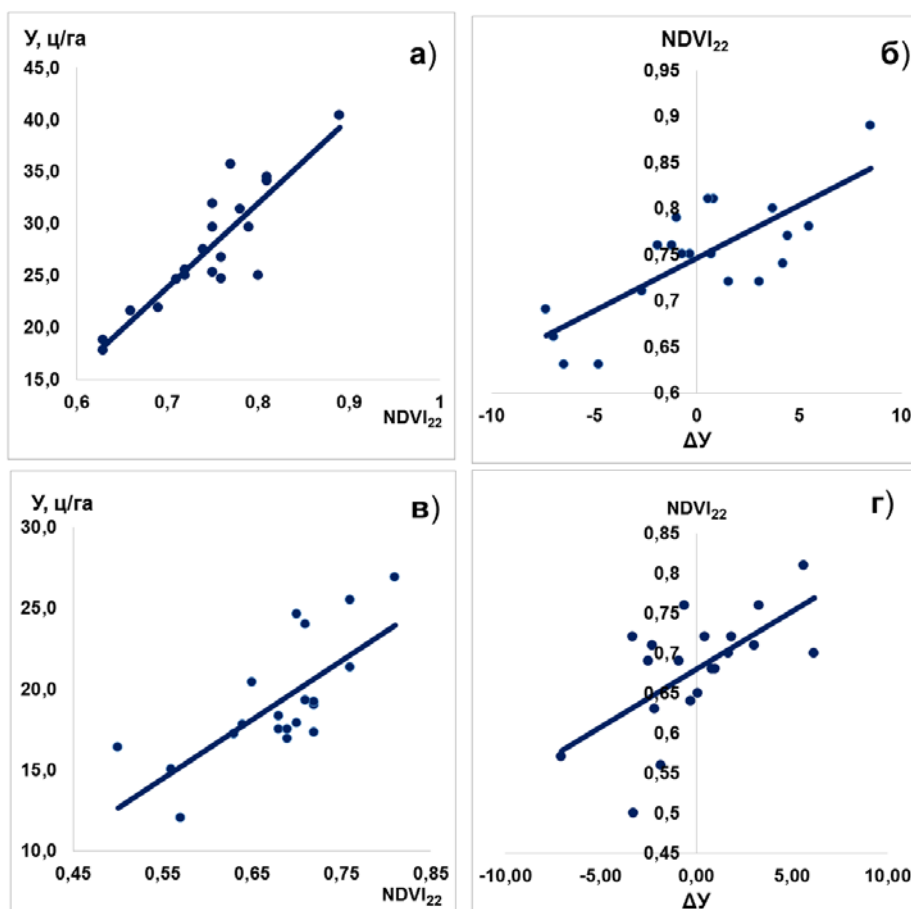


Рис. 9. Связь урожайности (Y) и аномалии урожайности (ΔY) с NDVI по Ростовской (а, б) и Волгоградской (в, г) областям.

Fig.9. The relationship of yield (Y) and yield anomalies (ΔY) with NDVI in the Rostov (а, б) and Volgograd (в, г) Regions.

С целью определения периодов, когда связь урожайности зерновых культур с NDVI является значимой, а следовательно, и возможности использования NDVI в прогностических моделях урожайности в комплексе с метеорологическими параметрами, нами также рассчитывались матрицы парных коэффициентов корреляции между урожайностью этих культур

в субъектах и значениями NDVI по неделям вегетации. Анализ коэффициентов и построенных на их основе временных корреляционных функций позволили выявить периоды значимых, а также наиболее тесных связей урожайности с NDVI. В качестве примера такой функции (динамика коэффициентов корреляции r) по Краснодарскому краю, Ростовской области и Республике Калмыкия приведена на рис. 10.

