

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2020-3-71-91>

УДК 632.112:633.1+551.85

**Агрометеорологические условия
и прогнозирование урожайности зерновых
и зернобобовых культур на основе комплексирования
наземных и спутниковых данных в субъектах
Приволжского федерального округа**

А.И. Страшная, О.В. Береза, А.А. Павлова

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

В результате анализа особенностей агрометеорологических условий в субъектах Приволжского федерального округа установлено, что в большей степени на урожайность всех зерновых и зернобобовых культур в целом влияет тепло- и влагообеспеченность первой половины вегетационного периода (май–июнь). Исследована динамика NDVI в различные по условиям увлажнения годы и определена средняя многолетняя динамика этого показателя по озимым и яровым зерновым культурам по неделям вегетации. Показана возможность использования спутниковой информации для прогнозирования урожайности, определены периоды наиболее эффективного прогнозирования. Разработаны регрессионные модели для прогнозирования урожайности зерновых и зернобобовых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. Показано, что использование спутниковой информации позволяет увеличить заблаговременность прогнозирования урожайности на один месяц.

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

**Agrometeorological conditions and forecasting
of grain crops yield based on the integration
of ground and satellite data in the subjects
of the Volga Federal District**

A.I. Strashnaya, O.V. Bereza, A.A. Pavlova

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

The analysis of the features of agrometeorological conditions in the subjects of the Volga Federal District revealed that the heat and moisture availability in the first half of the growing season (May–June) primarily affects the productivity of all grain crops. The dynamics of NDVI in the years with different moisture conditions is studied, and the average long-term dynamics of this index for winter and spring crops is determined

for the weeks of vegetation. The possibility of using satellite information for forecasting grain crop yield is shown, and the periods of the most effective prediction are determined. Regression models are developed for predicting grain yield based on the integration of ground and satellite data. It is shown that the use of satellite data allows increasing the lead time of the crop yield forecast by one month.

Keywords: agrometeorological conditions, drought, crops, yield, satellite data, forecast

Стабильность производства зерна – одного из основных видов продовольствия, как известно, зависит от складывающихся в конкретные годы погодно-климатических условий. В Российской Федерации основной причиной крупных недоборов зерна являются сильные засухи [2, 5, 9, 12, 15, 16, 19, 21]. Такие засухи нередки в южной половине Приволжского федерального округа (ПФО), где сосредоточены значительные площади зерновых культур, в связи с чем урожайность и валовые сборы зерна в округе сильно колеблются по годам. Так, за последние десять лет в сильную и продолжительную засуху 2012 г., охватившую юго-восточные районы ПФО, в округе было собрано 14,5 млн т зерна, а в обширную и экстремальную по интенсивности засуху 2010 г. – лишь 6,9 млн т (при среднем валовом сборе за 2014–2018 гг. 23,3 млн т). Значительно (почти на 28 %) относительно среднего снижался валовой сбор зерна в менее продолжительную засуху 2013 г., а в локальные засухи 2005 и 2015 гг. снижение валового сбора зерна составляло 18–20 %. Максимальные валовые сборы зерна были получены в основном в благоприятные по условиям увлажнения 2008 и 2017 гг. (27,2 и 30,6 млн т соответственно).

Валовые сборы зерна в России, как и во многих странах мира, являются основой продовольственной безопасности [5, 7, 17, 20]. В связи с этим прогнозы урожайности и валового сбора зерна, составляемые с большой заблаговременностью, являются весьма актуальными, особенно в годы неблагоприятных погодных условий и засух, так как служат важным звеном в системе поддержки принятия управленческих решений, направленных на разработку мер по смягчению (минимизации) ущерба [2, 5, 15, 20].

Вклад ПФО в общий валовой сбор зерна в стране весьма значителен и составляет в среднем 19–20 %. На большей части территории округа возделывается широкий набор зерновых культур: озимые пшеница и рожь, яровая пшеница, яровой ячмень, овес, кукуруза, просо, гречиха, горох и другие бобовые. Особенно высоко ценятся на внутреннем и внешнем рынках возделываемые в заволжских районах округа высокобелковые сорта сильной и твердой яровой пшеницы, которая занимает здесь большие площади. В условиях наблюдаемого глобального потепления расширяются посевы кукурузы, а в отдельных районах и новой для округа культуры – сои. Большое разнообразие зерновых культур обусловлено различными природно-климатическими условиями, сложившимися

в связи со значительной протяженностью территории округа с севера на юг – от жарких и сухих степных районов с дефицитом осадков до умеренно влажных, а местами избыточно влажных северных районов с коротким вегетационным периодом. Возделываемые основные группы зерновых культур (озимые, ранние яровые и поздние яровые) существенно различаются по темпам развития, их так называемые «критические периоды», а следовательно, и требования к условиям тепло- и влагообеспеченности не совпадают по календарным срокам, что создает значительные трудности для разработки методов прогнозирования урожайности всех зерновых культур в целом. Оправдываемость разработанных по ряду регионов в девяностых годах прогнозов урожайности зерновых культур на основе наземных данных (Литвиненко, 1991; Страшная, Тебуев, 1994; Уланова, Страшная, 1998) во многих субъектах невысокая, что обусловлено не только изменением агроклиматических условий, но и значительным изменением с начала 2000-х гг. культуры земледелия – применением новых интенсивных технологий, использованием новых сортов с более высоким потенциалом продуктивности [4, 5]. Совершенствование указанных методов затруднялось также вследствие недостаточности данных наблюдений гидрометстанций по широкому набору возделываемых зерновых культур [4, 11, 16, 17].

Как известно, возможность использования спутниковых данных при разработке методов оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и прогнозов урожайности появилась при возросшем уровне доступности к этим данным в середине первого десятилетия 2000-х гг., когда были созданы новые методы анализа спутниковых измерений и технологий построения новых информационных систем агромониторинга отдельных типов сельскохозяйственных посевов. Такие системы обеспечивают регулярное получение однородной и объективной информации на больших площадях на уровне страны, региона, субъекта. К такого рода методам и системам относятся, в частности, методы оценки состояния посевов, а также специализированный спутниковый веб-сервис ВЕГА (<http://pro-vega.ru>), разработанные в ИКИ РАН [1, 3]. В настоящее время появились новые методы оценки состояния посевов, а по отдельным территориям – и новые методы прогнозов урожайности с использованием спутниковых данных [3, 6, 10, 14, 17].

