

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2023-4-118-137>

УДК 633.1+551.5

Агрометеорологические условия и прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах восточной части Сибирского федерального округа

***А.И. Страшная, А.В. Павлова,
Т.В. Кулакова, П.С. Кланг***

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

Представлены результаты исследований агрометеорологических условий и возможности использования спутниковой информации для оценки и прогнозирования урожайности зерновых и зернобобовых культур в субъектах восточной части Сибирского федерального округа. Показана целесообразность использования спутниковой информации в комплексе с наземными данными для разработки метода прогноза урожайности в Красноярском крае, где установлена тесная связь урожайности с нормализованным спутниковым индексом NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). В республиках Хакасия, Тыва и Иркутской области значимых связей NDVI с урожайностью не выявлено. Показано значение улучшения культуры земледелия и роль метеорологических факторов, в разной степени способствующих повышению урожайности в субъектах в период 2001–2020 гг. С использованием метода корреляционно-регрессионного анализа исследованы и отобраны метеорологические факторы, оказывающие наибольшее влияние на урожайность. Представлены регрессионные модели, разработанные на основе совместного использования спутниковых и наземных данных, для прогнозирования средней урожайности зерновых культур и яровой пшеницы в Красноярском крае, а для республик Хакасия, Тыва и Иркутской области – для зерновых культур на основе наземных данных.

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

Agrometeorological conditions and prediction of the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the eastern Siberian Federal District

***A.I. Strashnaya, A.V. Pavlova,
T.V. Kulakova, P.S. Klang***

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

The results of studying agrometeorological conditions and the possibility of using satellite data to evaluate and predict the yield of grain and leguminous crops in the subjects of the eastern part of the Siberian Federal District are presented. Reasonability of using satellite information in combination with surface data for the development of a method

for forecasting the yield in the Krasnoyarsk krai, where a high correlation between the yield and the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) was found, is shown. In the Republics of Khakassia, Tyva and the Irkutsk oblast, no significant correlations between the NDVI and the yield was detected. The importance of improving agricultural standards and the role of meteorological factors differently contributing to an increase in the yield in the regions during 2001-2020 are shown. Using the correlation and regression analysis, the meteorological factors that have the greatest impact on the yield were investigated and selected. Regression models developed on the basis of the joint use of satellite and ground-based data are presented to predict the average yield of grain crops and spring wheat in the Krasnoyarsk krai, and those based on surface data are presented to predict the yield of grain crops in the republics of Khakassia, Tyva and the Irkutsk oblast.

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

Введение

В последние десятилетия в связи с нарастающей изменчивостью погодных и агрометеорологических условий задача оценки состояния и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур является одной из наиболее актуальных в области земледелия и экономического планирования в аграрной отрасли. Для ее решения необходимо получение достаточного количества надежных характеристик состояния посевов. Получение таких характеристик стало возможным при использовании данных спутниковых наблюдений на больших площадях в режиме реального времени, а также накопленных архивных данных, представляемых на сервисе ВЕГА-PRO, разработанном в ФГБУН «ИКИ РАН» [1, 8, 17]. Их использование оказалось достаточно эффективным для разработки методов прогноза урожайности зерновых культур, основанных на спутниковой информации или в комплексе с наземными наблюдениями. В настоящее время такие методы прогнозов урожайности зерновых культур разработаны для преобладающей территории зернового пояса на Европейской территории России [6, 9, 11, 13, 15, 16].

Для азиатской территории таких методов пока предложено мало, и они предназначены в основном для отдельных конкретных полей и административных районов. Как известно, в Сибирском центре ФГБУ «НИЦ «Планета», в ФГБУ «СибНИГМИ», Новосибирском государственном университете и других научных учреждениях успешно ведутся исследования по разработке и совершенствованию спутникового мониторинга состояния посевов сельскохозяйственных культур, разработаны методы прогнозов урожайности отдельных зерновых культур для Западной Сибири [10], в основном яровой пшеницы. В [3] предложена математическая модель развития растений для прогноза урожайности яровой пшеницы с использованием спутниковых данных по ряду южных районов Западной Сибири, позволяющая прогнозировать урожайность в разрезе поля за месяц до уборки с точностью 1–2 ц/га. В разработанной регрессионной прогностической модели [2] для отдельных культур (пшеница, картофель, овощи) используются спутниковые данные (набор вегетационных индексов),

например, значения NDVI в период вегетации. В [19] излагается метод прогноза урожайности яровой пшеницы (и построение карт урожайности) на полях Сухобузимского района Красноярского края, основанный на спутниковых и беспилотных данных, что оказалось весьма полезным для конкретных хозяйств.

Использование ДЗЗ и беспилотных аппаратов, по данным [21], является перспективным для точного земледелия, так как позволяет детально проанализировать состояние посевов на конкретных полях, выявить неоднородность посевов и участки, где необходимо провести агрохимобработку, подкормку и др., т. е. можно непосредственно управлять процессом производства продукции. Это, на наш взгляд, особенно важно для территорий со сложным рельефом, таких как субъекты восточной части Сибирского федерального округа (СФО). Нами [14] предложен метод прогноза средней урожайности зерновых и зернобобовых культур, основанный на наземных и спутниковых данных по субъектам западной части СФО и юга Урала. Для субъектов восточной части СФО аналогичные методы средней по субъектам урожайности, необходимые для руководства и управления АПК, пока не разработаны, хотя они имеют важное значение для этих территорий, так как являются значимой поддержкой для решения проблем самообеспечения регионов, определения необходимых объемов межрегиональных обменов, а также планирования рынков сбыта (закупки) продукции. Имеющиеся для этой территории методы прогноза урожайности зерновых культур, используемые в настоящее время в Росгидромете, разработаны по наземным данным в основном в восьмидесятые годы и во многих случаях имеют низкую оправдываемость, что вызвало необходимость создания новых методов, разработанных на основе современных (изменившихся) агроклиматических условий в последние десятилетия и изменившейся культуры земледелия [4, 7]. Кроме того, в данной работе, которая является продолжением исследований по теме 1.1.1.7 плана НИР Росгидромета, ставилась задача изучения возможности использования спутниковой информации для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур в субъектах восточной части СФО.

