

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2022-2-147-167>

УДК 632.112:633.1+551.85

**Агрометеорологические условия  
возделывания зерновых и зернобобовых культур  
и возможности использования спутниковой информации  
для прогнозирования их урожайности  
в субъектах Северо-Кавказского федерального округа**

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

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

Приведены результаты исследований влияния агрометеорологических условий и культуры земледелия на урожайность зерновых и зернобобовых культур в субъектах Северо-Кавказского федерального округа. Рассчитана средняя многолетняя динамика индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) с 12 по 29 недели вегетации за период 2001–2020 гг., что позволяет на качественном уровне оценивать состояние посевов и их возможную продуктивность в конкретном году по сравнению со средними многолетними показателями. С использованием корреляционного и графического анализа установлены связи урожайности с метеопараметрами и NDVI, выявлены периоды наиболее тесных связей. Показана возможность и особенности использования NDVI в прогностических моделях урожайности в республиках Северного Кавказа, где преобладающие в посевах озимые зерновые культуры в условиях наблюдающегося потепления часто вегетируют и в зимний период. Представлены разработанные регрессионные модели для прогнозирования урожайности на основе комплексирования наземных и спутниковых данных.

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

**Agrometeorological conditions  
for cultivation of grain and leguminous crops  
and a possibility of using satellite information  
to predict their yield in the subjects  
of the North Caucasian Federal District**

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

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

The results of studying the influence of agrometeorological conditions and farming standards on the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the North Caucasian Federal District are presented. Average long-term dynamics of the Normalized Dif-

ference Vegetation Index (NDVI) from the 12th to the 29th vegetation weeks for the period of 2001–2020 is calculated, which makes it possible to qualitatively assess crop conditions and possible crop productivity in a particular year as compared to the multi-year means. Using the correlation and graphical analysis, the relationships between the yield and meteorological parameters and NDVI were found, the periods of the highest correlations were revealed. The possibility and features of using NDVI in prognostic yield models in the republics of the North Caucasus, where winter crops prevailing in the region often vegetate in winter under conditions of the observed warming, are demonstrated. The developed regression models for the yield forecasting based on the integration of ground and satellite data are presented.

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

Северо-Кавказский федеральный округ (СКФО), образованный в 2010 году в составе: Республика Дагестан, Республика Ингушетия, Республика Северная Осетия – Алания, Ставропольский край, Кабардино-Балкарская, Карачаево-Черкесская и Чеченская республики является важным аграрным регионом Российской Федерации. В степных и предгорных районах округа природные условия благоприятны для ведения сельского хозяйства. Этому способствуют хорошая теплообеспеченность, достаточное количество выпадающих осадков, равнинный и слабо расчлененный рельеф, плодородные почвы. В то же время значительную часть округа на востоке и северо-востоке занимают сухостепные, горные и полупустынные территории, где земледельческая деятельность существенно затруднена.

Основные посевные площади пахотных земель в округе заняты зерновыми и зернобобовыми культурами (далее – зерновыми). По данным Росстата, по производству зерна округ занимает пятое место в Российской Федерации, обеспечивая до 10–11 % общего валового сбора зерна в стране. Основная доля (более 63 %) валового сбора приходится на озимую пшеницу, занимающую в округе наибольшие площади.

Зерно пшеницы, а также озимого ячменя (в основном из Ставропольского края, где производится 75–76 % валового сбора зерна от его общего сбора в округе) используется не только для самообеспечения округа, но и частично для обеспечения других регионов и экспортных целей. 8–10 % валового сбора зерна производится в Кабардино-Балкарской республике, 8–7 % в Республике Северная Осетия – Алания, до 3,5 % в Карачаево-Черкесской Республике, примерно столько же в Республике Дагестан и около 5 % зерна собирают в Чеченской Республике. В Республике Ингушетия валовой сбор зерна незначителен (менее 1 %). Средний за последние 5 лет валовой сбор зерна в округе составил 11,7 млн т. За период с начала образования округа (2010 г.) по 2020 год самый большой валовой сбор зерна (13,27 млн т) получен в благоприятном по условиям увлажнения 2016 г., а самый низкий (6,67 млн т) в 2012 г., когда на значительной части территории округа (в северных и восточных районах) наблюдалась сильная атмосферная засуха. Средняя по округу урожайность зерновых

культур в 2012 г. составила 25,8 ц/га, тогда как в 2016 г. она была максимальной за указанный период и достигла 42,7 ц/га; отметим, что максимальной в этом году была урожайность и в большинстве субъектов округа.

Анализ временных рядов урожайности зерновых культур в субъектах СКФО за период 2001–2020 гг. (данные Росстата) показал хорошо выраженную тенденцию роста урожайности вследствие повышения культуры земледелия (использования новых наиболее продуктивных сортов, внесения большего количества удобрений, применения новых технологий возделывания), особенно после 2010 года. Скорость роста урожайности в ряде субъектов округа, например в Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республиках (1,51 ц/га и 1,84 ц/га при коэффициентах детерминации линейных трендов  $R^2$ , соответственно, 0,788 и 0,739), была даже выше, чем в Краснодарском крае, где средний погоди́чный прирост урожайности за этот же период составлял 0,94 ц/га [15]. В то же время в Ставропольском крае, где восточные и северо-восточные районы засушливые, погоди́чный прирост урожайности был самым низким из всех субъектов округа и составлял 0,39 ц/га, а  $R^2 = 0,164$ , что указывает на медленный рост культуры земледелия и значительные колебания урожайности вследствие погодных условий. Расчеты показывают, что в ряде субъектов за счет погодных условий разница в урожайности даже в смежные годы (когда культура земледелия не менялась) достигала 5–6 ц/га, в отдельных субъектах до 10 ц/га и более. В связи с этим оценки и прогнозы урожайности и валовых сборов зерна, составляемые с большой заблаговременностью, являются весьма актуальными [4, 5, 8, 10, 13–15].

В то же время в СКФО методы прогноза средней по субъекту урожайности зерновых культур на основе наземных данных наблюдений гидрометстанций (ГМС) Росгидромета были разработаны только для Ставропольского края в конце 80-х – начале 90-х годов прошлого столетия [6]. В связи с изменением агротехники, уменьшением количества данных наблюдений ГМС и в связи с наблюдаемыми климатическими изменениями [2] оправдываемость их в отдельные годы бывает низкой. В остальных субъектах округа были разработаны методы прогнозов лишь по отдельным (основным) культурам (озимая пшеница, кукуруза), но они также устарели. Поэтому для всех субъектов СКФО возникла необходимость разработки новых методов.