В [3] нами была показана возможность прогнозирования урожайности озимой пшеницы в субъектах Среднего Поволжья на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. В настоящей работе поставлена задача разработать метод прогноза урожайности всех зерновых и зернобобовых культур в целом (далее зерновых) по субъектам ПФО на основе комплексирования наземных и спутниковых данных для основного срока прогнозирования, принятого в Росгидромете (конец июня), а также исследовать возможность увеличения заблаговременности прогноза. Из сказанного выше понятно, что разработка метода прогноза

урожайности всех зерновых и зернобобовых культур в целом является задачей весьма сложной. Для ее решения нами за период 2001–2019 гг. (данные спутниковых измерений имеются с 2001 г.) была создана база данных по метеорологическим параметрам, характеризующим тепло- и влагообеспеченность растений (осредненные по субъектам температура воздуха, количество осадков, гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) по месяцам вегетационного периода (май–август), а также нормализованный вегетационный индекс NDVI по недельным спутниковым измерениям. Индекс NDVI, как известно, рассчитывается как отношение разности коэффициентов спектральной яркости в ближнем ИК (NIR) и красном (red) диапазонах к их сумме: $NDVI = \frac{PNIR - Pred}{PNIR + Pred}$. Он позволяет отслеживать динамику развития посевов, а также их состояние, так как хорошо коррелирует с величиной (объемом) биомассы растений, листовыми индексами и т. д. [1, 14]. Использовались также данные Росстата по урожайности зерновых культур в весе после доработки в субъектах округа.

В связи с тем, что основные площади в округе занимают озимые зерновые и яровые зерновые культуры, на первом этапе необходимо было изучить динамику NDVI по данным, представленным на сервисе ВЕГА по этим группам культур за рассматриваемый период. С этой целью по указанным данным были рассчитаны средние многолетние значения NDVI (за 2001–2019 гг.) по всем субъектам округа по неделям (декадам) весенне-летней вегетации, отдельно по озимым и яровым зерновым культурам. В качестве примера динамика средних многолетних значений NDVI в субъектах с различным соотношением площади озимых и яровых культур и различной урожайностью показана на рис. 1а по Саратовской области, где преобладают озимые культуры, а на рис. 1б – по Ульяновской области, где соотношение площади озимых и яровых культур примерно одинаково.

Можно видеть, что в Саратовской области кривая, характеризующая динамику средних многолетних значений NDVI по озимым культурам ($NDVI^{oz}$), заметно отличается от динамики этого показателя в Ульяновской области не только по скорости его увеличения (уменьшения), но и по максимальным значениям. Так, в Саратовской области, где вегетация озимых начинается раньше, чем в Ульяновской (на 4–6 дней), среднее многолетнее максимальное значение $NDVI^{oz}$ приходится на третью декаду мая (22 неделя) и составляет 0,690, а в Ульяновской области оно существенно больше по величине (0,736) и наблюдается в среднем в первой декаде июня (23 неделя). По яровым культурам ход кривых, описывающих динамику $NDVI^{яп}$, а также его значения различаются в значительно большей степени. Хотя максимальные значения $NDVI^{яп}$ в обоих субъектах наблюдаются почти одновременно – в 26-ю неделю (на наш взгляд, за счет близких сроков сева), однако в Ульяновской области оно значительно больше по абсолютной величине и составляет 0,668, тогда как

в Саратовской области всего 0,539. При этом следует отметить, что в менее засушливой Ульяновской области средняя урожайность зерновых культур на 2,9 ц/га больше, чем в Саратовской. Аналогичные данные получены и в большинстве других субъектов. Таким образом, можно констатировать, что средняя многолетняя динамика NDVI в субъектах ПФО характеризует не только темпы нарастания (изменения) NDVI основных групп культур (озимые, яровые) и косвенно в среднем их состояние, но и в определенной степени отражает относительный уровень продуктивности (урожайности) зерновых культур. Необходимо отметить, что учет этой динамики весьма полезен для анализа текущих значений NDVI в любой конкретный год, так как он дает достаточно объективную качественную оценку состояния посевов (лучше/хуже) относительно среднего многолетнего, в любой период весенне-летней вегетации этих культур на больших площадях [1, 3, 14].

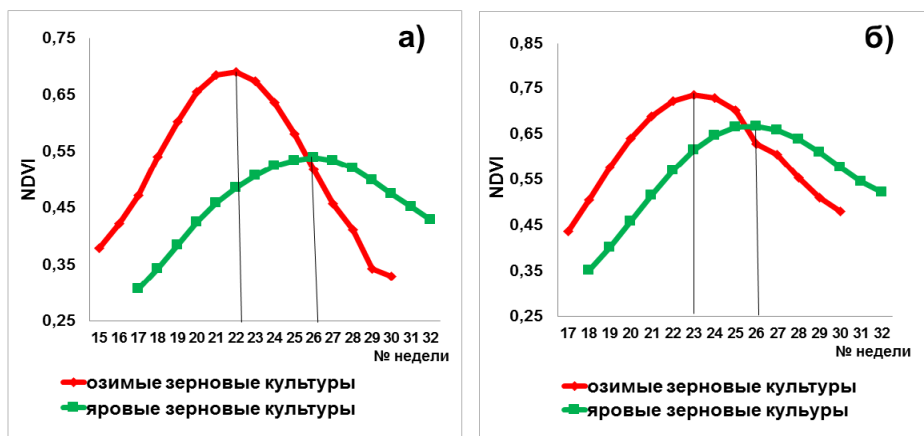


Рис. 1. Динамика средних многолетних значений NDVI по озимым и яровым культурам: по Саратовской области (а); Ульяновской области (б).

Fig. 1. Dynamics of long-term average NDVI values for winter and spring crops: for the Saratov region (a); for the Ulyanovsk region (б).

В связи с часто повторяющимися на значительной территории округа засушливыми условиями, вызывающими снижение урожайности зерновых культур, особенно на юге округа, нами за период 1990–2019 гг. рассчитана повторяемость сильных засух – $ГТК \leq 0,60$ (в соответствии с критериями интенсивности засух, принятыми в Росгидромете), вызывающих в округе крупный недобор зерна (табл. 1).

Анализ таблицы позволяет сделать важный вывод: почти во всех субъектах сильные засухи в мае ($ГТК \leq 0,60$) наблюдаются чаще, чем в июне, на 3–12 %. В целом за период май–июнь в Саратовской, Ульяновской и Самарской областях такие засухи бывают в трех годах из десяти,

в Оренбургской области – в четырех, а в Республике Татарстан и Пензенской области – лишь в двух годах из десяти. В самых северных субъектах округа (Удмуртская Республика, Пермский край и Кировская область) таких засух в мае–июне в период 1990–2019 гг. не было, однако засухи средней интенсивности случались в период май–июнь и в этих районах, например в Удмуртской Республике в 2010 и 2013 гг. Необходимо отметить также, что в Республике Татарстан, Оренбургской, Самарской, Пензенской, Ульяновской областях и в Чувашской Республике наблюдалось некоторое увеличение (на 3–7 %) повторяемости сильных засух в мае–июне в 2005–2019 гг. по сравнению с 1990–2004 гг. Это в определенной степени замедляло рост урожайности зерновых культур, наблюдаемый в указанных субъектах вследствие повышения культуры земледелия.