В восточную часть СФО входят Красноярский край, республики Хакасия и Тыва, Иркутская область. На территории этих субъектов зерновые культуры возделываются на площади около 1450,0 тыс. га, что составляет 16 % всей посевной площади этих культур в СФО. Из них более 10 %, или около 950,0 тыс. га, приходится на Красноярский край, около 430,0 тыс. га (примерно 5 %) на Иркутскую область; в республиках Хакасия и Тыва площади зерновых культур небольшие и составляют, соответственно, около 80,0 и 15,0 тыс. га. Вклад этих субъектов в валовой сбор зерна в СФО составляет в среднем за последние пять лет 3,4 млн т, или более 21 % валового сбора зерна в округе. Изменчивость средней урожайности в субъектах значительна, коэффициенты вариации составляют от 19 до 32 %. Сильно

колеблются по годам и валовые сборы зерна. В Красноярском крае, например, где урожайность самая высокая в округе [18], наиболее низкий за рассматриваемый нами период 2001–2020 гг. валовой сбор зерна (1,49 млн т) наблюдался в 2006 году, когда первая половина вегетационного периода была засушливой, а максимальный сбор зерна (2,67 млн т) получен в достаточно благоприятном по погодным условиям 2020 году.

При анализе динамики урожайности зерновых культур за рассматриваемый период выявлено, что значительный рост урожайности наблюдался во всех субъектах восточной части СФО. Наибольшим он был в Республике Хакасия, где урожайность от начала к концу периода увеличилась на 10,7 ц/га, в Красноярском крае она увеличилась на 8,9 ц/га, а в Республике Тыва и Иркутской области, соответственно, на 6,1 и 5,8 ц/га. Скорость роста урожайности (погодичный прирост) составляла в субъектах в основном от 0,33 до 0,54 ц/га. Приведенные данные указывают на большое значение улучшения культуры земледелия (использование новых сортов с более высоким потенциалом продуктивности, применение инновационных технологий). Коэффициенты детерминации (R^2) уравнений трендов, рассчитанных нами в виде полиномов первой или второй степени, составляли в основном 0,50–0,68, что также свидетельствует о большом значении культуры земледелия. Однако и отклонения урожайности от тренда (ΔY) по годам за счет погодных условий были значительными даже в смежные годы, когда культура земледелия практически не менялась. Как показал анализ трендов и метеоусловий, чаще всего большие отрицательные отклонения наблюдались при ухудшении условий увлажнения в июне или в мае-июне. Так, например, в Иркутской области в благоприятный по погодным условиям 2013 год (количество осадков в июне более чем на четверть превысило норму, а ГТК₆ составлял 1,55) средняя урожайность зерновых культур была 20,1 ц/га, а в 2015 г., когда в июне осадков выпало значительно меньше нормы, – 16,4 ц/га. В Республике Хакасия в 2019 г., когда июнь был теплым и влажным, ГТК₆ составлял 1,46, урожайность была 19,4 ц/га, а в смежном 2018 г. при дефиците осадков в июне наблюдалась атмосферная засуха средней интенсивности (ГТК₆ = 0,73) и урожайность была всего 12,3 ц/га. В Красноярском крае в недостаточно влажном в первый период вегетации 2018 году в июне также наблюдалась атмосферная засуха (ГТК₆ = 0,64) и урожайность составила 20,5 ц/га, а в достаточно влажном 2020 г, когда в июне осадков выпало в два раза больше нормы (103 мм), – 28,8 ц/га. По данным [20], при засухах в июне средней интенсивности (ГТК₆ = 0,61–0,80) урожайность зерновых культур может снижаться на 20–25 % и более. В приведенных нами примерах по Иркутской области, Республике Хакасия, Красноярскому краю в засушливых условиях урожайность снижалась, соответственно, на 22, 37 и 27 %. Для определения вероятности снижения урожайности в годы, когда в июне наблюдается засуха средней интенсивности, нами рассчитана повторяемость таких засух (ГТК₆ = 0,61–0,80) за период 2001–2020 годов.

Из данных, приведенных в табл. 1, можно сделать вывод о том, что атмосферные засухи в июне (когда можно ожидать существенное снижение урожайности) в Красноярском крае и Иркутской области наблюдаются 2–3 раза в 10 лет, в Республике Хакасия – 1 раз, а в Республике Тыва – 4 раза в 10 лет. Повторяемость слабых засух в отдельных субъектах (например, в Республике Тыва) также значительна, но их влияние на урожайность было небольшим.

Таблица 1. Повторяемость атмосферных засух средней (ГТК = 0,61–0,80) и слабой (ГТК = 0,81–0,99) интенсивности в июне в субъектах СФО

Table 1. The frequency of medium- (HTC = 0.61–0.80) and low-intensity (HTC = 0.81–0.99) atmospheric droughts in the SFO subjects in June

Территория	Значения ГТК ₆			
	0,61–0,80		0,81–0,99	
	число случаев	%	число случаев	%
Красноярский край	3*	15	4	20
Иркутская область	5**	25	3	15
Республика Хакасия	2	10	1	5
Республика Тыва	8***	40	7	35

Примечание. * Из них одна сильная, ** две сильных, *** четыре сильных (ГТК₆ ≤ 0,60)

Проведенный анализ динамики тепло- и влагообеспеченности зерновых культур за период с 2001 по 2020 год в основной период вегетации (май-июнь) выявил улучшение условий увлажнения, так как ГТК₅₋₆ от начала к концу периода в основном увеличился на 0,26–0,86, а ГТК₆ в большинстве субъектов (кроме Красноярского края) – на 0,10–0,58 (табл. 2). Это, как и повышение культуры земледелия, способствовало росту урожайности в рассмотренный период. Положительным было и снижение (кроме Иркутской области) средней за май-июнь температуры воздуха (Т₅₋₆). Однако сдерживающим, или негативным фактором в большинстве субъектов, особенно в Красноярском крае и Иркутской области, где большие посевные площади, оказалось повышение температуры воздуха в июне (Т₆), а это наиболее важный период для формирования колоса яровых зерновых культур, преобладающих в регионе (табл. 2). Таким образом, анализ трендов урожайности и метеорологических условий в рассмотренный период показал, что при разработке метода прогноза урожайности зерновых культур необходимо учитывать две составляющие урожайности: рост урожайности за счет улучшения культуры земледелия и колебания урожайности вследствие складывающихся погодных условий в конкретные годы.