В настоящее время, в связи с возможностью использования ставших доступными в режиме реального времени с недельной частотой данных спутникового мониторинга посевов сельскохозяйственных культур практически во всех земледельческих районах (в том числе на предгорной территории юга России), была поставлена задача исследовать возможность применения этих данных (в том числе архивных) для разработки методов прогноза урожайности зерновых культур в субъектах СКФО на основе комплексирования спутниковых данных и наземных наблюдений

гидрометстанций. С этой целью за период 2001–2020 гг. была сформирована база метеорологических данных: средняя температура воздуха  $T$ , количество осадков  $R$ , дефицит влажности воздуха  $d$ , гидротермические коэффициенты увлажнения ГТК по месяцам основного вегетационного периода зерновых культур (апрель – июль):  $T_4, T_5, T_6, T_7; R_4, R_5, R_6, R_7; d_5, d_6$ ; ГТК<sub>5</sub>, ГТК<sub>6</sub>, ГТК<sub>7</sub> и ГТК по отдельным отрезкам этого периода. Для характеристики состояния посевов по данным спутниковых измерений, как и в [12, 13, 15], использовался наиболее распространенной спутниковый индекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) по неделям вегетации, доступный на сервисе ВЕГА PRO [1, 7, 16]. Средняя по субъектам урожайность зерновых культур (в весе после доработки с убранный площади) использовалась по данным Росстата.

Как указывалось выше, фактически во всех субъектах рост урожайности за период 2001–2020 гг. был значительным. Изменение урожайности, рассчитанное на основе линейных трендов, показано в табл. 1, где для сравнения также приведены аналогичные данные и за предшествующие 20 лет (1981–2000 гг.).

**Таблица 1.** Изменение урожайности зерновых культур в субъектах Северо-Кавказского федерального округа (1981–2020 гг.)  
**Table 1.** Variability of grain crop yields in the subjects of the North Caucasian Federal District (1981–2020)

Территория	Урожайность (ц/га)		
	Начало периода	Конец периода	Разница по тренду
<b>1981–2000 гг.</b>			
Республика Дагестан	21,06	12,53	-8,53
Кабардино-Балкарская Республика	35,61	23,12	-12,49
Карачаево-Черкесская Республика	24,78	18,54	-6,23
Республика Северная Осетия – Алания	33,89	20,87	-13,03
Ставропольский край	22,95	22,86	0,09
<b>2001–2020 гг.</b>			
Республика Дагестан	17,29	27,99	10,70
Кабардино-Балкарская Республика	26,51	56,84	30,32
Карачаево-Черкесская Республика	13,12	50,05	36,93
Республика Северная Осетия – Алания	24,23	59,37	35,47
Ставропольский край	29,43	36,86	7,43
<b>1981–2020 гг.</b>			
Республика Дагестан			9,10
Кабардино-Балкарская Республика			22,58
Карачаево-Черкесская Республика			22,57
Республика Северная Осетия – Алания			27,09
Ставропольский край			16,86

Вторая половина периода 1991–1999 гг. пришлась на годы структурной перестройки в аграрной отрасли, которые характеризовались снижением материально-технической базы хозяйств, особенно в республиках Северного Кавказа и, как следствие, значительным снижением урожайности. Кроме того, крайне неблагоприятными в этот период в большинстве субъектов СКФО были сильные и обширные засухи, которые случались чаще, чем в период 2001–2020 гг. (наблюдались в 1991 г, 1995 г, 1998 г. и 1999 г.). В период 2001–2020 гг. сильные, но менее обширные засухи наблюдались только в 2003 и 2012 гг.; в 2010 г, а также в 2020 г. кратковременные засухи наблюдались лишь в ряде северо-восточных районов округа. Данные, приведенные в табл. 2, свидетельствуют об ухудшении условий увлажнения в период 1981–2000 годов.

**Таблица 2.** Изменение условий увлажнения (ГТК<sub>5-7</sub>) в субъектах Северо-Кавказского федерального округа (1981–2020 гг.)

**Table 2.** Change in humidification conditions (ГТК<sub>5-6</sub>) in the subjects of the North Caucasian Federal District (1981–2020)

Территория	Значения ГТК <sub>5-7</sub>		
	Начало периода	Конец периода	Разница по тренду
<b>1981–2000 гг.</b>			
Республика Дагестан	0,73	0,44	-0,29
Кабардино-Балкарская Республика	1,72	1,19	-0,52
Карачаево-Черкесская Республика	-	-	-
Республика Северная Осетия – Алания	-	-	-
Ставропольский край	1,34	1,10	-0,23
<b>2001–2020 гг.</b>			
Республика Дагестан	0,67	0,93	0,26
Кабардино-Балкарская Республика	1,36	1,31	-0,05
Карачаево-Черкесская Республика	2,40	1,90	-0,50
Республика Северная Осетия – Алания	1,32	1,94	0,62
Ставропольский край	1,22	1,07	-0,14
<b>1981–2020 гг.</b>			
Республика Дагестан			0,31
Кабардино-Балкарская Республика			-0,15
Карачаево-Черкесская Республика			-
Республика Северная Осетия – Алания			-
Ставропольский край			-0,21

Рассчитанные нами ГТК (табл. 2) за период май–июль уменьшились от начала к концу периода на 0,23–0,52, т. е. можно констатировать, что снижение урожайности в этот период было обусловлено не только

ухудшением материально-технической базы хозяйств в субъектах округа, но и ухудшением условий увлажнения.

В 2001–2020 гг. при значительном росте урожайности вследствие улучшения культуры земледелия (в Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республиках, например, урожайность увеличилась от начала к концу периода в среднем, соответственно, на 30,32 и 36,93 ц/га) условия увлажнения менялись (ухудшались) незначительно: значения ГТК<sub>5-7</sub> на большей части территории округа уменьшились на 0,05–0,14, (лишь в Карачаево-Черкесской республике на 0,50), а в республиках Дагестан и Северная Осетия – Алания условия даже улучшались (ГТК<sub>5-7</sub> увеличился на 0,26–0,62). Таким образом, в этот период более значимым фактором роста урожайности на преобладающей территории округа было улучшение культуры земледелия.

Можно отметить также, что в целом за период 1981–2020 гг. (40 лет) условия увлажнения на большей части территории возделывания зерновых культур (Ставропольский край и Кабардино-Балкарская Республика) ухудшились незначительно (значения ГТК<sub>5-7</sub> уменьшились лишь на 0,15–0,21), а в Республике Дагестан они даже улучшились (ГТК<sub>5-7</sub> в среднем увеличился на 0,31). Рост средней температуры воздуха за май–июль ( $T_{5-7}$ ) был характерен как для периода 1981–2000 гг. (табл. 3), так и для 2001–2020 гг., при этом более интенсивным он был в 2001–2020 гг., когда увеличение температуры от начала к концу периода составляло 2,17–2,73 °С. В целом за 1981–2020 гг. средняя  $T_{5-7}$  в субъектах увеличилась в основном на 2,17–2,46 °С.