Таблица 1. Повторяемость (вероятность, %) сильных атмосферных засух ($ГТК \leq 0,60$) в мае–июне в субъектах Приволжского федерального округа за период 1990–2019 гг.

Table 1. Frequency (probability, %) of severe atmospheric droughts ($SCC \leq 0.60$) in May–June in the subjects of the Volga Federal District for the period 1990–2019

Территория	Вероятность, %				
	1990–2019 гг.			1990–2004 гг.	2005–2019 гг.
	май	июнь	май-июнь	май-июнь	
Республика Башкортостан	23	20	13	13	13
Республика Марий Эл	20	20	13	13	13
Республика Мордовия	26	14	13	13	13
Республика Татарстан	31	29	17	13	20
Удмуртская Республика	11	9	0	0	0
Чувашская Республика	23	20	3	7	10
Кировская область	6	3	0	0	0
Нижегородская область	17	9	3	7	3
Оренбургская область	43	46	43	40	47
Пензенская область	26	20	17	13	20
Самарская область	40	31	27	13	40
Саратовская область	46	43	30	33	27
Ульяновская область	26	23	27	20	33
Пермский край	3	0	0	0	0

Нами также была исследована динамика NDVI в субъектах округа в разные по условиям увлажнения (засушливости) годы. Выявлено, что в такие годы динамика этого показателя значительно отличается от средней многолетней динамики в зависимости от интенсивности засух как по озимым, так и по яровым культурам. На рис. 2а показана динамика NDVI по озимым культурам ($NDVI^{03}$) в засухи 2010 и 2012 гг. по Саратовской области (где эти культуры преобладают) по сравнению со средней

многолетней динамикой ($NDVI^{03}$), а на рис. 2б – по Оренбургской области, где преобладают яровые культуры – динамика $NDVI$ по яровым культурам ($NDVI^{яп}$) в эти же годы по сравнению со средней многолетней динамикой по яровым культурам ($NDVI^{яп}$).

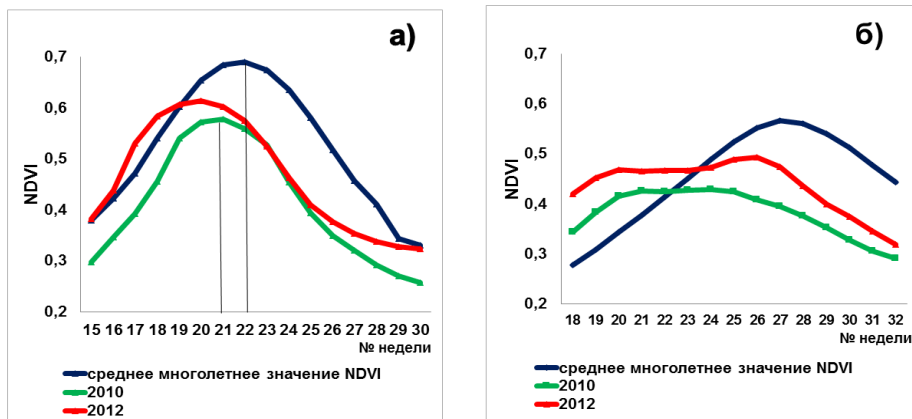


Рис. 2. Динамика значений $NDVI$ в засушливые 2010 и 2012 гг. по сравнению со средней многолетней динамикой: по Саратовской области (озимые культуры) (а); Оренбургской области (яровые культуры) (б).

Fig. 2. Dynamics of $NDVI$ values in dry 2010 and 2012 compared to the average long-term dynamics: for the Saratov region (winter crops) (a); Orenburg region (spring crops) (б)

В Саратовской области в беспрецедентную засуху 2010 года формирование урожайности зерновых культур в мае – июле проходило в условиях аномально жаркой погоды (даже средняя месячная температура воздуха на 3–6 °С превышала норму) и дефицита осадков (за этот период около 30 % нормы). Гидротермический коэффициент увлажнения за май–июнь ($ГТК_{5-6}$), например, составил 0,21, что соответствует очень сильной засухе. Можно отметить, что от жестокой засухи в 2010 г. пострадали все зерновые культуры, но озимые, рано начавшие вегетацию и хорошо использовавшие весенние влагозапасы в почве, пострадали в несколько меньшей степени, чем яровые. Жаркая погода ускоряла развитие, но рост растений и накопление вегетативной массы замедлялось, высота растений, количество колосков и зерен в колосе были значительно меньше, чем обычно, что часто наблюдается в годы весенне-летних засух [13, 15, 19]. Максимальное значение $NDVI^{03}$ составило 0,599 (наблюдалось в 20-ю неделю), тогда как среднее многолетнее значение $NDVI^{03}$ в этой области составляет 0,690 (22-я неделя). В 2012 г. засуха была хотя и продолжительной (май–июнь), но менее интенсивной, $ГТК_{5-6}$ составил 0,46, что соответствует сильной засухе. Максимальное значение $NDVI^{03}$ составило в этом году 0,620. Заметим при этом, что средняя урожайность зерновых

культур в жестокую засуху 2010 г. в Саратовской области была 8,4 ц/га, а в менее засушливом 2012 г – 10,7 ц/га, что достаточно адекватно (как и ГТК) отражала и динамика значений NDVI в эти годы.

Почти аналогично складывались агрометеорологические условия в эти годы и в Оренбургской области, где преобладают яровые культуры. В мае-июне засуха в этой области в 2010 г. была даже более интенсивной, чем в Саратовской области, ГТК₅₋₆ составил всего 0,11 (очень сильная засуха). Из-за ускоренного развития, слабого кущения и плохого укоренения у яровых культур сформировалось всего один, местами два продуктивных стебля с мелким колосом. Максимальное значение NDVI^{яп} составило всего 0,420 и наблюдалось оно уже в 24-ю неделю, тогда как среднее многолетнее NDVI^{яп} составляет 0,566 и отмечается на три недели позднее. В 2012 г. в области наблюдалась засуха лишь средней интенсивности, ГТК₅₋₆ составил 0,66, а максимальное значение NDVI^{яп} было отмечено в 26-ю неделю (0,485). Урожайность зерновых культур в этом году составила 8,6 ц/га, в то время как в 2010 г. она была всего 6,3 ц/га, т. е. самой низкой за последние 20 лет.

Менее ярко, но все же значимо в эти годы различалась динамика NDVI^{яп} и в большинстве северных районов Приволжского федерального округа. Так, например, в Удмуртской Республике, где преобладают яровые культуры, в 2010 г. наблюдалась засуха средней интенсивности, ГТК₅₋₆ составил 0,64, а в 2012 г. увлажнение было хорошим (ГТК₅₋₆ = 1,19). В начале вегетации (в период всходы-начало кущения) динамика NDVI^{яп} в 2010 и в 2012 гг. почти не различалась, но уже в первой декаде июня, в условиях начавшейся засухи в 2010 году рост значений NDVI^{яп} начал замедляться и максимальное значение его составило 0,640. В 2012 году в условиях хорошего увлажнения максимальное значение NDVI^{яп} составило в Республике 0,710, что близко к максимальному среднему многолетнему NDVI^{яп} (0,724). Урожайность зерновых культур в Удмуртской Республике в 2010 г. составила 11,4 ц/га, а в 2012 г. – 13,8 ц/га.