Таблица 2. Изменение условий увлажнения в июне (ГТК₆), в мае-июне (ГТК₅₋₆) и температуры воздуха в июне (Т₆, °С) и в мае-июне (Т₅₋₆, °С) в субъектах СФО

Table 2. The change in moistening conditions in June (HTC₆), May-June (HTC₅₋₆) and air temperature in June (T₆, °C) and May-June (T₅₋₆, °C) in the SFO subjects

Значения метеорологических элементов по тренду (2001–2020 гг.)							
2001-2020	Разница	2001-2020	Разница	2001-2020	Разница	2001-2020	Разница
Т₆°С		ГТК₆		Т₅₋₆°С		ГТК₅₋₆	
Красноярский край							
16,9-17,2	0,30	1,31-1,08	-0,23	13,6-12,9	-0,7	1,32-1,76	0,44
Республика Хакасия							
17,8-17,0	-0,80	1,22-1,80	0,58	14,6-13,9	-0,7	1,51-2,37	0,86
Республика Тыва							
16,6-16,7	0,10	0,81-0,96	0,15	13,5-13,2	-0,3	0,80-0,85	0,05
Иркутская область							
16,5-16,8	0,33	1,22-1,32	0,1	12,8-12,9	0,1	1,27-1,53	0,26

Поскольку в работе ставилась задача исследовать возможность использования спутниковой информации для разработки метода прогнозирования урожайности зерновых культур в субъектах восточной части СФО, нами была сформирована база данных спутниковых наблюдений за 2001–2020 гг. В нее вошли архивные и текущие осредненные по субъектам значения одного из наиболее распространенных индикаторов роста и плотности посева – вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), а также урожайность зерновых культур по данным Росстата (с убранной площади). На рис. 1 приведена динамика средних многолетних значений NDVI, рассчитанных нами за указанный период. Можно видеть существенные различия в ходе кривых, описывающих динамику NDVI в субъектах в течение вегетационного периода, а также разницу средних максимальных значений этого показателя. В Красноярском крае, который по данным [18] «является лидером по урожайности зерновых культур в СФО», максимальное значение NDVI составляет (в среднем за рассмотренный период) 0,75, т. е. даже выше, чем в субъектах Западной Сибири [14].

В Иркутской области, занимающей второе место по уровню урожайности в СФО, максимальное значение NDVI составляет 0,71, а в республиках Хакасия и Тыва, где урожайность зерновых культур сравнительно низкая, соответственно, 0,63 и 0,50. Таким образом, можно полагать, что на рассматриваемой территории средние максимальные значения NDVI, на наш взгляд, в определенной степени характеризуют потенциальные возможности для формирования урожая в конкретных почвенно-климатических условиях субъекта. Отмечаются и различия в сроках наступления

средних максимальных значений: в Красноярском крае максимум NDVI отмечается в 27 неделю вегетации (отсчет недель с начала календарного года), в Республике Хакасия и Иркутской области – в 28 неделю, а в Республике Тыва – в 30 неделю.

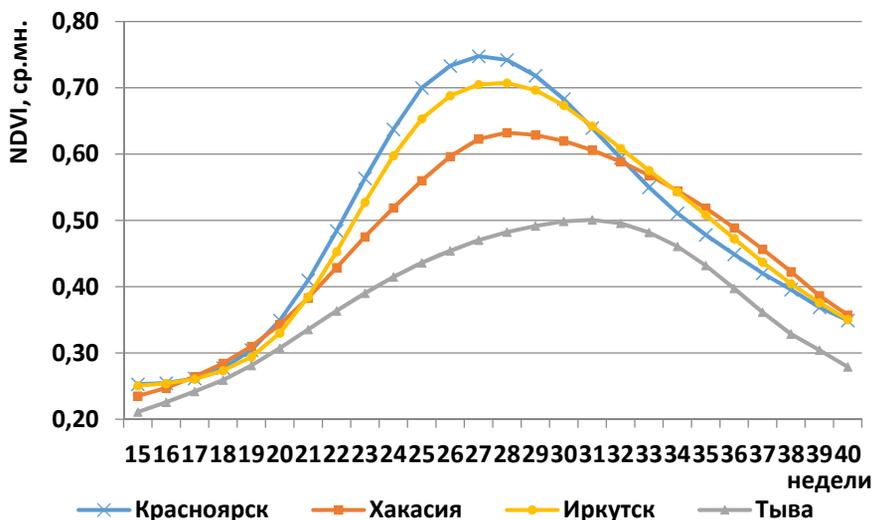


Рис. 1. Динамика средних многолетних значений NDVI по неделям вегетации в субъектах СФО (2001–2020 гг.).

Fig. 1. The dynamics of average long-term NDVI for different vegetation weeks in the SFO subjects (2001–2020)

Выше мы отмечали большую разницу в уровне урожайности зерновых культур в разные по погодным условиям (даже смежные) годы. В результате проведенных исследований выявлено, что и максимальные значения NDVI в такие годы сильно различаются. Так, в Красноярском крае, где, как сказано ранее, самые большие посевные площади зерновых культур, в благоприятный по погодным условиям 2020 год максимальное значение NDVI составило 0,77, или 103 % от среднего многолетнего максимума, а в неблагоприятный 2018 год – 0,71–95 % (рис. 2).

По данным [17], по величине отклонений NDVI от среднего многолетнего значения можно на качественном уровне делать выводы о состоянии посевов. При этом положительное отклонение свидетельствует о том, что состояние посевов зерновых культур лучше среднего в данном субъекте и наоборот. Понятно, что основное значение для формирования продуктивности зерновых культур имеют складывающиеся погодные условия, в которых происходит рост и развитие растений, формирование биомассы и колоса и в конечном итоге – урожайности [4, 20]. Так, на рис. 2 показано, что в 2018 г. в июне осадков выпало лишь 53 %, а в 2020 г. – 170 % нормы,

ГТК₆ в 2020 г. составил 169 %, а в 2018 г. – только 52 % нормы. Средняя температура воздуха в 2020 г. была ниже нормы (91 %), а в 2018 г. на 15 % превысила норму. В итоге, как отмечалось выше, урожайность зерновых культур в среднем по краю в 2020 г. была 28,8 ц/га, а в 2018 г. – лишь 20,5 ц/га.