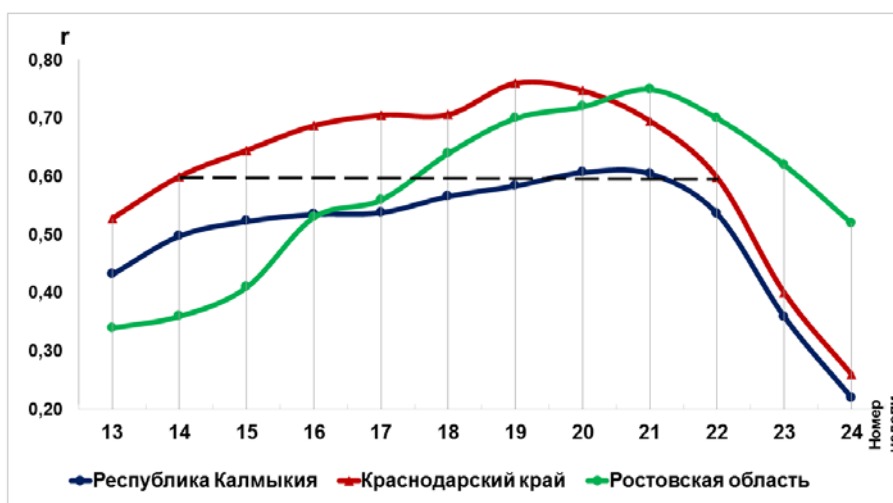


Рис. 10. Связь урожайности зерновых культур с NDVI (динамика коэффициентов корреляции r) за период 2001–2020 гг. по неделям вегетации в Республике Калмыкия, Краснодарском крае и Ростовской области.

Fig.10. Relationship between grain yield and NDVI (dynamics of correlation coefficients, r) for the period 2001–2020 by growing weeks in the Republic of Kalmykia, Krasnodar Krai and Rostov Region.

Следует отметить, что достаточно тесная корреляция урожайности с NDVI ($r=0,60$ и более) в Краснодарском крае наблюдается с 14 по 22-ю неделю вегетации, в Ростовской области с 18 по 22-ю неделю, а в Республике Калмыкия – только в 20–21-ю неделю. Максимальная теснота связей в Краснодарском крае ($r=0,756$) наблюдалась в 19-ю неделю, в Ростовской ($r=0,700$) – в 21-ю неделю. В большинстве лет наибольшая теснота связей совпадает с периодом колошения – начало цветения, и прогнозирование урожайности в этот период является наиболее точным. На максимальную тесноту связей NDVI с урожайностью озимой пшеницы, главной культуры региона, на долю которой приходится до 70–75 % валового сбора зерна в округе, в период колошения указывается и в работах других авторов [19].

При разработке методов прогноза урожайности зерновых культур в использованном нами подходе урожайность в субъектах рассматривалась как сумма двух составляющих: $Упр = Утр + \Delta У$, где $Утр$ –

детерминированная составляющая, определяемая в основном культурой земледелия; ΔY – случайная величина, зависящая главным образом от метеорологических условий и состояния посевов по спутниковым данным в текущем году. В результате проведенных исследований, выявивших значительный вклад в урожайность культуры земледелия, наиболее целесообразным оказался подход, позволяющий прогнозировать урожайность в отклонениях от тренда (ΔY). При этом все метеорологические параметры для прогностической модели, как указывалось выше, рассчитывались в среднем за месяц, а значения NDVI выбирались с учетом тесноты их установленных связей с урожайностью и срока составления прогноза, т. е. использовались в основном значения NDVI, ближайшие к дате составления прогнозов.

В табл. 6 представлены разработанные регрессионные модели для прогнозов урожайности зерновых культур в отклонениях от трендов (ΔY) в сроки: третья декада июня и третья декада июля.

Таблица 6. Значения коэффициентов регрессии в прогностических моделях урожайности (ΔY) и множественные коэффициенты корреляции.
Table 6. Values of regression coefficients in prognostic yield models (ΔY) and multiple correlation coefficients.

	Ростовская область		Волгоградская область		Краснодарский край		Республика Калмыкия		Республика Крым	
	Июнь	Июль	Июнь	Июль	Июнь	Июль	Июнь	Июль	Июнь	Июль
a_1	-1,174	-0,943	-0,66	-0,656*	-0,793		-0,852	-0,762	-0,369	0,531
a_2	0,038						-0,005		2,061**)	
a_3			0,027		-0,005	0,014				
a_4		0,311		2,621		4,657***		-0,145		0,018
a_5					88,674		11,987		57,163	
a_6	27,994		12,966			52,475		13,097		75,484
a_7		34,178		21,761						
C	-2,544	-9,596	1,017	-2,901	-59,183	-48,572	6,832	4,739	-34,281	-57,814
R	0,835	0,822	0,749	0,818	0,728	0,718	0,729	0,739	0,852	0,885

Примечание. a_1 – коэффициент при T_5 ; *) – коэффициент при T_6 ; a_2 – коэффициент при R_4 ; **) – коэффициент при $ГТК_4$; a_3 – коэффициент при R_5 ; a_4 – коэффициент при $ГТК_{5-6}$; ***) – коэффициент при $ГТК_6$; a_5 – коэффициент при $NDVI_{20}$; a_6 – коэффициент при $NDVI_{21}$; a_7 – коэффициент при $NDVI_{22}$; C – свободный член уравнения; R – множественный коэффициент корреляции.