Для более полной характеристики условий увлажнения в субъектах СКФО в период 2001–2020 гг. нами по принятым в Росгидромете критериям [3, 17, 18] была рассчитана повторяемость сильных (ГТК $\leq$ 0,60) и средних (ГТК=0,61–0,80) засух, а также общего их количества (ГТК $\leq$ 0,80) в наиболее важный период для формирования урожая зерновых культур (май и июнь). Полученные данные приведены в табл. 4.

Анализируя таблицу, можно отметить, что в засушливых северо-восточных районах округа (Ставропольский край, Республика Дагестан) повторяемость, а следовательно, и риски сильных и средних засух в июне были больше, чем в мае, что отрицательно сказывалось на формировании урожая как ранних, так и поздних зерновых культур. В остальных районах повторяемость таких засух в мае и июне была почти одинаковой. Так, например, в Ставропольском крае, где сосредоточены основные площади зерновых культур, и в Республике Дагестан повторяемость сильных и средних засух в июне составляла 35–45 %, т. е. засухи такой интенсивности, а следовательно, и риски значительного недобора урожая [19] наблюдались в среднем в 4–5 годах из 10, а в мае повторяемость таких засух составляла 20–25 %. В остальных субъектах повторяемости засух как в мае, так и в июне была небольшой (5–10 %).

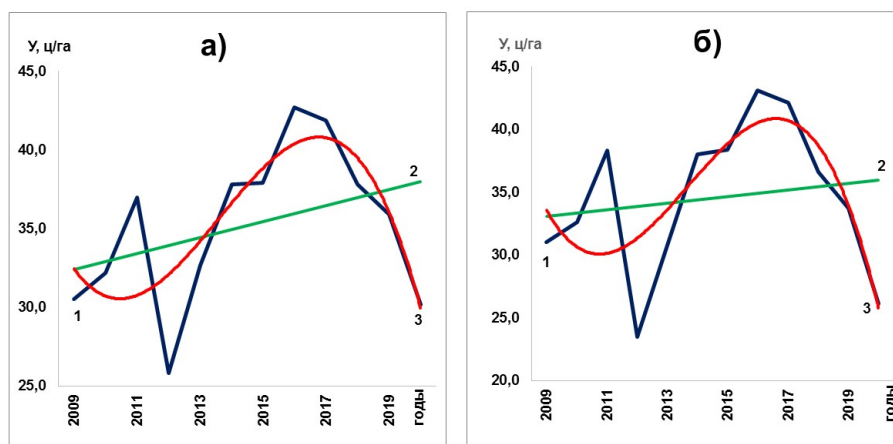
**Таблица 3.** Изменение средней за май–июль температуры воздуха ( $T_{5-7}$ , °C) в субъектах Северо-Кавказского федерального округа (1981–2020 гг.)**Table 3.** Change in the average May–July air temperature ( $T_{5-7}$ , °C) in the subjects of the North Caucasian Federal District (1981–2020)

Территория	Значения $T_{5-7}$ , °C		
	Начало периода	Конец периода	Разница по тренду
<b>1981–2000 гг.</b>			
Республика Дагестан	19,37	20,06	0,69
Кабардино-Балкарская Республика	18,20	20,26	1,06
Карачаево-Черкесская Республика	–	–	–
Республика Северная Осетия – Алания	–	–	–
Ставропольский край	18,76	20,67	1,91
<b>2001–2020 гг.</b>			
Республика Дагестан	19,10	21,83	2,73
Кабардино-Балкарская Республика	19,50	21,68	2,17
Карачаево-Черкесская Республика	17,69	18,03	0,34
Республика Северная Осетия – Алания	20,45	22,82	2,37
Ставропольский край	20,13	22,37	2,24
<b>1981–2020 гг.</b>			
Республика Дагестан			2,17
Кабардино-Балкарская Республика			2,27
Карачаево-Черкесская Республика			–
Республика Северная Осетия – Алания			–
Ставропольский край			2,46

**Таблица 4.** Повторяемость сильных ( $ГТК \leq 0,60$ ), средних ( $ГТК = 0,61–0,80$ ) атмосферных засух и общего их количества ( $ГТК \leq 0,80$ ) в мае и июне в субъектах Северо-Кавказского федерального округа (2001–2020 гг.)**Table 4.** Repeatability of strong ( $ГТК \leq 0,60$ ), medium ( $ГТК = 0,61–0,80$ ) and strong and medium ( $ГТК \leq 0,80$ ) air droughts in May–June in the subjects of the North Caucasian Federal District (2001–2020)

Территория	<b>ГТК ≤ 0,60</b>				<b>ГТК = 0,61–0,80</b>				<b>ГТК ≤ 0,80</b>			
	май		июнь		май		июнь		май		июнь	
	ч.сл.	%	ч.сл.	%	ч.сл.	%	ч.сл.	%	ч.сл.	%	ч.сл.	%
Республика Дагестан	2	10	5	25	3	15	4	20	5	25	9	45
Кабардино-Балкарская Республика	1	5	1	5	1	5	1	5	2	10	2	10
Карачаево-Черкесская Республика	0	0	2	10	2	10	0	0	2	10	2	10
Республика Северная Осетия – Алания	0	0	0	0	2	10	1	5	2	10	1	5
Ставропольский край	1	5	2	10	3	15	5	25	4	20	7	35

Выше отмечалось, что в Ставропольском крае валовой сбор зерна составляет до 75–76 % от его общего валового сбора в округе. Наши исследования показали, что связь между валовым сбором зерна и урожайностью в этом субъекте и валовым сбором и урожайностью в СКФО за период его выделения из Южного федерального округа (т. е. за 2010–2020 гг.), была очень тесная ( $R^2$  равен, соответственно, 0,955 и 0,951). На рис. 1 в качестве иллюстрации показана динамика (1) урожайности зерновых культур ( $Y$ ) в СКФО и Ставропольском крае, для которой характерна хорошо выраженная синхронность урожайности во временном ходе. Следует отметить, что тренды урожайности, описанные полиномом первой степени вида  $y=ax+c$  (2), показывают лишь увеличение урожайности за рассматриваемый период, тогда как уравнения полиномов третьей степени вида  $y=a_1x^3+a_2x^2+a_3x+c$  (3) достаточно адекватно описывают флуктуации урожайности внутри временного ряда. Так, от начала периода до засушливого 2012 г. урожайность снижалась, затем наблюдался ее рост до благоприятного по условиям увлажнения 2016 г., а в конце периода урожайность вновь снижалась (2019 год и в значительно большей степени 2020 год были засушливыми). Отметим, что такой анализ динамики ( $Y$ ) весьма полезен и для территорий других земледельческих районов Российской Федерации для определения периодов роста/снижения урожайности в определенные временные отрезки, а также оценки способствующих этому условий.