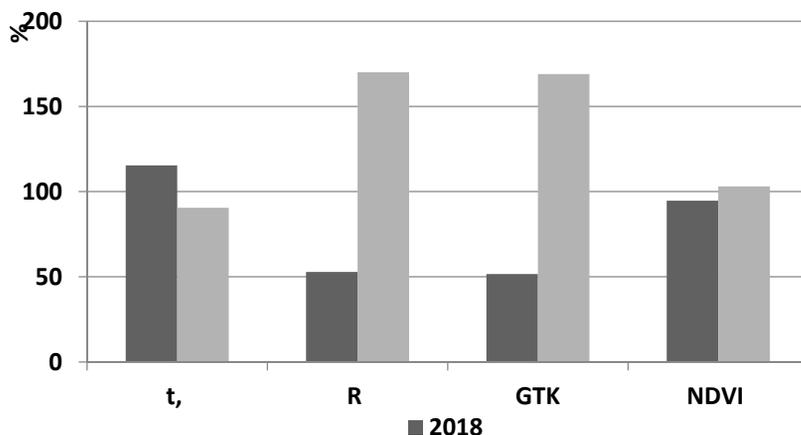
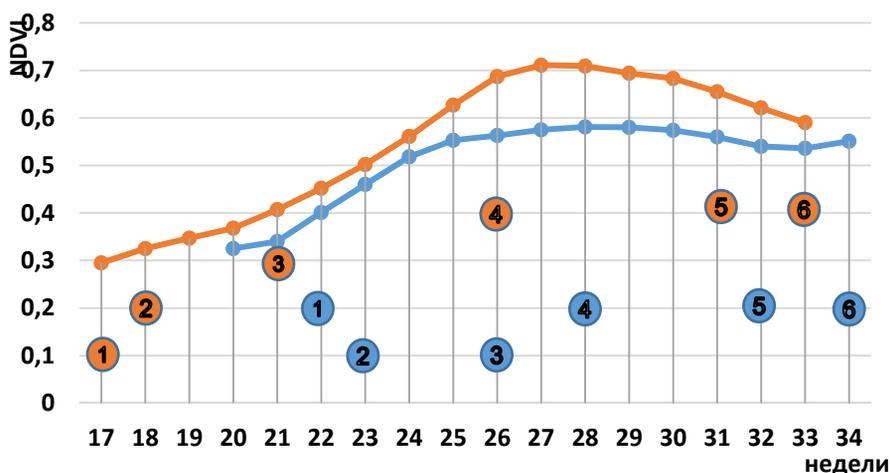


Рис. 2. Значение метеорологических факторов и NDVI (в % от средних многолетних) в июне 2018 и 2020 гг. в Красноярском крае.

Fig. 2. The values of meteorological factors and NDVI (% of the normal) in June in 2018 and 2020 in the Krasnoyarsk krai.

Проведенные исследования показали, что в субъектах, где площади зерновых культур небольшие, на конкретных полях сравнительно четко прослеживается связь агрометеорологических условий с NDVI в период формирования колоса (фазы «выход в трубку – колошение») в разные по погодным условиям годы (рис. 3). Так, в 2018 г. в Республике Хакасия (данные опорной ГМС Таштып) средняя температура воздуха за период «выход в трубку – колошение» составила 19,4 °С, количество осадков – 17,7 мм, а продолжительность этого периода составила всего 16 дней. В 2020 г. средняя за аналогичный период температура воздуха составила 15,1 °С, количество осадков – 33,5 мм, а продолжительность этого периода оказалась почти вдвое больше, что способствовало образованию количества колосков в колосе на 15 % больше средних значений и, следовательно, более высокому урожаю яровой пшеницы (23,1 ц/га, тогда как в 2018 г. урожайность была 12,9 ц/га).

Такие резко различные агрометеоусловия адекватно отражали состояние растений и значения NDVI. На даты колошения пшеницы значение NDVI в 2020 г. было 0,76, а в 2018 г. – только 0,59, т. е. почти на 20 % меньше. Однако в большинстве лет существенных различий не наблюдалось.



1 - "сев", 2 - "всходы", 3 - "выход в трубку", 4 - "колошение", 5 - "восковая спелость", 6 - "полная спелость" —●— 2018

Рис. 3. Динамика NDVI по неделям вегетации и фазы развития яровой пшеницы в Республике Хакасия (ГМС Таштып) в 2018 и 2020 гг.

Fig. 3. The NDVI dynamics for different vegetation weeks and the phases of spring wheat development in the Republic of Khakassia (Tashtyp weather station) in 2018 and 2020.

В исследованиях по разработке метода прогноза средней по субъектам урожайности зерновых культур связи урожайности с NDVI определялись на основе построенных матриц парных коэффициентов корреляции между урожайностью и значениями NDVI по неделям вегетации по всем четырем субъектам восточной части СФО за период 2001–2020 гг. Использовались архивные данные – осредненные по субъектам значения вегетационного индекса NDVI.

Исследовалась теснота связей средней по субъекту урожайности (Y , ц/га) и аномалии урожайности зерновых культур, т. е. отклонений урожайности от трендов (ΔY , ц/га), по указанным субъектам (по Красноярскому краю также Y и ΔY по яровой пшенице) с NDVI за указанный период по неделям вегетации. Оказалось, что значимые и тесные связи NDVI с урожайностью зерновых культур и яровой пшеницы наблюдались лишь в Красноярском крае, где зерновые культуры занимают 63 % всех пахотных земель, из них более 62 % площади занимает яровая пшеница. В Иркутской области, где посевные площади почти вдвое меньше, близкая к значимой связь проявлялась лишь в 24 неделю вегетации ($r = 0,42$), а значимой ($r = 0,46$) она становилась только в 25 неделе. В республиках Хакасия и Тыва, где посевные площади небольшие, сложная орография территории и относительно малые пространственные масштабы погодных условий, за рассматриваемый период тесных связей средней урожайности зерновых культур (и даже близких к значимым) с NDVI вовсе не выявлено. На рис. 4

для наглядности показана связь урожайности зерновых культур и яровой пшеницы в Красноярском крае и урожайности зерновых культур в Иркутской области с NDVI (динамика коэффициентов корреляции) за период 2001–2020 гг. по неделям вегетации.