Высокие коэффициенты корреляции моделей и полученные коэффициенты детерминации (R^2) указывают на хорошую связь между фактическими и расчетными отклонениями урожайности от трендов. В Ростовской области, например, в модели для прогнозов в июне R^2 составляет

0,696, что указывает на то, что в 70 % случаев модель достоверно описывает изменение отклонений урожайности от трендов (как положительных, так и отрицательных). При этом нельзя не отметить, что в прогностические модели для второго срока прогноза (июль) входят оказавшиеся наиболее статистически значимыми параметры, характеризующие условия тепло- и влагообеспеченности посевов в апреле, мае и в июне. В июле эти параметры оказались малозначимыми и «отсеивались», так как преобладающие в регионе озимые культуры в июле уже созревают и идет их массовая уборка, начинается уборка и ранних яровых зерновых культур, а вклад поздних культур (у которых критический период приходится на июль) в урожайность зерновых культур в целом небольшой.

Предложенный метод удобен для применения в оперативном режиме. Этому способствует небольшое количество входных параметров в прогностических моделях и автоматизация вычислений. Все метеорологические параметры, входящие в состав модели в автоматизированном режиме рассчитываются (по данным декадных агротелеграмм, поступающих в Гидрометцентр России с сети гидрометстанций Росгидромета) на основе использования прикладных статистических программ, имеющихся на рабочих местах агрометеорологов-прогнозистов в локальной вычислительной сети Гидрометцентра «PROMETEY». Текущие значения NDVI в декаду (неделю), ближайшую к составлению прогноза, берутся с сервиса ВЕГА-PRO.

Авторская проверка оправдываемости разработанных прогностических моделей производилась на зависимых материалах (2001–2019 гг.), а за 2020 г. – на независимых данных, так как данных по окончательной урожайности на момент проверки (январь–февраль 2021 г.) еще не было. Были получены вполне удовлетворительные результаты оправдываемости прогнозов. Относительная ошибка прогнозов составляла преимущественно от 5 до 12 %, в отдельные годы (по Республике Калмыкия и Волгоградской области) она была 14–16 %.

Заключение

Проведенные исследования выявили тенденцию значительного роста урожайности зерновых культур в период 2001–2020 гг. вследствие повышения культуры земледелия. Наибольшим рост урожайности был в Краснодарском крае, где на фоне повышения культуры земледелия в рассмотренный период наблюдалось и некоторое улучшение условий увлажнения: средний гидрометеорологический коэффициент увлажнения в основной период вегетации (ГТК₅₋₆) от начала периода (1,04) увеличился к концу его до 1,47. В остальных субъектах условия увлажнения менялись незначительно, однако значительный рост средней температуры воздуха в эти месяцы был характерен для всех субъектов: увеличение T_{5-6} за период составило 2,41–3,38 °С (в Республике Крым 1,90 °С), что несколько сдерживало рост урожайности. Колебания урожайности

наблюдалось в основном из-за засух, их повторяемость в период 2001–2020 гг. по грациям очень сильная, сильная и средняя рассмотрены в работе по сравнению с периодом 1981–2000 гг.

Для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур на основе построенных корреляционных матриц исследовалась теснота связей метеорологических факторов в апреле–июле в двух вариантах: непосредственно с урожайностью (Y) и с аномалией урожайности (в отклонениях от тренда, ΔY). С целью использования спутниковых данных (NDVI) для учета особенностей динамики этого показателя (нами использовалось NDVI по преобладающим в округе озимым культурам) были рассчитаны средние многолетние значения NDVI за период 2001–2020 гг. и показана их динамика в субъектах по периодам вегетации. Сравнение временного хода «нормы» NDVI со значениями конкретного года позволяет более точно оценивать состояние посевов по сравнению с нормой, особенно в годы засух. В работе показано значительное различие динамики NDVI в годы засух и в годы с достаточным увлажнением. На основе установленной тесноты связей NDVI с урожайностью по неделям вегетации определены периоды наиболее эффективного использования этого показателя для прогнозирования урожайности зерновых культур в комплексе с метеорологическими факторами.