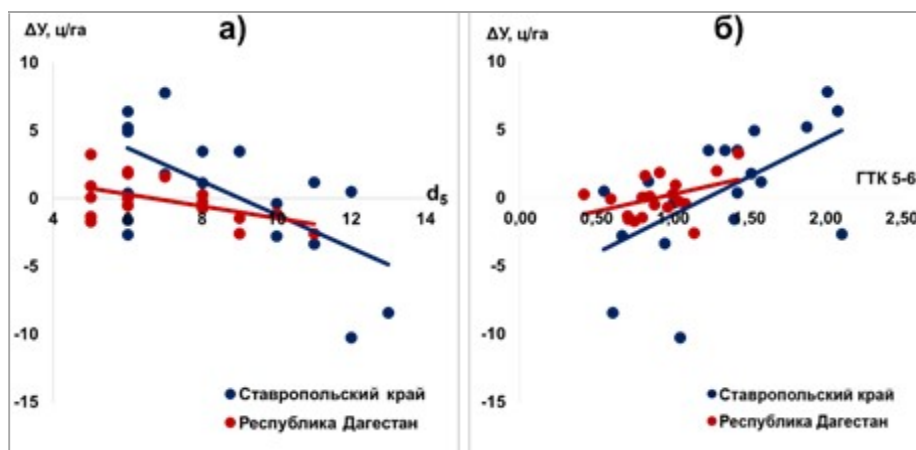
**Рис. 1.** Динамика урожайности ( $Y$ , ц/га) зерновых культур в Северо-Кавказском федеральном округе (а) и Ставропольском крае (б) – 1; тренды первой и третьей степени – 2, 3.

**Fig. 1.** Dynamic of grain crop yields (c/ha) in the subjects of the North Caucasian Federal District (a) and in Stavropol Krai (б) – 1; first and third degree trends – 2, 3.



Для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур в субъектах СКФО использовался подход, примененный нами ранее в работе [15]. На первом этапе исследовались связи урожайности этих культур с метеорологическими факторами. На основе построенных корреляционных матриц определялась теснота связей этих факторов не только с урожайностью ( $Y$ ), но и с ( $\Delta Y$ ), т. е. с аномалией урожайности (отклонениями урожайности от построенных по субъектам линейных трендов). Определялась теснота связей ( $Y$ ) и ( $\Delta Y$ ) со средней температурой воздуха ( $T$ ), количеством осадков ( $R$ ), дефицитом влажности воздуха ( $d$ ), гидротермическими коэффициентами (ГТК) по месяцам вегетационного периода зерновых культур (апрель, май, июнь, июль), а также ГТК по отдельным отрезкам этого периода (ГТК<sub>5.6</sub> и ГТК<sub>5.7</sub>). Оказалось, что в северных и восточных районах округа (Ставропольский край, Республика Дагестан), где значительная часть территорий подвержена частым засухам (табл. 4), наиболее тесные прямые связи наблюдались с показателями влагообеспеченности посевов – количеством осадков, гидротермическим коэффициентом увлажнения в апреле, мае, июне и в значительно меньшей степени – в июле. Коэффициенты корреляции урожайности ( $Y$ ) и аномалии урожайности ( $\Delta Y$ ) с этими показателями колебались в основном от 0,350 до 0,510. Тесные, но обратно пропорциональные связи наблюдались с температурой и дефицитом влажности воздуха в эти месяцы (кроме июля). Повышение температуры воздуха ускоряет процессы формирования колоса, количество колосков в колосе зерновых культур уменьшается, и урожайность их снижается [11, 17, 18]. При увеличении дефицита влажности воздуха увеличивается количество дней с суховеями, в условиях повышенной температуры усиливается их интенсивность, что негативно сказывается на формировании зерна и может вызывать щуплость зерен, что также приводит к снижению урожайности. Коэффициенты корреляции урожайности с этими показателями составляли в основном от -0,420 до -0,560. На юго-западе округа, например в Кабардино-Балкарской и Карачаево-Черкесской республиках, связи урожайности с указанными показателями выражены слабее. Основной причиной этого, на наш взгляд, является тот факт, что в большинстве лет в этих республиках при преобладании умеренного термического режима влагообеспеченность зерновых культур в основной период вегетации бывает вполне достаточной, суховейные явления редки. Необходимо отметить, что почти во всех субъектах теснота связей большинства метеорологических параметров проявлялась более четко с  $\Delta Y$ , чем с  $Y$ . Типичная для большинства субъектов зависимость  $\Delta Y$  от средней за май температуры воздуха по Ставропольскому краю и Республике Дагестан показана на рис. 2а, от среднего гидротермического коэффициента увлажнения за май–июнь (ГТК<sub>5.6</sub>) – на рис. 2б. Необходимо отметить, что в июле связь урожайности зерновых культур практически со всеми метеопараметрами выражена слабо, так как в этот период преобладающие в округе озимые культуры уже созрели,

а на многих полях убораны, начинается созревание и уборка ранних яровых зерновых культур. Для поздних зерновых (например, кукурузы и проса) июль является критическим периодом по отношению к тепло- и влагообеспеченности, однако их доля в формировании средней по субъектам урожайности невелика и, как следствие, коэффициенты корреляции  $Y$  и  $\Delta Y$  с метеофакторами в этом месяце в основном были ниже уровня значимых.

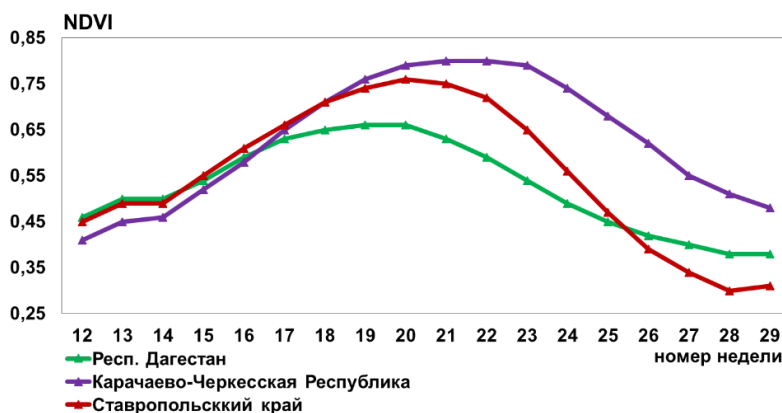


**Рис. 2.** Зависимость аномалии урожайности зерновых культур ( $\Delta Y$ , ц/га) от среднего за май дефицита влажности ( $d_5$ ) (а) и от среднего за май–июнь ГТК (ГТК<sub>5-6</sub>) (б) по Ставропольскому краю и Республике Дагестан.

**Fig. 2.** Dependence of yield anomaly of grain crop yields ( $\Delta Y$ , c/ha) from average for May moisture deficit ( $d_5$ ) (а) and from average for May-June GTK (ГТК<sub>5-6</sub>) (б) in Stavropol Krai and in the Republic of Dagestan.