Приведенные выше примеры показывают, что об ожидаемом снижении урожайности зерновых культур в субъектах ПФО можно судить в оперативном режиме не только на основании анализа складывающихся агрометеорологических условий в засушливые годы, но и в определенной степени на основе анализа динамики NDVI в разные периоды вегетации преобладающих зерновых культур, в том числе в годы засух, рассчитав величину относительного отклонения D, выраженного в процентах:

$$D = \frac{NDVI_{\max} - \overline{NDVI}_{\text{ср}}}{\overline{NDVI}_{\text{ср}}} \cdot 100\% ,$$

где $NDVI_{\max}$ – максимальное, а $\overline{NDVI}_{\text{ср}}$ – среднее значение индекса. При этом положительные значения отклонений (D) соответствуют хорошему (лучше обычного), а отрицательные – плохому (хуже обычного)

состоянию посевов (и, следовательно, возможному снижению урожайности), что наблюдается в годы засух.

При разработке метода прогноза урожайности зерновых культур были проведены исследования статистических рядов урожайности этих культур по каждому из 14 субъектов ПФО за период 2001–2019 гг. Были построены тренды урожайности, на основе которых определены погодичные приросты урожайности вследствие улучшения культуры земледелия. В табл. 2 приведены некоторые характеристики изменчивости урожайности зерновых культур в субъектах округа.

Таблица 2. Изменчивость урожайности зерновых культур в субъектах Приволжского федерального округа (2001–2019 гг.)

Table 2. Variability of grain crop yields in the subjects of the Volga Federal District (2001-2019)

Территория	Урожайность, ц/га							СКО
	По тренду		Max	Год	Min	Год	Раз-ность	
	начало периода	конец периода						
Республика Башкортостан	–	–	27,6	2003	9,5	2010	18,1	4,68
Республика Марий Эл	13,2	15,9	19,9	2019	10,4	2007	9,5	2,80
Республика Мордовия	19,3	26,3	31,5	2017	15,8	2010	15,7	4,18
Республика Татарстан	–	–	36,3	2001	10,4	2010	25,9	5,62
Удмуртская Республика	18,9	21,7	21,3	2019	10,1	2013	11,2	3,67
Чувашская Республика	13,3	16,2	27,0	2019	11,2	2010	15,8	2,65
Кировская область	13,4	19,3	21,7	2019	12,6	2004 2007	9,1	2,67
Нижегородская область	17,7	21,5	24,4	2009	13,6	2010	10,8	2,68
Оренбургская область	9,7	11,4	15,8	2017	6,3	2010	9,5	2,21
Пензенская область	14,2	26,0	34,6	2017	11,7	2010	22,9	5,80
Самарская область	12,2	19,0	26,0	2017	9,5	2001	16,5	3,84
Саратовская область	13,0	17,5	26,0	2017	8,4	2010	17,6	3,54
Ульяновская область	13,4	21,0	27,4	2017	8,9	2010	18,5	3,86
Пермский край	11,7	14,8	16,3	2011	10,5	2004	5,8	1,65

Примечание. СКО – среднее квадратическое отклонение.

Анализ построенных трендов показал, что почти во всех субъектах урожайность вследствие улучшения культуры земледелия от начала к концу периода повышалась на 3–5 ц/га, при этом скорость погодичного прироста урожайности существенно различалась и составляла в основном от 0,25 до 0,40 ц/га. Наиболее высокими темпами урожайность росла в Пензенской области, где ежегодный прирост урожайности составил около 0,60 ц/га. В субъектах северной половины округа ежегодный прирост урожайности был в основном небольшим – от 0,15 до 0,20 ц/га. В республиках Башкортостан и Татарстан урожайность в среднем от начала к концу периода практически не увеличилась, однако при высокой средней за период урожайности (19,9 и 27,0 ц/га соответственно) колебания ее по годам были очень большими: среднее квадратическое отклонение (СКО) составило, соответственно, 4,68 и 5,62 ц/га. Самым большим (5,80 ц/га) СКО было в Пензенской области, а наименьшим в Пермском крае (1,65 ц/га). Максимальная урожайность за рассмотренный период (2001–2019 гг.) в большинстве субъектов округа наблюдалась в основном в 2017 и 2019 гг., а минимальная – в 2010 г. При этом максимальная урожайность во всех субъектах (кроме Пермского края) в два-три раза превышала минимальную (табл. 2), что также указывает на большую изменчивость урожайности.

В связи с широким набором возделываемых в округе зерновых культур, темпы развития которых в течение вегетационного периода, как нами отмечалось ранее, существенно различаются, задача разработки метода прогноза урожайности всех зерновых культур в целом оказалась весьма сложной. Для ее решения использовались методы регрессионного и корреляционного анализа, а также графический метод анализа, позволившие установить как тесноту, так и характер связей урожайности с гидрометеорологическими факторами и NDVI. На основе построенных корреляционных матриц исследовалась теснота связей урожайности зерновых культур в субъектах округа со средней месячной температурой воздуха (t), количеством осадков (R) по месяцам вегетационного периода (май, июнь, июль, август), гидротермическими коэффициентами увлажнения за май (ГТК₅), июнь (ГТК₆), июль (ГТК₇) и средними значениями ГТК за май–июнь и май–июль (ГТК₅₋₆ и ГТК₅₋₇). Оказалось, что на преобладающей территории округа наиболее тесные прямые (положительные) связи урожайности наблюдались с влагообеспеченностью посевов в мае и в июне (количеством осадков и ГТК в эти месяцы, а также средними значениями ГТК₅₋₆). Однако в северных районах округа связи урожайности с указанными факторами были значительно слабее (по отдельным субъектам коэффициенты корреляции были ниже 5%-ного уровня значимости), чем в южных засушливых районах. При этом выявилась существенная особенность: в большинстве субъектов, особенно в южной половине округа, связи урожайности с показателями влагообеспеченности более тесными были в мае, чем в июне. Так, например, в Оренбургской и Саратовской

областях положительная связь урожайности с R_5 и $ГТК_5$ характеризовалась высокими коэффициентами корреляции (r), равными в основном 0,550–0,770, а в июне их значения были от 0,306 до 0,480. Однако в более северных районах, например, в Республике Татарстан, коэффициенты корреляции урожайности с этими факторами были несколько выше в июне, чем в мае (в мае r колебались от 0,416 до 0,616, а в июне – от 0,644 до 0,689). При этом со средним $ГТК$ за май–июнь и $ГТК$ за май–июль теснота связей была в основном высокой и в большинстве субъектов южной половины округа существенно не различалась, коэффициенты корреляции колебались от 0,480 до 0,770, в северных районах округа связи были выражены в основном слабо (r колебались от 0,210 до 0,370).