Следует отметить, что наиболее тесная связь урожайности зерновых культур с NDVI в Красноярском крае отмечается в 25 неделю вегетации ($r = 0,52$), а с урожайностью яровой пшеницы – в 26 неделю ($r = 0,56$), что, по-видимому, можно объяснить более поздними сроками сева преобладающей в крае пшеницы, чем, например, овса, ячменя, гороха, входящих в группу всех зерновых культур. Кроме того, в эту группу входят и озимые культуры, которые весной раньше яровых культур начинают активно вегетировать, так как их сев, появление всходов и кущение происходит осенью предшествующего года [12]. Таким образом, можно сделать вывод, что использование NDVI для разработки метода прогноза средней по субъекту урожайности зерновых культур, а также яровой пшеницы, целесообразно лишь в Красноярском крае. При этом необходимо выявить и влияние погодных условий.

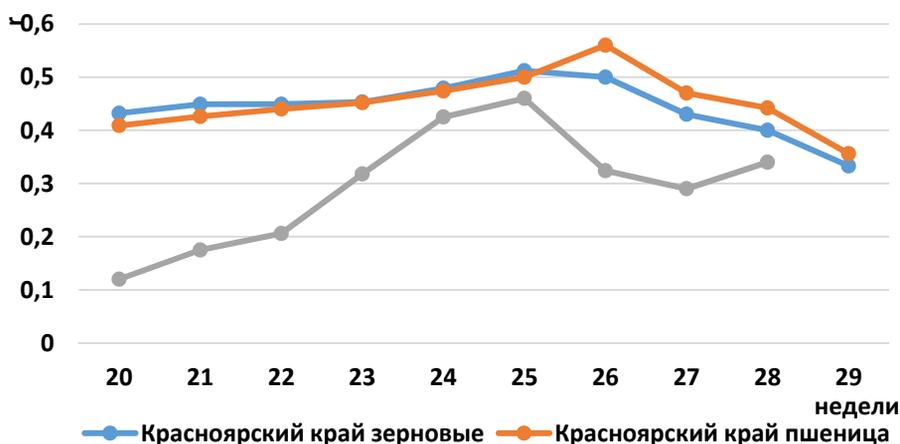


Рис. 4. Связь урожайности зерновых культур и яровой пшеницы в Красноярском крае и зерновых культур в Иркутской области с NDVI (динамика коэффициентов корреляции r) по неделям вегетации (2001–2020 гг.).

Fig. 4. The correlation of the yield of grain crops and spring wheat in the Krasnoyarsk krai and grain crops in the Irkutsk oblast with the NDVI (the dynamics of correlation coefficients r) for different vegetation weeks (2001–2020).

Для оценки влияния погодных условий на урожайность зерновых культур использовались следующие метеорологические показатели: средняя по субъектам температура воздуха (t), количество осадков (R'), дефицит влажности воздуха (d), гидротермический коэффициент увлажнения (ГТК) по месяцам вегетационного периода май– июль (ГТК₅, ГТК₆, ГТК₇),

а также по отдельным отрезкам этого периода: май–июнь (ГТК₅₋₆) и май–июль (ГТК₅₋₇). На основе построенных корреляционных матриц, как и при исследовании связей с NDVI, определялась теснота связей этих показателей не только с урожайностью $У$, но и с $\Delta У$, т. е. с аномалией урожайности (отклонениями урожайности от построенных по субъектам линейных трендов) зерновых культур по всем четырем субъектам (а по Красноярскому краю – и с $У$ и $\Delta У$ яровой пшеницы).

Оказалось, что в Красноярском крае связи указанных выше метеорологических показателей с урожайностью и аномалией урожайности были несколько более тесными по яровой пшенице, чем по зерновым культурам. Это можно объяснить тем, что в группу зерновых культур, как отмечалось выше, входят разные культуры, у которых “критические” периоды по отношению к метеорологическим условиям разные, в том числе и в связи с разными сроками сева. При этом в Красноярском крае связи метеоусловий с $\Delta У$ пшеницы, как и с $\Delta У$ зерновых культур, были несколько более тесными, чем с $У$. В остальных субъектах более тесные связи метеорологических показателей были с $У$, а не с $\Delta У$. Следует отметить, что практически во всех субъектах значимые и наиболее тесные связи $У$ с метеорологическими показателями наблюдались в июне, лишь в отдельных субъектах в мае, а в Республике Тыва – в июле.

На рис. 5а показана связь аномалии урожайности зерновых культур $\Delta У$ в Красноярском крае с ГТК₆, которая характеризуется высоким коэффициентом корреляции r , равным 0,766. При этом следует отметить, что большие положительные отклонения урожайности от тренда наблюдались в основном при значениях ГТК₆, равных 1,2–2,2. Связь урожайности $У$ с этим показателем была менее тесной ($r = 0,523$). Аналогичной, но несколько менее тесной, чем с ГТК₆, проявилась связь $\Delta У$ в Красноярском крае и с количеством осадков в июне (R_6). С температурой и дефицитом влажности воздуха в июне связь была обратной (отрицательной). С $\Delta У$ связь характеризовалась значениями r , равными -0,476 и -0,536, а с $У$, соответственно, -0,418 и -0,362, т. е. при значимом для двадцатилетнего ряда $r \geq 0,432$ связи этих показателей с $У$ были лишь близкими к значимым или не значимы.

Проявление более тесных связей метеорологических элементов с $У$, чем с $\Delta У$, характерно для Республики Хакасия, Иркутской области, а в Республике Тыва наиболее тесные связи метеопоказателей с $У$ характерны лишь для июля. На рис. 5б показана зависимость урожайности зерновых культур в Республике Хакасия от средней за июль температуры воздуха. Отметим, что наиболее высокая урожайность наблюдается при средней за июль температуре воздуха ниже 17 °С. Теснота этой связи характеризуется r , равным 0,624. В Иркутской области тесная связь урожайности $У$ зерновых культур наблюдалась со средним ГТК за май–июнь (ГТК₅₋₆) и за май–июль (ГТК₅₋₇).