Проведенные исследования позволили разработать метод прогноза урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах ЮФО для сроков, установленных в Росгидромете (третья декада июня и третья декада июля). Проверка оправдываемости метода (на зависимом материале) показала вполне удовлетворительные результаты: относительная ошибка прогнозов составляла в основном от 5 до 12 %, в отдельные годы (Республика Калмыкия и Волгоградская область) – до 14–16 %.

Список литературы

1. Барталев С.А., Лулян Е.А., Нейштадт И.А., Савин И.Ю. Классификация некоторых типов сельскохозяйственных посевов в южных регионах России по спутниковым данным MODIS // Исследование Земли из космоса. 2006. № 3. С. 68–75.

2. Береза О.В., Лулян Е.А., Страшная А.И. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12, № 1. С. 20–35.

3. Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В., Хан В.М., Тарасова Л.Л., Павлова В.Н. Региональные и отраслевые проблемы опустынивания, деградации земель и засух в Российской Федерации // Национальный доклад «Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство). Раздел 4. Т. 2. М.: Из-во МБА, 2019. С. 183–312.

4. *Гордеев А.В., Бутковский В.А.* Россия – зерновая держава. М.: ДеЛи принт, 2009. 470 с.
5. *Грингоф И.Г., Клещенко А.Д.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Т. 1. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2011. 808 с.
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. *Иванисов М.М., Марченко Д.М., Некрасов Е.И., Рыбаев И.А., Гречаникова Т.А., Романюкина И.В., Кравченко Н.С.* Результаты изучения сортов озимой мягкой пшеницы различного эколого-географического происхождения в условиях юга Ростовской области // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6 (66). С. 12-17.
8. *Ионова Е.В., Лиховидова В.А., Лобцкая И.А.* Засуха и гидротермический коэффициент увлажнения как один из критериев оценки степени ее интенсивности // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6 (66). С. 18-22.
9. *Клещенко А.Д.* Современные проблемы мониторинга засух // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 33. С. 3-13.
10. *Клещенко А.Д., Лебедева В.М., Найдина Т.А., Савицкая О.В.* Использование спутниковой информации Modis в оперативной агрометеорологии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. С. 143-154.
11. *Лебедева В.М., Страшная А.И.* Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том II. Методы расчетов и прогнозов в агрометеорологии. Книга 2. Оперативное агрометеорологическое прогнозирование. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2012. 216 с.
12. *Луян 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. *Мещерская А.В.* О показателе засух и урожайности зерновых культур // Метеорология и гидрология. 1988. № 2. С. 91-98.
14. *Попов А.С.* Сроки посева твердой озимой пшеницы // Зерновое хозяйство России. 2019. № 6 (66). С. 28-32.
15. *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.
16. *Самохвалова Н.Е., Дубинина О.А., Самохвалов А.П., Иличкина Н.П.* Роль метеофакторов в формировании продуктивности озимой твердой пшеницы // Зерновое хозяйство России. 2019. № 5. С. 18-23.
17. *Самофалова Н.Е., Иличкина В.П., Авраменко М.А., Дубинина О.А., Дерова Т.Г.* Коммерческие сорта твердой озимой пшеницы и особенности их семеноводства // Зерновое хозяйство России. 2016. № 6. С. 42-47.
18. Спутниковый сервис анализа вегетации. <http://pro-vega.ru>
19. *Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В.* Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12-15.
20. *Страшная А.И.* Использование показателей увлажнения для оценки засушливости и прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур

в Поволжском экономическом районе // Труды Гидрометцентра России. 1993. Вып. 327. С. 15-22.

21. *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 Гидрометцентра России. 2014. Вып. 351. С. 85-107.

22. *Страшная А.И., Коренкова Н.В.* О засушливости в Среднем Поволжье и ее влиянии на урожайность яровой пшеницы // Труды Гидрометцентра России. 2005. Вып. 340. С. 25-34.