Исходя из приведенных выше данных, можно сделать вывод о том, что на большей части территории ПФО период май–июнь в целом является наиболее важным для формирования урожая зерновых культур. В этот период появляются всходы яровых культур, а дефицит влаги обуславливает изреженность всходов; идет укоренение растений, кущение, формирование колосоносных стеблей, закладка колосков в колосе; у озимых культур наблюдается колошение, цветение и формирование колоса, а этот период, как известно, является «критическим» для зерновых культур по отношению к влаге, и экстремальные условия негативно сказываются на формировании, озерненности колоса и выполненности зерна, что отрицательно сказывается на величине урожая. Проведенные исследования показывают, что ухудшение влагообеспеченности растений в этот период обуславливает резкое снижение продуктивности зерновых культур, при ее улучшении урожайность повышается. Это подтверждается и данными других исследователей на примере яровых зерновых культур. В [8] сообщается, что связь гидротермического коэффициента в мае ($ГТК_5$) с количеством продуктивных стеблей (с колосом) на 1 кв. м достаточно высокая (r колеблется от 0,370 до 0,720). В годы с засухой густота продуктивного стеблестоя яровой пшеницы в опытах авторов «более чем на 50 % определялась уровнем влагообеспеченности, характеризуемой $ГТК$ ». Отмечается также, что высеваемые в настоящее время в южных районах Нечерноземной зоны на значительных площадях сорта твердой (высокобелковой) яровой пшеницы очень чувствительны к увлажнению в период «посев-всходы», так как для набухания и прорастания их высокостебловидных семян требуется на 15–20 % больше влаги, чем для мягкой пшеницы.

Для этого периода важны частые осадки, даже небольшие, увлажняющие верхний слой почвы, что способствует появлению дружных всходов. Связь урожайности зерновых культур с запасами продуктивной влаги в метровом слое почвы в наших исследованиях на преобладающей территории округа проявлялась слабо (r были ниже уровня значимости), что, по-видимому, связано с большим различием влагозапасов под разными зерновыми культурами в одинаковые календарные сроки из-за разных

темпов прохождения фаз развития в ходе онтогенеза, а также недостаточным количеством пунктов, определяющих влагозапасы в почве под отдельными зерновыми культурами.

На преобладающей территории округа связь урожайности зерновых культур с температурой воздуха в мае, июне, а также в июле была отрицательной (r колебался в основном от $-0,360$ до $0,680$). Наиболее тесные связи отмечались со средней температурой в июне, а в ряде субъектов северной половины округа и в июле. Повышенная температура воздуха, особенно в южных районах (днем до 30°C и выше), чаще всего наблюдалась на фоне значительного дефицита осадков и снижения влагозапасов в почве. При этом, как известно, резко увеличивается непродуктивное испарение влаги, что в конечном итоге негативно сказывается на формировании урожайности. При высокой температуре воздуха (выше 25°C) процессы ассимиляции замедляются, к тому же в условиях сухости воздуха увеличивается стерильность цветков, что может обусловить череззерницу и пустоколосицу, а в период налива повышенную щуплость зерен [13, 15, 18, 20].

Отметим также, что в ряде северных районов округа связь урожайности с температурой воздуха в эти месяцы проявлялась несколько слабее, чем на остальной преобладающей территории, так как в этих районах очень высокая температура бывает значительно реже, чаще ее значения наблюдаются в толерантных пределах.

На рис. 3а для наглядности показана зависимость урожайности зерновых культур от среднего гидротермического коэффициента увлажнения за май–июнь (ГТК_{5-6}), а на рис. 3б – от средней за июнь температуры воздуха (T_6) в Саратовской области. Как можно видеть, более тесная связь урожайности зерновых культур наблюдается с ГТК_{5-6} ($r=0,70$), чем с температурой воздуха в июне ($r=0,54$), что характерно для ряда субъектов южной половины округа.

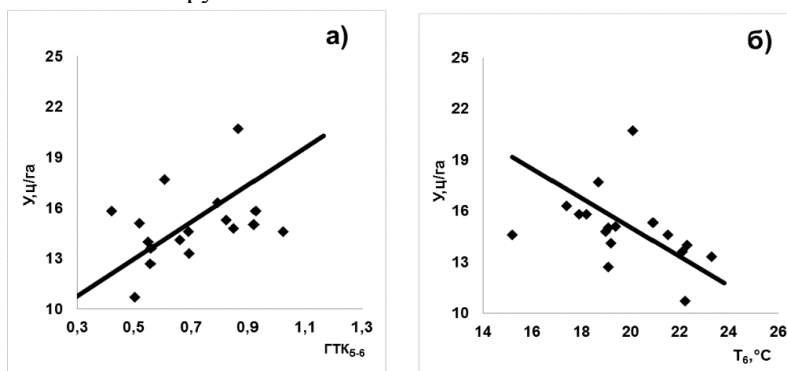


Рис. 3. Связь урожайности зерновых культур по Саратовской области: со средним ГТК за май-июнь (ГТК_{5-6}) (а); средней температурой воздуха в июне (T_6) (б).

Fig. 3. Relation of grain crop yields in the Saratov region: with the average GTC for May-June (ГТК_{5-6}) (а); the average air temperature in June (T_6) (б).

В большинстве районов округа очень четко проявилась связь урожайности зерновых культур с NDVI по декадам (неделям) в основной период вегетации, особенно с NDVI по озимым культурам ($NDVI^{03}$). На рис. 4 показана связь урожайности зерновых культур с NDVI в 23-ю неделю (первая декада июня) по озимым культурам ($NDVI_{23}^{03}$) и в 25-ю неделю (вторая декада июня) по яровым культурам $NDVI_{25}^{ap}$ в Ульяновской области, где соотношение озимых и яровых культур примерно одинаково. При этом теснота связей урожайности зерновых культур с $NDVI_{23}^{03}$ характеризовалась r , равным 0,80, а с $NDVI_{25}^{ap}$ – r , равным 0,52.

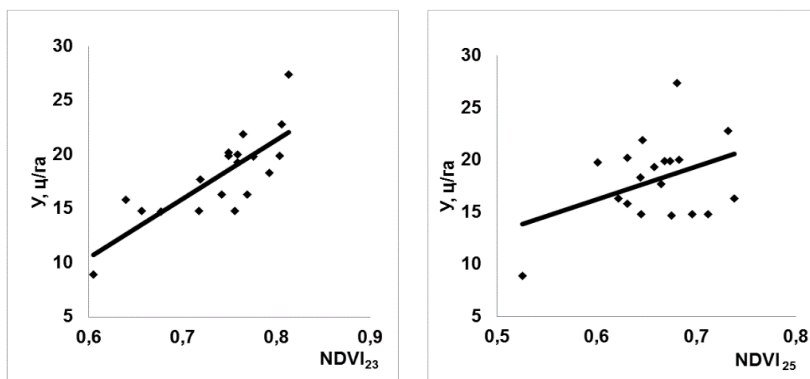


Рис. 4. Связь урожайности зерновых культур с NDVI в Ульяновской области: по озимым культурам в 23-ю неделю вегетации (а); по яровым культурам в 25-ю неделю вегетации (б).