При исследовании возможности использования данных спутникового мониторинга посевов зерновых культур для разработки метода прогноза урожайности нами были рассчитаны среднемноголетние значения NDVI по неделям вегетации за период 2001–2020 гг. по всем субъектам округа (кроме Республики Ингушетия, где посевные площади зерновых незначительные). При этом использовались значения NDVI по преобладающим в округе озимым культурам ( $NDVI_{оз}$ ). По алгоритму, предложенному в ИКИ РАН [16], в большинстве районов со сравнительно однотипной растительностью по отклонениям текущих (в конкретном году) значений NDVI от средних многолетних значений можно на качественном уровне оценить состояние (хуже/лучше) и ожидаемую возможную продуктивность посевов в текущем году по сравнению со средней многолетней. Такая оценка оказалась полезной и для субъектов СКФО, особенно в аномальные по погодным условиям годы.

На рис. 3 показана динамика рассчитанных нами средних многолетних значений  $NDVI_{03}$  в Республике Дагестан, Карачаево-Черкесской Республике и в Ставропольском крае с 12 по 29-ю недели вегетации. Можно видеть, что значение  $NDVI$  различаются не только по времени достижения максимальных значений, но и в еще большей степени по их величине, т. е. ход и величина  $NDVI$  связаны с большим разнообразием почвенно-климатических и других условий, характерных для каждого конкретного субъекта. На востоке округа – в Республике Дагестан, например, максимальное значение  $NDVI$  наблюдается в 19-ю неделю, тогда как в Карачаево-Черкесской Республике (юго-запад территории) – в 21-ю неделю. Еще более значимая разница прослеживается по максимальным значениям этого показателя. Так, в Республике Дагестан максимальное среднее за 20 лет значение  $NDVI$  составило 0,66, а в Карачаево-Черкесской Республике – 0,80. Отметим, что средняя урожайность зерновых культур за рассматриваемый нами период (2001–2020 гг.) в этих субъектах составляет, соответственно, 22,6 и 31,6 ц/га, т. е. можно констатировать, что максимальное среднее многолетнее значение  $NDVI$  в определенной степени указывает на различия в средней продуктивности посевов в субъектах.

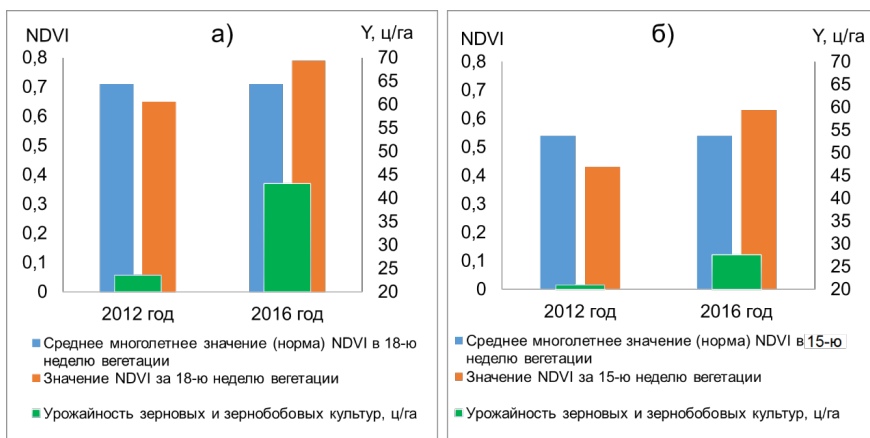


**Рис. 3.** Динамика средних многолетних значений  $NDVI$  в Республике Дагестан, Карачаево-Черкесской Республике и в Ставропольском крае по неделям вегетации (2001–2020 гг.).

**Fig. 3.** Dynamic of multi-year averages of  $NDVI$  in the Republic of Dagestan, in the Karachay-Cherkess Republic and in Stavropol Krai on the vegetation weeks (2001-2020).

Покажем на конкретных примерах различие в отклонениях  $NDVI$  в разные по условиям влагообеспеченности зерновых культур годы и отклонения урожайности в эти годы от средней многолетней урожайности. На рис. 4 показаны средние многолетние значения  $NDVI$  в Ставропольском крае и Республике Дагестан (где часто наблюдаются засухи различ-

ной интенсивности) в недели наблюдаемых тесных связей NDVI с урожайностью (соответственно, 18 и 15-ю недели). Так, в Ставропольском крае, например, где среднее многолетнее значение NDVI в 18 неделю составляет 0,71, в засушливом 2012 г. значение NDVI в эту неделю составило 0,65, или 91 % от среднего NDVI, а в достаточно влажном 2016 г. – 0,79, или 111% от среднего многолетнего. Урожайность в 2012 г. составила 23,5 ц/га, или 71 % от средней многолетней, равной 33,1 ц/га, а в 2016 г. – 43,1 ц/га, т. е. 130 % от средней многолетней. Так же ярко проявилось различие в значениях NDVI в 2012 и 2016 гг. в Республике Дагестан.



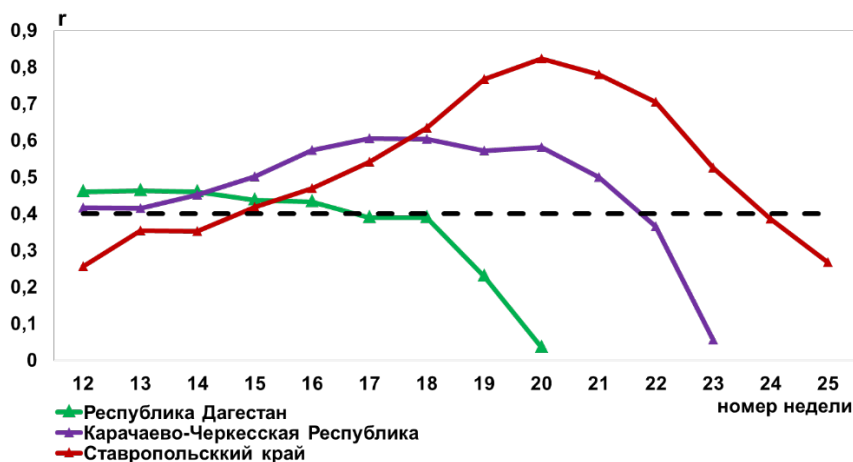
**Рис. 4.** Значение NDVI в 18-ю неделю вегетации по сравнению с NDVI<sub>18</sub> (норма); NDVI в 15-ю неделю по сравнению с NDVI<sub>15</sub> (норма) и урожайность зерновых культур в Ставропольском крае (а) и Республике Дагестан (б).

**Fig. 4.** Value of NDVI on the 18th vegetation Week compared with NDVI<sub>18</sub> (Norm); NDVI on the 15th vegetation Week compared with NDVI<sub>15</sub> (Norm) and grain crop yields in Stavropol Krai (a) and in the Republic of Dagestan (b).