23. *Страшная А.И., Максименкова Т.А., Чуб О.В.* Агрометеорологические особенности засухи 2010 года в России по сравнению с засухами прошлых лет // Труды Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 194-214.

24. *Тарасов А.Н., Исаева О.В., Холодова М.А., Удалов А.А., Кабаненко М.Н., Черная А.Е., Удалова З.В.* Аграрный сектор Юга России: современные тенденции и перспективы развития. Ростов-на-Дону: Изд-во ООО «Азов-Приют», 2020. 112 с.

25. *Толпин В.А., Лулян 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.

26. *Уланова Е.С., Страшная А.И.* Засухи в России и их влияние на производство зерна // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 32. С. 64-83.

27. *Фролов А.В., Страшная А.И.* О засухе 2010 года и ее влиянии на урожайность зерновых культур // Сборник докладов совместного заседания Президиума Научно-технического совета Росгидромета и Научного совета РАН «Исследования по теории климата Земли». М.: Триада лтд, 2011. С. 22-31.

28. *Якушев В.П., Жуковский Е.Е.* Анализ последствий изменения климата в земледелии как задача оценки и сравнения рисков // Агрофизика. 2011. № 4. С. 24-39.

References

1. *Bartalev S.A., Loupian E.A., Neyshtadt I.A., Savin I.Yu.* Gropland Area Classification in South Regions of Russia Using MODIS Satellite Data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth Observation and Remote Sensing]*, 2006, no. 3, pp. 68-75. [in Russ.].

2. *Bereza O.V., Strashnaya A.I., Loupian E.A.* On the possibility to predict the yield of winter wheat in the Middle Volga region on the basis of integration of land and satellite data. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from Space]*, 2015, vol. 12, no. 1, pp. 18-30. [in Russ.].

3. *Vil'fand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V., Han V.M., Tarasova L.L., Pavlova V.N.* Regional'nye i otraslevye problemy opustynivaniya, degradatsii zemel' i zasuh v Rossiyskoy Federatsii // Natsional'nyy doklad «Global'nyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: opustynivanie i degradatsiya zemel', institutsional'nye, infrastrukturnyye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe hozyaystvo). Razdel 4. Т. 2. Moscow, Iz-vo MBA, 2019, pp. 183-312. [in Russ.].

4. *Gordeev A.V., Butkovskiy V.A.* Rossiya – zernovaya derzhava. Moscow, DeLi print, 2009, 470 p. [in Russ.].

5. Gringof I.G., Kleshchenko A.D. Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. T. 1. Obninsk, VNIIGMI-MTSD, 2011, 808 p. [in Russ.].
6. Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Storchak I.G., Plotnikov D.E. The possibility of winter wheat yield estimation based on vegetation index of photosynthetic potential derived from remote sensing data. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], 2016, vol. 13, no. 4, pp. 99-112. [in Russ.].
7. Ivanisov M.M., Marchenko D.M., Nekrasov E.I., Rybas I.A., Grichanikova T.A., Romanyukina I.V., Kravchenko N.S. The study results of the winter soft wheat varieties of various ecological and geographical origin in the south of the Rostov region. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [Grain Economy of Russia], 2019, no. 6, pp. 12-17. [in Russ.].
8. Ionova E. V., Likhovidova V. A., Lobunskaya I. A. Drought and hydrothermal humidity factor as one of the criteria to estimate its intensity degree (literature review). *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [Grain Economy of Russia], 2019, no. 6, pp. 18-22. [in Russ.].
9. Kleshchenko A.D. Sovremennye problemy monitoringa zasuh. *Trudy VNIISKHM*, 2000, vol. 33, pp. 3-13. [in Russ.].
10. Kleshchenko A.D., Lebedeva V.M., Naidina T.A., Savitskaya O.V. MODIS satellite data usage in operational agrometeorology. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], 2015, vol. 12, no. 2, pp. 143-154. [in Russ.].
11. Lebedeva V.M., Strashnaya A.I. Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. Tom II. Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kniga 2. Operativnoe agrometeorologicheskoe prognozirovanie. Obninsk, VNIIGMI-MTSD, 2012, 216 p. [in Russ.].
12. Loupian E., Savin I., Bartalev S., Tolpin V., Balashov I., Plotnikov D. Satellite Service for Vegetation Monitoring VEGA. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], 2011, vol. 8, no. 1, pp. 190-198. [in Russ.].
13. Meshcherskaya A.V. O pokazatele zasuh i urozhaynosti zernovykh kul'tur. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1988, no. 2, pp. 91-98. [in Russ.].
14. Popov A. S. The sowing date of winter durum wheat. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [Grain Economy of Russia], 2019, no. 6, pp. 28-32. [in Russ.].
15. Savin I., Bartalev S., Loupian E., Tolpin V., Khvostikov S. Crop yield forecasting based on satellite data: opportunities and perspectives. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from Space], 2010, vol. 7, no. 3, pp. 275-285. [in Russ.].
16. Samofalova N. E., Dubinina O. A., Samofalov A. P., Ilichkina N. P. The meteorological factors' part in winter durum wheat productivity formation. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [Grain Economy of Russia], 2019, no. 5, pp. 18-23. [in Russ.].
17. Samofalova N. E., Ilichkina N. P., Avramenko M. A., Dubinina O. A., Derova T. G. The commercial varieties of winter durum wheat varieties and the features of their seed-growing. *Zernovoe hozyaystvo Rossii* [Grain Economy of Russia], 2016, no. 6, pp. 42-47. [in Russ.].
18. Sputnikovyy servis analiza vegetatsii. Available at: <http://pro-vega.ru>. [in Russ.].
19. Storchak I.G., Eroshenko A.A. Using of NDVI for assessing productivity of winter wheat in Stavropol region. *Zemledelie*, 2014, no. 7, pp. 12-15. [in Russ.].