Fig. 4. Relation of grain yield to NDVI in Ulyanovsk region: for winter crops in the 23-th week of vegetation (a); for spring crops in the 25-th week of vegetation (b).

Более тесную связь урожайности зерновых культур с $NDVI_{23}^{03}$ в Ульяновской области, как и в некоторых других субъектах, по-видимому, можно объяснить более высокой урожайностью озимых и, следовательно, их большим вкладом в общую урожайность зерновых культур. В ряде северных областей, где посевные площади зерновых культур небольшие и преобладают в основном яровые культуры (в Удмуртской Республике, например) значимая связь урожайности зерновых культур с $NDVI_{23}^{ap}$ проявилась (из-за поздних сроков сева), только в 28-ю неделю (первая декада июля) и характеризовалась $r=0,491$, а с $NDVI_{28}^{03}$ она была несколько слабее ($r=0,467$). В мае и июне в северных районах значения r были либо слабоотрицательными, либо слабоположительными. Необходимо также отметить, что в Кировской области и Пермском крае значимых связей урожайности этих культур с NDVI нами не выявлено. Можно полагать, что основной причиной этого является недостаточное количество полей

для детектирования зерновых культур, так как здесь преобладают луговые травы и большие лесные массивы.

На рис. 4 показаны зависимости (связи) урожайности зерновых культур с NDVI в те недели (декады) вегетации, когда теснота этих связей была максимальной или близкой к ней. Однако в оперативной практике для определения наибольшей эффективности прогнозирования урожайности с использованием спутниковых данных необходимо знание динамики связей NDVI с урожайностью в течение всей весенне-летней вегетации. С этой целью нами были рассчитаны коэффициенты корреляции между урожайностью зерновых культур и NDVI по неделям (декадам) вегетационного периода по озимым культурам, т. е. с $NDVI^{03}$, и по яровым культурам – с $NDVI^{AP}$. На рис. 5 в качестве примера показана такая связь (динамика коэффициентов корреляции) по неделям (декадам) весенне-летней вегетации в Оренбургской области, установленная нами за период 2001–2019 гг. Следует отметить, что с использованием $NDVI^{03}$ можно прогнозировать урожайность зерновых культур уже в третьей декаде мая (22-я неделя), а с использованием $NDVI^{AP}$ – только во второй декаде июня (25-я неделя), когда r становится значимым.

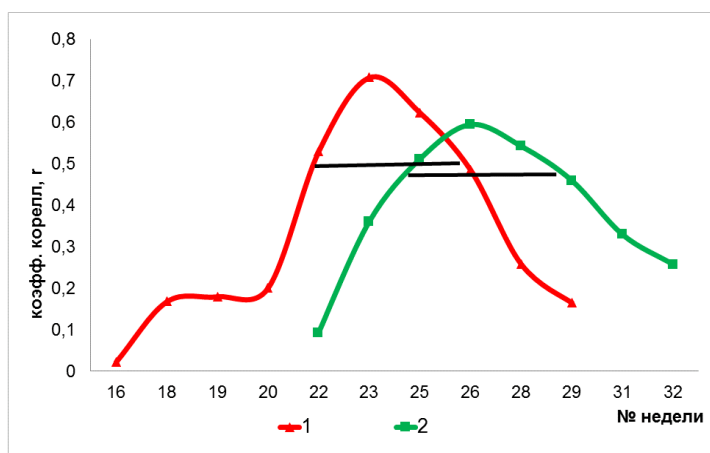


Рис. 5. Связь урожайности зерновых культур с NDVI (динамика коэффициентов корреляции r) за период 2001–2019 гг., в Оренбургской области по неделям вегетации: 1 – NDVI по озимым, 2 – NDVI по яровым культурам.

Fig. 5. Relationship of grain yield with NDVI (dynamics of correlation coefficients r) for the period 2001–2019, in the Orenburg region for weeks of vegetation: 1 – NDVI for winter crops, 2 – NDVI for spring crops.

При разработке метода прогноза урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных все субъекты ПФО были разделены на четыре региона, или группы с учетом сравнительной схожести (однородности) агроклиматических условий

и синхронности колебаний урожайности по годам (по знаку отклонений урожайности от трендов). Гидрометеорологические параметры в разрабатываемых прогностических регрессионных моделях выбирались в каждой группе субъектов с учетом тесноты их связей с урожайностью. Значения NDVI использовались в ближайшие недели (декады) к сроку составления основного прогноза урожайности зерновых культур, принятому в Росгидромете – конец июня. При преобладании в регионе посевных площадей озимых культур использовались значения NDVI по озимым культурам; на севере округа, где преобладают яровые культуры, использовались в основном NDVI по яровым культурам; при близких значениях размеров площадей озимых и яровых культур предпочтительным оказывалось использование NDVI по озимым культурам в связи с более тесными связями этого показателя с урожайностью зерновых культур, что отмечено нами выше.

В первую группу субъектов вошли Саратовская, Самарская, Пензенская и Ульяновская области, во вторую группу – Республика Башкортостан и Оренбургская область, в третью – республики Татарстан, Чувашия, Мордовия и Нижегородская область и в четвертую – Республика Марий Эл, Удмуртская Республика, Пермский край и Кировская область. В прогностические модели в качестве параметров в разных сочетаниях входили: средняя по субъектам температура воздуха за май (t_5) или июнь (t_6), гидротермический коэффициент увлажнения за эти же месяцы (ГТК₅ и ГТК₆) и средний ГТК за май–июнь (ГТК₅₋₆). Значения NDVI использовались близкие к срокам составления прогноза с учетом наибольшей тесноты их связей с урожайностью зерновых культур.

В табл. 3 представлены регрессионные модели для прогноза урожайности зерновых культур по группам субъектов в ПФО, разработанные на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. Этот (основной) прогноз может быть составлен 26–28 июня. При этом за 26–30 июня среднесуточная температура воздуха для расчета среднего значения температуры за июнь, как и количество осадков, берется из прогноза погоды.

Следует отметить, что все метеорологические параметры, входящие в состав модели, в автоматизированном режиме рассчитываются по данным декадных агрометтелеграмм, поступающих в Гидрометцентр России на основе использования прикладных статистических программ, имеющихся на рабочих местах прогнозиста-агрометеоролога в локальной вычислительной сети Гидрометцентра «PROMETEY». Текущие значения NDVI в декаду, ближайшую к составлению прогноза, берутся с сервиса ВЕГА-PRO.