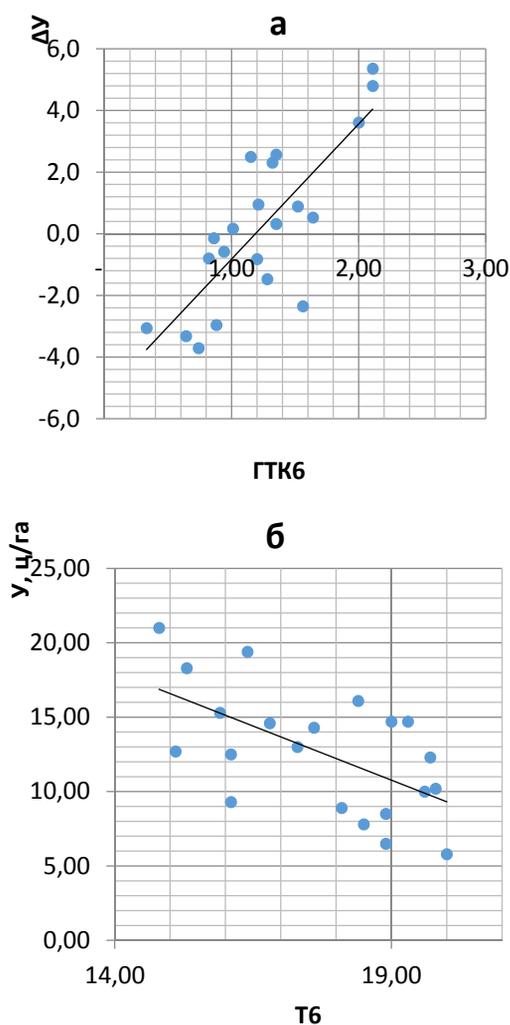


Рис. 5. Зависимость аномалии урожайности зерновых культур ΔY от гидро-термического коэффициента увлажнения в июне (ГТК₆) в Красноярском крае (а); урожайности зерновых культур Y от средней температуры воздуха в июне (Т₆) в Республике Хакасия (б).

Fig. 5. The dependence of (a) the anomaly of the grain crop yield ΔY on the hydro-thermal coefficient in June (ГТК₆) in the Krasnoyarsk krai; (b) the yield of grain crops Y on the average air temperature in June (Т₆) in the Republic of Khakassia.

Разработка метода прогноза средней по субъектам урожайности зерновых культур в субъектах восточной части СФО проводилась с учетом результатов проведенного регрессионно-корреляционного анализа и установленных связей Y и ΔY зерновых культур (по Красноярскому краю –

и яровой пшеницы) с NDVI и метеорологическими показателями. В связи с тем, что в республиках Хакасия, Тыва и Иркутской области значимых связей U и ΔU с NDVI не выявлено (в Иркутской области значимой связью оказалась лишь в одну, 25 неделю), метод прогноза урожайности зерновых культур по этим трем субъектам разрабатывался по наземным данным. Отбор метеопараметров для построения регрессионной прогностической модели производился с учетом их значимых связей (на 5%-ном уровне) с урожайностью. На первом этапе было получено простое линейное уравнение: регрессионная модель, где в качестве параметров использовались в Иркутской области t_5 и ГТК₅, в Республике Хакасия – t_6 и ГТК₆, а в Республике Тыва – T_7 и ГТК₇.

В качестве примера приведем регрессионную модель для прогноза урожайности в июне по Иркутской области:

$$y = 1,804 \text{ ГТК}_5 - 0,110 t_5 + 15,86; R = 0,563.$$

Однако полученные такого вида модели оказались неустойчивыми, авторская проверка за 2017–2021 гг. показала невысокие результаты. Средняя оправдываемость прогнозов за 5 лет составила 74–79 %.

Выше мы отмечали большое значение культуры земледелия для формирования урожая, о чем свидетельствовали хорошо выраженные тенденции роста урожайности. Для учета этой тенденции в линейные регрессионные модели, полученные только на основе метеорологических данных, вводились порядковые номера года (n), т. е. тренд ($n - \text{Утр}$), который в общем виде отражает ежегодный прирост урожайности в субъектах. Эти модели оказались достаточно устойчивыми, множественные коэффициенты корреляции составляли от 0,831 до 0,907. Модели разработаны для прогнозов урожайности зерновых культур в Иркутской области, республиках Хакасия и Тыва для первого срока составления прогнозов урожайности, принятого в Росгидромете (3 декада июня) и для второго срока (3 декада июля). Эти прогностические модели приведены в табл. 3.

Приведенные линейные регрессионные прогностические модели урожайности, основанные на метеорологических данных и учете культуры земледелия, по результатам авторских испытаний в соответствии с Инструкцией [5] на зависимых (2017–2020 гг.) и независимых (2021 г.) данных показали хорошую оправдываемость – от 83 до 95 %.

Для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур и яровой пшеницы в Красноярском крае, где большие посевные площади, весьма целесообразным, как показали результаты проведенных исследований, оказалось использование спутниковых данных (NDVI). Тесная наиболее значимая связь урожайности зерновых культур в крае с NDVI (см. рис. 4) проявляется уже в 21 неделю вегетации, а наиболее тесной она была в 25 неделю, когда значение коэффициента корреляции r было равным 0,522. Для пшеницы наибольшая теснота связи наблюдалась в 26 неделю ($r = 0,556$).

Таблица 3. Регрессионные модели для прогноза урожайности (Y, ц/га) зерновых культур в первый (I) и второй (II) сроки составления прогнозов по субъектам СФО

Table 3. The regression models for the grain crop yield prediction (Y, centner/ha) at the first (I) and second (II) moments of the forecast preparation for the SFO subjects

Срок прогноза	Субъект РФ	R
Иркутская область		
I	$Y = -0,122t_5 + 0,871ГТК_5 + 0,294n + 14,307^*$	0,831
II	$Y = -0,167t_5 + 1,974 ГТК_{5-7} + 0,287n + 13,223^*$	0,847
Республика Хакасия		
I	$Y = -0,316t_6 + 1,401ГТК_6 + 0,497n + 10,552^*$	0,886
II	$Y = -0,949t_7 + 2,204ГТК_6 + 0,447n + 22,588^*$	0,907
Республика Тыва		
I	$Y = 0,054t_7 + 3,904ГТК_7 + 0,180n + 2,176^*$	0,837
II	$Y = -0,67t_7 + 0,052R'_7 + 0,217n + 16,181^*$	0,857

Примечание. t_5 – средняя температура воздуха за май; t_6 – за июнь; t_7 – за июль; ГТК₅ – гидротермический коэффициент увлажнения за май, ГТК₆ – за июнь, ГТК₇ – за июль; ГТК₅₋₇ – за май-июль; R'_7 – сумма осадков за июль; n – порядковый номер года (n=1 для 2001 г.); * – свободный член; R – коэффициент множественной корреляции.