В засушливом 2012 г. значение NDVI в 15-ю неделю составило 0,43 (79,5 % от среднего многолетнего NDVI в эту неделю, равного 0,54), при этом в достаточно влажном 2016 г. оно составило 0,63, т. е. 116,5 % от среднего многолетнего, при этом урожайность составила, соответственно, 20,9 ц/га и 27,6 ц/га. Это, разумеется, ориентировочная оценка состояния посевов по NDVI, но она весьма полезна для предварительной оценки ожидаемой урожайности в определенные, выявленные нами периоды (когда связь NDVI с урожайностью значима) в конкретном субъекте. Для более точной оценки, как показано в [13, 15], необходимо привлекать метеорологические данные, особенно в годы с неблагоприятными погодными условиями. На северо-востоке территории, например, чаще всего это годы засух.

Для определения периодов, когда связь урожайности зерновых культур в субъектах с NDVI становится значимой и, следовательно, этот показатель (индекс NDVI) можно использовать в прогностических моделях урожайности, нами рассчитывались матрицы парных коэффициентов корреляции между средней урожайностью в субъектах и значениями NDVI по неделям вегетации (в основном с 12 по 25-ю недели).

Анализ построенных на их основе временно-корреляционных функций позволил выявить периоды значимых и наиболее тесных связей урожайности с NDVI. В качестве примера такие функции (динамика коэффициентов корреляции,  $r$  для разных по агроклиматическим условиям территорий: Республика Дагестан, Ставропольский край и Карачаево-Черкесская Республика) приведены на рис. 5, где горизонтальной линией выделены периоды тесных (значимых на 5%-ном уровне) связей NDVI с урожайностью. Это позволило при разработке прогностической модели урожайности выбрать период (определенную неделю), когда эта связь наиболее тесная. Можно отметить, что в Республике Дагестан, например, значимая связь NDVI с урожайностью ( $r \geq 0,43$ ) проявляется уже в конце марта (в 12-ю неделю), т. е. даже раньше средней даты фазы «выход в трубку», что, по-видимому, можно объяснить особенностями фенологического развития преобладающих здесь озимых культур, которые часто при наблюдающемся потеплении в южных районах СКФО зимой возобновляют вегетацию, особенно в последние десятилетия.

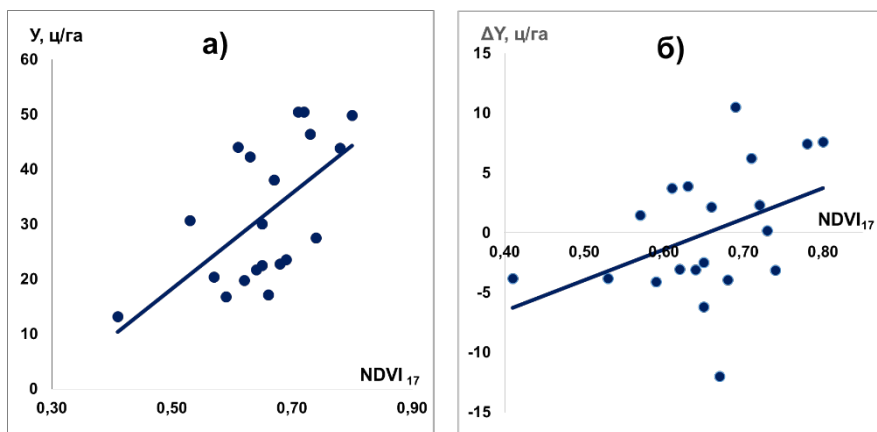


**Рис. 5.** Связь урожайности зерновых культур ( $Y$ , ц/га) с NDVI (динамика коэффициентов корреляции  $r$ ) по неделям вегетации в Республике Дагестан, Карачаево-Черкесской Республике и Ставропольском крае (2001–2020 гг.).

**Fig. 5.** Relationship between grain yield ( $Y$ , c/ha) and NDVI (dynamic of correlation coefficients  $r$ ) for the vegetation weeks in the Republic of Dagestan, in the Karachay-Cherkess Republic and in Stavropol Krai (2001–2020).

Анализ данных фенологических наблюдений ГМС показывает, что в этих районах растения, вегетируя в продолжительные периоды потеплений в зимний период, могут проходить в это время дополнительно 1–2 фазы развития. Так, наиболее тесная (значимая) связь NDVI с урожайностью в этой республике наблюдалась, по данным мониторинга посевов за период 2001–2020 гг., уже в 12–14-ю неделю ( $r=0,46$ ), в Карачаево-Черкесской Республике – в 17–18-ю недели, тогда как в Ставропольском крае – в 20-ю неделю, что близко к средней дате фазы «колошение» или лишь несколько раньше. На наиболее тесную связь урожайности зерновых культур с NDVI в фазу колошения указывают и другие авторы [4, 5, 8, 9].

Наглядно теснота связей урожайности зерновых культур ( $Y$ ) и аномалии урожайности ( $\Delta Y$ ) с NDVI в 17-ю неделю вегетации по Карачаево-Черкесской Республике показана на рис. 6.



**Рис. 6.** Связь урожайности ( $Y$ , ц/га) (а) и аномалии урожайности ( $\Delta Y$ , ц/га) зерновых культур (б) с NDVI в 17-ю неделю вегетации в Карачаево-Черкесской Республике.

**Fig. 6.** Relationship of yield ( $Y$ , c/ha) (a) and grain yield anomalies ( $\Delta Y$ , c/ha) (b) with NDVI on the 17th vegetation Week in the Karachay-Cherkess Republic.

Можно отметить, что в Ставропольском крае теснота связей  $NDVI_{20}$  с урожайностью  $Y$  характеризовалась достаточно высоким коэффициентом корреляции ( $r=0,82$ ), с аномалией урожайности  $\Delta Y$  она была несколько слабее ( $r=0,75$ ). В Карачаево-Черкесской Республике связи  $NDVI_{17}$  с урожайностью и с аномалией урожайности были менее тесными, но значимыми (соответственно,  $r=0,60$  и  $r=0,42$ ), что, по-видимому, связано со значительно меньшей изменчивостью NDVI в этой республике. Необходимо также отметить, что в Ставропольском крае, где площади зерновых культур большие, связи NDVI с  $Y$  и  $\Delta Y$  были более тесные, чем во всех

остальных субъектах СКФО, где площади зерновых культур (по сравнению со Ставропольским краем) небольшие. На значение размеров площади для детектируемых посевов указывалось в [5, 16]. По-видимому, нельзя исключить и некоторые трудности детектирования полей зерновых культур в условиях предгорных территорий в отдельных республиках округа. Однако полученные нами по фактическим данным мониторинга посевов устойчивые коэффициенты корреляции средней по субъектам урожайности зерновых культур с NDVI, значимые на 5%-ном уровне в выявленные определенные периоды (рис. 5), позволили использовать этот показатель для разработки прогностических моделей урожайности в эти периоды.

При разработке метода прогноза урожайности зерновых культур в использованном нами подходе прогностическая урожайность ( $Y_{пр}$ ), как и в [13–15], рассматривалась как сумма двух составляющих  $Y_{пр} = Y_{тр} + \Delta Y$ , где  $Y_{тр}$  – детерминированная составляющая, определяемая в основном культурой земледелия.