Авторская проверка метода прогноза на зависимых материалах показала вполне удовлетворительные результаты. Ошибки прогноза составляли преимущественно от 6 до 16 %, по отдельным субъектам на севере территории – до 20 %.

Таблица 3. Значения коэффициентов регрессии в прогностических моделях урожайности зерновых и зернобобовых культур и множественные коэффициенты корреляции (июнь)

Table 3. Values of regression coefficients in predictive models of grain yield and multiple correlation coefficients (June)

Субъекты ПФО	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	C	R
I группа Саратовская обл., Ульяновская обл., Пензенская обл., Самарская обл.	-0,49		1,07		39,65			-3,28	0,87
	-0,57			0,023	38,70			-0,10	0,86
II группа Республика Башкортостан, Оренбургская обл.	-0,02	1,25*				14,51		0,12	0,70
	-0,12		0,76			35,12		-0,66	0,78
III группа Республика Татарстан, Республика Мордовия, Республика Чувашия, Нижегородская обл.	-0,36			0,11		27,74		5,31	0,60
	-0,32	5,06				26,11		5,46	0,61
IV группа Республика Удмуртия, Республика Марий Эл, Пермский край, Кировская обл.	-0,03**	-1,20					20,68	3,17	0,58

Примечание. a₁ – коэффициент регрессии при t₆; a₂ – при ГТК₆; a₃ – при ГТК₅₋₆; a₄ – при R₅; a₅ – при NDVI₂₃⁰³; a₆ – при NDVI₂₅⁰³; a₇ – NDVI₂₈^{ap}; C – свободный член уравнения; R – множественный коэффициент корреляции. * – при ГТК₅; ** – при t₅.

Нами также были проведены исследования с целью определения возможности увеличения заблаговременности прогноза урожайности зерновых культур на один месяц, т. е. для срока его составления 25–28 мая. Выбор параметров для прогностических моделей оказался весьма ограниченным в связи с более низкой в этот период теснотой их связей с урожайностью. В результате проведенных расчетов были получены линейные регрессионные модели для прогноза урожайности зерновых культур (Y_{зер}) для трех основных групп субъектов, где сосредоточено около 90 % посевных площадей зерновых культур:

Первая группа: $Y_{\text{зер}} = 5,54\text{ГТК}_5 + 18,49\text{NDVI}_{20}^{03} + 0,25$; R=0,67.

Вторая группа: $Y_{\text{зер}} = 5,12R_5 + 80,93\text{NDVI}_{21}^{03} + 40,46$; R=0,71.

Третья группа: $Y_{\text{зер}} = 0,12R_5 + 11,28\text{NDVI}_{21}^{03} + 25,63$; R=0,57.

Условные обозначения метеопараметров те же, что и в табл. 3.

Для четвертой группы значимым или близким к значимому предиктором модели оказалась лишь средняя за май температура воздуха (t₅), а NDVI, как указывалось выше, «не работает». В связи с этим на данном

этапе в северных районах округа (четвертая группа) предлагается рассчитывать (ориентировочно) количественную оценку ожидаемой урожайности зерновых культур ($Y_{\text{зер}}$) по уравнениям трендов. Для Удмуртской Республики уравнение имеет вид: $Y_{\text{зер}} = 0,170x + 13,167$; для Кировской: $Y_{\text{зер}} = 0,352x + 12,958$; для Пермского края: $Y_{\text{зер}} = 0,177x + 11,588$; для Республики Марий Эл: $Y_{\text{зер}} = 0,164x + 13,032$, где x – порядковый номер года.

В дальнейших исследованиях предполагается использовать для разработки метода прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур с большой заблаговременностью по субъектам северных районов округа фенологические данные.

Выводы

В результате исследований установлено, что в субъектах ПФО, где наряду с озимыми культурами на больших площадях возделываются как ранние яровые, так и поздние яровые зерновые культуры, наибольшее влияние на урожайность зерновых культур в целом оказывают условия тепло- и влагообеспеченности посевов в мае и июне. Показано, что наиболее частой причиной крупных недоборов зерна в округе являются сильные засухи. В южной половине округа повторяемость сильных засух ($ГТК \leq 0,60$) в мае–июне в 2005–2019 гг. по сравнению с 1990–2004 гг. увеличилась на 3–7 %, что в определенной степени замедляло рост урожайности, наблюдаемый вследствие роста культуры земледелия.

Ухудшение состояния посевов как озимых, так и яровых зерновых культур, а следовательно, и уровень снижения продуктивности достаточно адекватно отражает не только интенсивность засух, но также и динамика NDVI конкретных засушливых лет. Показано, что динамика средних многолетних значений NDVI по яровым и озимым культурам существенно различается, особенно по календарным срокам; при этом отрицательные отклонения значений NDVI текущего года от средних многолетних указывают на возможное снижение фактической урожайности зерновых культур относительно средней урожайности по субъектам.

Установлена различная теснота связей урожайности с NDVI в разных группах субъектов, в связи с этим в качестве параметров в регрессионных прогностических моделях урожайности использовались значения NDVI за разные недели (декады) вегетации. Показано, что в северных районах округа использование NDVI в прогностических моделях оказалось недостаточно эффективным. Основной причиной этого, на наш взгляд, является преобладание в этих районах лугов и больших лесных массивов. В связи с небольшим количеством полей для детектирования посевов зерновых культур и связанной с этим недостаточной точностью определения средних по субъекту значений NDVI, связи урожайности зерновых культур

с NDVI в основном слабые, тогда как на преобладающей территории округа они достаточно тесные. Для субъектов округа были определены периоды наиболее эффективного прогнозирования урожайности зерновых культур с использованием NDVI; на преобладающей территории для основного прогноза – это 23–25-я недели вегетации (отсчет недель от начала года).

Разработан метод прогноза урожайности зерновых и зернобобовых культур по субъектам ПФО на основе комплексирования наземных и спутниковых данных. Авторская проверка метода показала вполне удовлетворительные результаты. Предложен также метод прогноза урожайности этих культур с увеличением заблаговременности (на 1 месяц), срок составления прогноза – 26–30 мая.

Список литературы

1. *Барталев С.А., Луян 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. *Бедрицкий А.И., Коришунов А.А., Хандожко Л.А., Шаймарданов М.З.* Климатическая система и обеспечение гидрометеорологической безопасности жизнедеятельности в России // Метеорология и гидрология. 2004. № 4. С. 120-129.

3. *Береза О.В., Луян 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.

4. *Вильфанд Р.М., Береза О.В., Страшная А.И.* О динамике агроклиматических показателей условий сева, зимовки и формирования урожая основных зерновых культур // Труды Гидрометцентра России. 2016. Вып. 360. С. 45-78.

5. *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.: И-во МБА, 2019. С. 183-312.