Как было сказано ранее, большое значение для формирования урожая имеют метеорологические показатели тепло- и влагообеспеченности первого периода вегетации. В Красноярском крае также большое значение имеет и культура земледелия, что показали и хорошо выраженные тренды урожайности (ежегодный прирост урожайности в крае составляет 0,47 ц/га). В связи с этим при разработке метода прогноза урожайности зерновых культур, а также яровой пшеницы в Красноярском крае, в использованном нами подходе прогностическая урожайность (У_п), как и в работе [15], рассматривалась как сумма двух составляющих: У_{пр} = У_{тр} + ΔУ, где У_{тр} – детерминированная составляющая, определяемая в основном культурой земледелия, или тренд. В данной работе эта составляющая описывалась в основном уравнениями полинома первой степени вида $y = ax + c$ или полинома второй степени $y = ax^2 + bx + c$, так как они достаточно адекватно отражают повышение урожайности в крае как зерновых культур в целом ($R^2 = 0,55$), так и яровой пшеницы ($R^2 = 0,62$).

Автоматизированный расчет трендовой составляющей урожайности У_{тр} входит в состав алгоритма, имеющегося на рабочем месте агрометеоролога-прогнозиста в Гидрометцентре России для расчета прогностиче-

ской величины урожайности. ΔY – случайная величина, зависящая главным образом от складывающихся агрометеорологических условий и состояния посевов по данным спутниковых измерений в текущем году (год прогноза). Метеорологические параметры прогностических моделей для расчета ΔY , как и значения NDVI, отбирались с учетом тесноты их связей с урожайностью (критерий отбора $r \geq 0,43$) и в основном в декады (недели), близкие к принятым срокам составления прогнозов.

Разработанные регрессионные прогностические модели для Красноярского края, основанные на комплексировании наземных и спутниковых данных, для прогнозов урожайности зерновых культур и яровой пшеницы, а также моделей для прогнозов урожайности зерновых культур, разработанные по наземным данным для республик Хакасия, Тыва и Иркутской области, значимы (как показала проведенная проверка по критерию Фишера), а коэффициенты при переменных значимы по критерию Стьюдента на 5%-ном уровне. Разработанные модели для зерновых культур и пшеницы представлены в табл. 4 для первого (3 декада июня) и второго (3 декада июля) сроков составления прогнозов.

Таблица 4. Регрессионные модели для прогноза урожайности (ΔY , ц/га) зерновых культур и яровой пшеницы в первый (I) и второй (II) сроки составления прогнозов по Красноярскому краю

Table 4. The regression models for the prediction of the yield (ΔY , centner/ha) of grain crops and spring wheat at the first (I) and second (II) moments of the forecast preparation for the Krasnoyarsk krai

Срок прогноза	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	C	R
Зерновые культуры								
I	-0,232	0,081			-0,299		-0,804	0,713
I	-0,008*		4,193		0,834		-5,695	0,699
II			5,152	0,534		21,413	-26,710	0,787
Яровая пшеница								
I	0,276	0,093				40,814	-40,862	0,712
II			6,370	0,934		22,549	-32,291	0,85

Примечание. Коэффициенты регрессии при a_1 – температуре воздуха за июнь t_6 , * за май t_5 ; a_2 – сумме осадков за июнь R'_6 ; a_3 – гидротермическом коэффициенте увлажнения за июнь ГТК₆; a_4 – дефиците влажности воздуха в июне d_6 ; a_5 – при $NDVI_{25}^{зерн.}$; a_6 – при $NDVI_{27}^{зерн.}$; C – свободный член; R – коэффициент множественной корреляции.

Проверка разработанных прогностических моделей урожайности на зависимых материалах (2001–2020 гг.) и независимых (2001 г.), проведенная в соответствии с Инструкцией [5], показала их достаточную

надежность. Ошибки прогнозов, рассчитанных с учетом двух составляющих урожайности – Утр и ΔY , были в основном в пределах 4–13 %, в отдельные годы (преимущественно в начале периода) – до 18 % по зерновым культурам и до 16 % – по яровой пшенице.

Заключение

Проведенные исследования агрометеорологических условий вегетации зерновых и зернобобовых культур в весенне-летний период в субъектах восточной части СФО выявили тенденции их изменения в период с 2001 по 2020 г., а также влияние этих условий на формирование урожайности. Установлено, что влияние на урожайность оказывают погодные условия в период сева преобладающих в этих районах яровых зерновых культур (май) и в период формирования генеративных органов (июнь). Показано, что в рассмотренный период наблюдалось некоторое улучшение условий увлажнения: ГТК₅₋₆ увеличился от начала к концу периода в основном на 0,26–0,44 (в Республике Хакасия на 0,86), а средняя температура T_{5-6} °С понизилась на 0,3–0,7 °С (в Иркутской области она практически не изменилась), что в целом было благоприятным для формирования урожайности зерновых культур. Показано, что чаще всего значительное снижение урожайности в субъектах наблюдалось в годы, когда в июне наблюдались засухи; определена повторяемость засух различной интенсивности. Анализ временных рядов урожайности выявил тенденцию роста урожайности в рассмотренный период. Наибольшая скорость роста была характерна для Республики Хакасия, где урожайность от начала к концу периода увеличилась более чем на 10,0 ц/га. В исследованиях показана целесообразность для разработки метода прогноза урожайности зерновых культур использования спутниковой информации в комплексе с наземными данными в Красноярском крае, где установлена тесная связь урожайности этих культур, а также яровой пшеницы, занимающей большие площади (до 63 % от всех посевных площадей зерновых культур), с вегетационным индексом NDVI. В республиках Хакасия, Тыва и в Иркутской области значимых связей средней по субъектам урожайности с NDVI не выявлено.

С использованием метода корреляционно-регрессионного анализа были выбраны (отобраны) наиболее статистически значимые метеорологические параметры и разработаны регрессионные модели для прогнозирования урожайности зерновых культур в республиках Хакасия, Тыва и Иркутской области, основанные на наземных наблюдениях гидрометеостанций с учетом культуры земледелия. Для прогнозов урожайности зерновых культур, а также яровой пшеницы в Красноярском крае разработаны регрессионные модели на основе совместного использования спутниковой информации и наземных данных. Проверка моделей показала достаточно хорошую оправдываемость, средняя относительная ошибка в основном не превышала 14 %.