20. *Strashnaya A.I.* Ispol'zovanie pokazateley uvlazhneniya dlya otsenki zasushlivosti i prognoza urozhaynosti zernovyh i zernobobovyh kul'tur v Povolzhskom ekonomicheskom rayone. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 1993, vol. 327, pp. 15-22. [in Russ.].

21. *Strashnaya A.I., Bartalev S.A., Maksimenkova T.A., Chub O.V., Tolpin V.A., Plotnikov D.E., Bogomolova N.A.* Agrometeorological assessment of winter grain crops condition during the growing season termination using ground and satellite data through the example of the Privolzhskiy Federal District. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2014, vol. 351, pp. 85-105. [in Russ.].

22. *Strashnaya A.I., Korenkova N.V.* O zasushlivosti v Srednem Povolzh'e i ee vliyaniy na urozhaynost' yarovoy pshenitsy. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2005, vol. 340, pp. 25-34. [in Russ.].

23. *Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A., Chub O.V.* Agrometeorological features of a drought of 2010 in Russia in comparison with droughts of last years. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 345, pp. 194-214. [in Russ.].

24. *Tarasov A.N., Isaeva O.V., Holodova M.A., Udalov A.A., Kabanenko M.N., Chernaya A.E., Udalova Z.V.* Agrarnyy sektor YUga Rossii: sovremennyye tendentsii i perspektivy razvitiya. Rostov-na-Donu, Izd-vo OOO «Azov-Priyut», 2020, 112 p. [in Russ.].

25. *Tolpin V.A., Loupian E.A., Bartalev S.A., Plotnikov D.E., Matveev A.M.* Possibilities of agricultural vegetation condition analysis with the «Vega» satellite service. *Optika Atmosfery i Okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2014, vol. 27, no. 7, pp. 581-586 [in Russ.].

26. *Ulanova E.S., Strashnaya A.I.* Zasuhi v Rossii i ih vliyanie na urozhaynost' zernovyh kul'tur. *Trudy VNIISKHM*, 2000, vol. 33, pp. 64-83. [in Russ.].

27. *Frolov A.V., Strashnaya A.I.* O zasuhe 2010 goda i ee vliyaniy na urozhaynost' zernovyh kul'tur. Analiz usloviy anomal'noy pogody na territorii Rossii letom 2010 goda. Moscow, Triada LTD publ., 2011, pp. 22-31. [in Russ.].

28. *Yakushev V.P., Zhukovsky E.E.* Consequence analysis of climate change impact on agriculture as a problem of risk estimation. *Agrofizika [Agrophysics]*, 2011, no. 4, pp. 24-39. [in Russ.].

Поступила 16.04.2021; одобрена после рецензирования 25.05.2021;

принята в печать 21.06.2021.

Submitted 16.04.2021; approved after reviewing 25.05.2021;

accepted for publication 21.06.2021.