В нашем случае эта составляющая описывалась в основном уравнениями полинома первой степени вида  $y = ax + c$ , реже – полиномом второй степени, так как они хорошо отражают рост урожайности в этих субъектах. Автоматизированный расчет трендовой составляющей урожайности  $Y_{тр}$  входит в состав алгоритма, имеющегося на рабочем месте агрометеоролога-прогнозиста для расчета прогностической величины урожайности.  $\Delta Y$  – случайная величина, зависящая главным образом от складывающихся агрометеорологических условий и состояния посевов по данным спутниковых измерений в текущем году (год прогноза).

При этом метеорологические параметры прогностической модели для расчета  $\Delta Y$ , как и значения NDVI, отбирались с учетом тесноты их связей с урожайностью и в основном в декады (недели), близкие к срокам составления прогноза. Однако использование NDVI во многих республиках СКФО имело свои особенности. Их значения использовались не в сроки, близкие к датам составления прогнозов, а существенно раньше. Так, например, в республиках Дагестан, Северная Осетия – Алания и в Кабардино-Балкарской Республике для первого прогноза, срок которого (принятый в Росгидромете) третья декада июня, использовались NDVI первой декады апреля, т. е. 14–15-я недели вегетации, когда связь их с урожайностью была достаточно тесной и наиболее значимой. То же можно сказать и об отдельных метеорологических параметрах, использованных для построения модели.

Разработанные нами регрессионные прогностические модели, основанные на комплексировании наземных и спутниковых данных для прогнозов урожайности зерновых культур в отклонениях от трендов  $\Delta Y$  представлены в табл. 5.

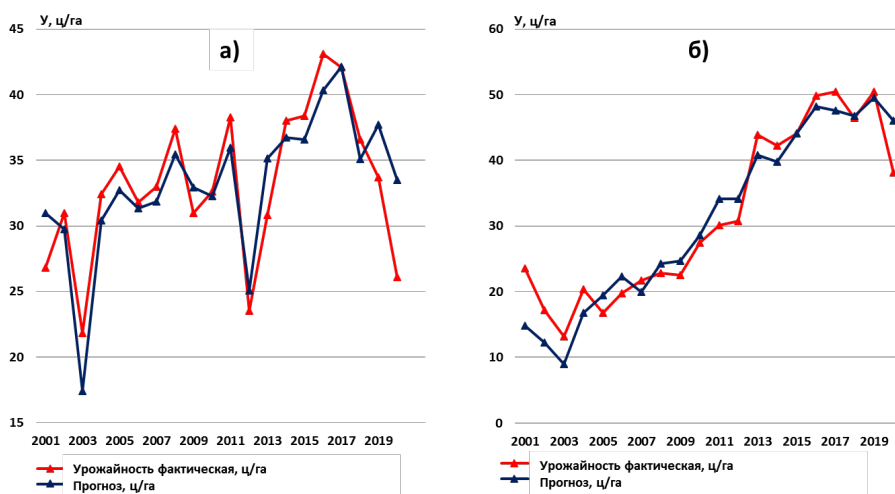
**Табл. 5.** Значения коэффициентов регрессии в прогностических моделях урожайности ( $\Delta Y$ ) и множественные коэффициенты корреляции: I – июнь; II – июль  
**Table 5.** – Values of regression coefficients in the prognostic yield models ( $\Delta Y$ ) and multiple correlation coefficients:  
 I – June; II – July

Субъекты		a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	a <sub>7</sub>	a <sub>8</sub>	a <sub>9</sub>	C	R
Республика Дагестан	I		-0,326				0,447			0,933 <sup>14</sup>	4,44	0,49
	II			-0,249					-0,2326	3,47416	5,144	0,506
	II			-0,281			1,8873			4,76714	2,04	0,59
Кабардино-Балкарская Республика	I			-1,067	0,042					21,81515	9,87	0,48
	II			-1,030		0,0281				20,12215	9,58	0,49
	II			-1,626		0,0722				22,16216	17,99	0,63
Караево-Черкесская Республика	I	0,879			0,069					28,12117	-30,57	0,62
	II	0,834				0,013				18,20917	-20,56	0,50
	II			-1,521		0,013				33,94218	2,64	0,56
Республика Северная Осетия - Алания	I		1,005						-0,756	21,03815	-25,31	0,47
	II			-1,2101*		0,022				23,83316	13,16	0,49
	II			-1,1131*			0,1474			23,84915	13,89	0,48
Ставропольский край	I				0,070				-0,389	62,92719	-46,95	0,82
	I		-0,663			0,024				63,07619	-38,21	0,80
	II		-0,040					4,656		68,81420	-64,28	0,83
II							4,453	0,173	69,27620	-60,05	0,83	

*Примечание.* a<sub>1</sub> – коэффициент регрессии при средней температуре воздуха в апреле (C°); a<sub>2</sub> – в мае, a<sub>3</sub> – в июне, (\*) – в июле; a<sub>4</sub> – при количестве осадков в апреле; a<sub>5</sub> – в мае, (1) – в июне, (2) – в июле; a<sub>6</sub> – при ГТК в мае, (3) – в июне, (4) – в июле; a<sub>7</sub> – при ГТК5-6; a<sub>8</sub> – при дефиците влажности воздуха в мае; a<sub>9</sub> – при NDVI по неделям вегетации; C – свободный член уравнения; R – множественный коэффициент корреляции.



Проверка разработанных моделей урожайности на зависимых материалах, проведенная в соответствии с «Инструкцией по проверке оправдываемости агрометеорологических прогнозов» 1983 г., показала их достаточную, а в большинстве субъектов высокую надежность. Ошибки прогнозов урожайности, рассчитанных с учетом двух слагаемых – трендовой составляющей  $Y_{\text{тр}}$ , которая вносит большой вклад в прогностическую величину урожайности (значения  $R^2$  в уравнениях трендов составляли в основном 0,65–0,80), и аномалии урожайности  $\Delta Y$  были в пределах 5–14 %, лишь в отдельные годы до 16 %. На рис. 7 приведены расчетные прогностические значения урожайности  $Y_{\text{пр}}$  в сравнении с фактической урожайностью по данным Росстата по Ставропольскому краю и Республике Дагестан. Коэффициенты корреляции между фактической и расчетной урожайностью составляли 0,86 и 0,94 соответственно.



**Рис. 7.** Прогностические значения урожайности  $Y_{\text{пр}}$  в сравнении с фактической урожайностью по данным Росстата по Ставропольскому краю (а) и Республике Дагестан (б).

**Fig. 7.** The prognostic grain yield values ( $Y_{\text{пр}}$ ) compared with actual grain yield according to Federal State Statistic Service for Stavropol Krai (a) and for the Republic of Dagestan (б).