6. *Гончарова Т.А., Найдина Т.А., Лебедева В.М., Богомолова Н.А.* Результаты авторских и производственных испытаний в ФГБУ «Гидрометцентр России» автоматизированной технологии составления оценки условий вегетации и прогноза урожайности яровой пшеницы и картофеля по субъектам Российской Федерации // Результаты испытания новых и усовершенствованных технологий, моделей и методов гидрометеорологических прогнозов. Информационный сборник № 41. 2014. С. 111-126.

7. *Гордеев А.В., Бутковский В.А.* Россия – зерновая держава. М.: ДеЛи принт, 2009. 470 с.

8. *Давыдова Н.В., Казаченко А.О., Широколава А.В., Нардид В.А., Резеткин А.М., Грачева А.В., Романова Е.С.* Формирование урожайности яровой мягкой пшеницы в условиях Центрального Нечерноземья в зависимости от густоты стеблестоя // Аграрная наука. 2019. № 7-8. С. 32-34.

9. Клещенко А.Д. Современные проблемы мониторинга засух // Труды ВНИИСХМ. 2000. Вып. 33. С. 3-13.

10. Клещенко А.Д., Савицкая О.В. Оценка пространственно-временного распределения урожайности зерновых культур и стандартизованного индекса осадков (SPI) по спутниковой и наземной информации // Труды ГГО. 2014. Вып. 571. С. 147-161.

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. Мещерская А.В. О показателе засух и урожайности зерновых культур // Метеорология и гидрология. 1988. № 2. С. 91-98.

13. Самофалова Н.Е., Дубинина О.А., Самофалов А.П., Иличкина Н.П. Роль метеофакторов в формировании продуктивности озимой твердой пшеницы // Зерновое хозяйство России. 2019. № 5. С. 18-23.

14. 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.

15. 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.

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

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

18. 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.

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

20. 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.

21. Strasnyaya A., Maksimenkova T., Chub O. Grain Yield Prediction in the Russian Federation // Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability. Spinger, Netherlands, 2010. P. 93-97.

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. 3, pp. 68-75. [in Russ.].

2. *Bedritskii A.I., Korshunov A.A., Khandozhko L.A., Shaimardanov M.Z.* Climate System and Hydrometeorological Safety for Societal and Economic Systems in Russia. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 2004, no. 4, pp. 83-90.

3. *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. *Sovremennye 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.].

4. *Vilfand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V.* About the dynamics of the agroclimatic indicators of conditions of sowing, wintering and formation of the yield of the main grain crops. *Trudy Gidromettsentra Rossii* [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia], 2016, vol. 360, pp. 45-78. [in Russ.].

5. *Vilfand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V., Khan V.M., Tarasova L.L., Pavlova V.N.* Regional'nye i otraslevye problemy opustynivaniya, degradacii zemel' i zasuh v Rossiyskoy Federacii // Nacional'nyy doklad «Global'nyy klimat i pochvennyy pokrov Rossii: opustynivanie i degradaciya zemel', institucional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptacii (sel'skoe i lesnoe hozyaystvo). Razdel 4. T. 2. Moscow, MBA publ., 2019, pp. 183-312. [in Russ.].

6. *Goncharova T.A., Naydina T.A., Lebedeva V.M., Bogomolova N.A.* Rezul'taty avtorskih i proizvodstvennyh ispytaniy v FGBU «Gidrometcentr Rossii» avtomatizirovannoy tekhnologii sostavljeniya ocenki usloviy vegetacii i prognoza urozhaynosti yarovoy pshenicy i kartofelya po sub'ektam Rossiyskoy Federacii. Rezul'taty ispytaniya novyh i usovershenstvovannyh tekhnologiy, modeley i metodov gidrometeorologicheskikh prognozov. Informacionnyy sbornik № 41, 2014, pp. 111-126. [in Russ.].

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

8. *Davydova N.V., Kazachenko A.O., Shirokolava A.V., Nardid V.A., Rezepkin A.M., Gracheva A.V., Romanova E.S.* The formation of spring wheat yield in Russia Central region as a function of productive stalks density. *Agrarnaya nauka* [Agrarian science], 2019, no. 7-8, pp. 32-34. [in Russ.].

9. *Kleschenko A.D.* Sovremennye problemy monitoringa zasuh. *Trudy VNIISKHM*, 2000, vol. 33, pp. 3-13. [in Russ.].

10. *Kleschenko A. D., Savitskaya O. V.* Estimation of space-time distribution yield of grains and Standardized Precipitation Index on satellite and land information. *Trudy GGO* [Proceedings of Voeikov Geophysical Observatory], 2014, vol. 571, pp. 147-161. [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-MCD publ., 2012, 216 p. [in Russ.].

12. *Mescherskaya A.V.* O pokazatele zasuh i urozhaynosti zernovykh kul'tur. *Meteorologiya i Gidrologiya* [Russ. Meteorol. Hydrol.], 1988, no. 2, pp. 91-98. [in Russ.].

13. *Samofalova N.E., Dubinina O.A., Samofalov A.P., Ilichkina N.P.* The meteorological factors' part in winter durum wheat productivity formation. *Grain Economy of Russia*, 2019, no. 5, pp. 18-23. DOI: 10.31367/2079-8725-2019-65-5-18-23. [in Russ.].

14. *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. 85-107. [in Russ.].

15. *Strashnaya A.I., Maksimenkova T.A., Chub O.V.* Terms of sowing of winter crops in the climate change conditions and their forecasting in Privolzhsky federal district. *Trudy Gidromettsentra Rossii [Proceedings of the Hydrometcentre of Russia]*, 2011, vol. 345, pp. 194-214. [in Russ.].

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

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

18. *Strashnaya A.I.* Ispol'zovanie pokazateley uvlazhneniya dlya ocenki 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.].

19. *Ulanova E.S., Strashnaya A.I.* Zasuhi v Rossii i ih vliyanie na proizvodstvo zerna. *Trudy VNIISKHM*, 2000, vol. 32, pp. 64-83. [in Russ.].

20. *Frolov A.V., Strashnaya A.I.* O zasuhe 2010 goda i ee vliyanii na urozhaynost' zernovyh kul'tur. Sbornik dokladov sovместnogo zasedaniya Prezidiuma Nauchno-tekhnicheskogo soveta Rosgidrometa i Nauchnogo soveta RAN «Issledovaniya po teorii klimata Zemli». Moscow, Triada LTD publ., 2011, pp. 22-31. [in Russ.].

21. *Strashnaya A., Maksimenkova T., Chub O.* Grain Yield Prediction in the Russian Federation. Use of Satellite and In-Situ Data to Improve Sustainability. Spinger, Netherlands, 2010, pp. 93-97.

*Поступила 18.06.2020 г., одобрена после рецензирования 17.09.2020,
принята в печать 09.10.2020.*

*Submitted 18.06.2020; approved after reviewing 17.09.2020;
accepted for publication 09.10.2020.*