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. *Бондур В.Г., Гороховский К.Ю., Игнатьев В.Ю., Мурынин А.Б., Гапонова Е.В.* Метод прогнозирования урожайности по космическим наблюдениям за динамикой развития вегетации // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2013. № 6. С. 61-68.
3. *Брыксин В.М., Евтюшкин А.В., Рычкова Н.В.* Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе данных дистанционного зондирования и моделирования биопродуктивности // Известия Алтайского государственного университета. 2010. № 1–2 (65). С. 89-93.
4. *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.: Изд-во МБА, 2019. С. 183-312.
5. Инструкция по оценке оправдываемости агрометеорологических прогнозов. М.: Гидрометиздат, 1983. 7 с.
6. *Клеценко 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.
7. *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.
8. *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.
9. *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.
10. *Сладких Л.А., Кулик Е.Н., Сахарова Е.Ю.* Мониторинг посевов зерновых культур юга Западной Сибири по данным спутниковых наблюдений // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. – 2015. – Т. 8, № 6. – С. 726-733.
11. *Сторчак И.Г., Ерошенко Ф.В.* Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // Земледелие. 2014. № 7. С. 12-15.
12. *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.

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, 01-02 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. Страшная А.И., Береза О.В. Использование спутниковой информации в агрометеорологическом прогнозировании // Метеорология и гидрология. 2021 № 12. С. 114-126.

17. 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.

18. Тю Л.В., Афанасьев Е.В., Быков А.А., Алещенко В.В. Специализация регионов Сибири в зерновом производстве (на примере пшеницы) // Экономика сельского хозяйства России. 2020. № 9. С. 79-82.

19. Шевырногов А.П., Ботвич И.Ю., Емельянов Д.В. Построение карт урожайности посевов зерновых культур по спутниковым и беспилотным данным // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли. Материалы VIII Международной научной конференции; электронное научное издание. Красноярск, 2021. С. 140-143.

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

21. 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. *Izssledovanie Zemli iz kosmosa [Earth research from space]*, 2006, no. 3, pp. 68-75 [in Russ.].

2. Bondur V.G., Gorohovskij K.Yu., Ignat'ev V.YU., Murynin A.B., Gaponova E.V. Metod prognozirovaniya urozhajnosti po kosmicheskim nablyudeniya za dinamiko razvitiya vegetacii. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Geodeziya i aerofotos'emka*. 2013, no. 6, pp. 61-68 [in Russ.].

3. Bryksin V.M., Yevtyushkin A.V., Rychkova N.V. Forecasting of Grain Crops Productivity on Basis of the Remote Sounding Data and Bio-productivity Modeling. *Izvestiya Altajskogo gosudarstvennogo universiteta [Izvestiya of Altai State University Journal]*, 2010, vol. 65, no. 1-2, pp. 89-93 [in Russ.].

4. Vil'fand R.M., Strashnaya A.I., Bereza O.V., Han V.M., Tarasova L.L., Pavlova A.N. Regional'nye i otraslevye problemy opustynivaniya, degradacii zemel' i zasuh v Rossijskoj Federacii // Nacional'nyj doklad «Global'nyj klimat i pochvennyj pokrov Rossii: opustynivanie i degradaciya zemel', institucional'nye, infrastrukturnye, tekhnologicheskie mery adaptacii (sel'skoe i lesnoe hozyajstvo)». Tom 2. Razdel 4. Moscow, Izd-vo MBA, 2019, pp. 183-312 [in Russ.].

5. Instrukciya po ocenke opravdyvaemosti agrometeorologicheskikh prognozov. Moscow, Gidrometeoizdat publ., 1983, 7 p. [in Russ.].

6. 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. DOI: 10.3103/S1068373921120104

7. Lebedeva V.M., Strashnaya A.I. Osnovy sel'skohozyajstvennoj meteorologii. Tom II. Metody raschetov i prognozov v agrometeorologii. Kniga 2. Operativnoe agrometeorologicheskoe prognozirovanie. Obninsk, VNIIGMI-MCD, 2012, 216 p. [in Russ.].

8. Loupian E.A., Savin I.Yu., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Balashov I.V., Plotnikov D.E. 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.].

9. Savin I.Yu., Bartalev S.A., Loupian E.A., Tolpin V.A., Khvostikov S.A. 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.].

10. Sladkikh L. A., Kulik E. N., Sakharova E. Yu. Grain Crops Monitoring in the South Part of Western Siberia Based on the Satellite Images' Data. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2015, vol. 8, no. 6, pp. 726-733 [in Russ.].

11. Storchak I.G., Eroshenko A.A. FUsing of NDVI for assessing productivity of winter wheat in Stavropol region. *Zemledelie*, 2014, no. 7, pp. 12-15 [in Russ.].

12. A.I. Strashnaya, S.A. Bartalev, T.A. Maksimenkova, O.V. Chub, V.A. Tolpin, D.E. Plotnikov, N.A. Bogomolova 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.].

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 Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem: «Vklad agrofiziki v reshenie funkcional'nyh zadach sel'skohozyajstvennoj nauki», Sankt-Peterburg, 01-02 oktyabrya 2020, 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 SibNIGMI*, 2021, vol. 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, vol. 380, no. 2, pp. 111-137 [in Russ.].

16. *Strashnaya A.I., Bereza, O.V.* Using Satellite Information in Agrometeorological Forecasting. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2021, vol. 46, no. 12, pp. 872-880. DOI: 10.3103/S1068373921120098

17. *Tolpin V. A., Lupyay 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*, 2014, vol. 27, no. 7, pp. 581-586 [in Russ.].

18. *Tiu L. V., Afanasev E. V., Bykov A. A., Aleshchenko V. V.* Specialization of Siberian regions in grain (wheat) production. *Ekonomika sel'skogo hozyajstva [Economics of Agriculture of Russia]*, 2020, no. 9, pp. 79-82 [in Russ.].

19. *Shevyrnogov A.P., Botvich I.YU., Emel'yanov D.V.* Postroenie kart urozhajnosti posevov zernovykh kul'tur po sputnikovym i bespilotnym dannym // Regional'nye problemy distancionnogo zondirovaniya Zemli. Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii; elektronnoe nauchnoe izdanie. Krasnoyarsk, 2021, pp. 140-143.

20. *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.].

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

*Поступила 17.11.2023; одобрена после рецензирования 23.11.2023;
принята в печать 12.12.2023.*

*Submitted 17.11.2023; approved after reviewing 23.11.2023;
accepted for publication 12.12.2023.*