## Заключение

Проведенные исследования агрометеорологических условий вегетации зерновых и зернобобовых культур в весенне-летний период выявили тенденции их изменения в 2001–2020 гг. по сравнению с 1991–2000 гг. и влияние этих условий на урожайность. Определены риски атмосферных засух сильной и средней интенсивности в мае и июне и показано, что они значительны лишь на севере и востоке округа (Ставропольский край

и Республика Дагестан), где урожайность сильно колеблется по годам, а тенденции роста урожайности выражены слабо, тогда как в остальных республиках округа рост урожайности в 2001–2020 гг. был весьма значительным, особенно с 2010 г., что связано в основном с ростом культуры земледелия. Показано, что рассчитанные для всех субъектов округа за период 2001–2020 гг. средние многолетние значения NDVI по неделям вегетации позволяют на качественном уровне проводить сравнительный анализ состояния посевов в текущем году, а в аномальные годы и их продуктивность, по сравнению со средними многолетними данными. С использованием корреляционного анализа установлены связи средней по субъектам урожайности зерновых и зернобобовых культур с NDVI по неделям вегетации (с 12 по 25-ю недели), определены периоды наиболее тесной связи урожайности с NDVI. Показана целесообразность использования спутниковой информации (NDVI) в разрабатываемых прогностических моделях урожайности в определенные, выявленные в результате исследований периоды, не только в Ставропольском крае, где эти культуры возделываются на больших площадях, но и в Республиках Северного Кавказа, где посевные площади невелики, а преобладающие озимые культуры часто вегетируют и в зимний период, в связи с чем использование NDVI в республиках имеет свои особенности. Разработанные для субъектов СКФО статистические регрессионные модели (для республик Северного Кавказа впервые), основанные на комплексировании наземной и спутниковой информации, позволяют прогнозировать урожайность зерновых и зернобобовых культур в принятые в Росгидромете сроки – третья декада июня и третья декада июля. Проверка моделей на зависимых материалах за период 2001–2020 гг. показала, что расчетные прогностические значения урожайности были близки к фактической урожайности по данным Росстата. Относительные ошибки прогнозов изменялись в основном в пределах 5–14 %.

Данная работа выполнена в рамках 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.

#### Список литературы

1. *Барталев С.А., Лупян 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. *Вильфанд Р.М., Страшная А.И., Береза О.В., Хан В.М., Тарасова Л.Л., Павлова А.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)». Том 2. Раздел 4. м.: ООО «Издательство МБА», 2019. 476 с. С 183–312.

3. Грингоф И.Г., Клещенко А.Д. Основы сельскохозяйственной метеорологии. Том 1. Обнинск: ВНИИГМИ-МЦД, 2011. 808 с.
4. 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, № 14. С. 99-112.
5. Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Оценка урожайности озимой пшеницы с использованием метода главных компонент на основе комплексирования спутниковой и наземной информации. // Метеорология и гидрология. 2021. № 12. С. 127-136.
6. 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.
7. Лупян Е.А., Савин И.Ю., Барталев С.А., Толпин В.А., Балашов И.В., Плотников Д.Е. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности («Вега») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8, № 1. С. 190-198.
8. Савин И.Ю., Барталев С.А., Лупян Е.А., Толпин В.А., Хвостиков С.А. Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутниковых данных: возможности и перспективы // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7, № 3. С. 275-285.
9. Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В. Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12-15.
10. 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.
11. 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.
12. Страшная А.И., Береза О.В., Павлова А.В. Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Приволжского федерального округа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 3 (377). С. 71-91.
13. Страшная А.И., Береза О.В., Максименкова Т.А. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы по субъектам европейской части России на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. // Материалы Всероссийской научной конференции с международным участием «Вклад агрофизики в решение функциональных задач сельскохозяйственной науки», Санкт-Петербург, 1–2 октября 2020 г. С. 722-743.
14. Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С. О возможности использования данных спутниковых измерений для прогнозирования урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах Уральского федерального округа и Западной Сибири // Труды Сибирского регионального научно-исследовательского института. 2021. № 107. С. 78-91.
15. Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 111-137.
16. Толпин В.А., Лупян Е.А., Барталев С.А., Плотников Д.Е., Матвеев А.М. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 7 (306). С. 581-586.
17. Уланова Е.С., Страшная А.И. Засухи в России и их влияние на производство зерна // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 32. С. 64-83.
18. 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.

19. 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., Loupyan E.A., Neishtadt I.A., Savin I. Yu. Gropland area classification in south regions of Russia using modis satellite data. *Issledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2006, no. 6, pp. 68-75 [in Russ.].
2. 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, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptatsii (sel'skoe i lesnoe hozyaystvo). Razdel 4. T. 2. Moscow, Iz-vo MBA, 2019, pp. 183-312. [in Russ.].
3. Gringof I.G., Kleshchenko A.D. Osnovy sel'skohozyaystvennoy meteorologii. T. 1. Obninsk, VNIIGMI-MTSD, 2011, 808 p. [in Russ.].
4. 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.].
5. Kleshchenko A.D., Savitskaya O.V. Estimation of winter wheat yield using the principal component analysis based on the integration of satellite and ground information. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, no. 12, pp. 881-887.
6. 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.].
7. 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.].
8. 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.].
9. 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.].
10. 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.].
11. 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.].
12. Strashnaya A.I., Bereza O.V., Pavlova A.A. Agrometeorological conditions and forecasting of grain crop yield based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Volga Federal District *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2020, no. 3 (377), pp. 71-91. [in Russ.].
13. Strashnaya A.I., Bereza O.V., Maksimenkova T.A. Prognozirovanie urozhajnosti ozimoy pshenicy po sub"ektam evropejskoj chasti Rossii na osnove kompleksirovaniya nazemnyh i sputnikovyh dannyh. Materialy Vserossiyskoj nauchnoj konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem «Vklad agrofiziki v reshenie funktsional'nyh zadach sel'skohozyaystvennoj nauki», Sankt-Peterburg, 1–2 oktyabrya 2020 g, pp. 722-743. [in Russ.].

14. *Strashnaya A.I., Beryoza O. V., Klang P.S.* The use of satellite measurement data to predict the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the Ural Federal District and Western Siberia. *Trudy Sibirskogo regional'nogo nauchno-issledovatel'skogo instituta [Proceedings of the Siberian Regional Research Hydrometeorological Institute]*. 2021, no. 107, pp. 78-91. [in Russ.].

15. *Strashnaya A.I., Bereza O.V., Klang P.S.* Forecasting grain crop yield based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Southern Federal District. *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological Research and Forecasting]*, 2021, no. 4 (382), pp. 111-137. [in Russ.].

16. *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.].

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

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

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

*Поступила 13.05.2022; одобрена после рецензирования 23.05.2022;  
принята в печать 08.06.2022.*

*Submitted 13.05.2022; approved after reviewing 23.05.2022;  
accepted for publication 08.06.2022.*