

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ (В ВИДЕ СТЕПЕННОЙ ФУНКЦИИ) ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ДЛЯ ТЕРРИТОРИИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

© 2022 г. С. Л. Кравцов^{а, *}, Ф. И. Привалов^б, С. А. Пушкина^а, В. В. Холодинский^б,
Е. В. Лепесевич^а, Д. В. Голубцов^а, А. П. Гвоздов^б, Д. Г. Симченков^б

^аГосударственное научное учреждение “Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси”, Минск, Беларусь

^бРеспубликанское унитарное предприятие “Научно-практический центр
Национальной академии наук Беларуси по земледелию”, Жодино, Беларусь

*E-mail: krautsou_sl@rambler.ru

Поступила в редакцию 02.02.2022 г.

Определены параметры уравнения прогноза урожайности сельскохозяйственных культур (пшеницы, ячменя, рапса – как озимых, так и яровых форм) по данным дистанционного зондирования Земли для территории Республики Беларусь. В качестве уравнения прогноза урожайности рассмотрена степенная функция, использующая значение вегетационного индекса как одну из входных величин. Параметры уравнения определены (использован статистический подход) без учета сорта сельскохозяйственных культур на фиксированные значения кода развития растений и ориентированы на спектральные каналы спутников серии Sentinel-2. Среди рассмотренных наилучшим оказался нормализованный вегетационный индекс, использующий спектральные каналы в красного края и красной областях спектра. При использовании указанного индекса наблюдалась устойчивая взаимосвязь между его значениями и урожайностью всех исследованных видов сельскохозяйственных культур при всех значениях кода развития растений. Точность прогноза урожайности сельскохозяйственных культур оценена как по данным наземных измерений, так и по прошедшим атмосферную коррекцию данным со спутников серии Sentinel-2: по одному и по множеству участков. При этом точность прогноза урожайности значительно повышалась при переходе от одного участка к множеству.

Ключевые слова: прогноз, урожайность, сельскохозяйственная культура, параметры, уравнение, точность, данные дистанционного зондирования Земли

DOI: 10.31857/S0205961422060069

ВВЕДЕНИЕ

Около 60% агропромышленного производства Республики Беларусь непосредственно связано с зерновым хозяйством. Поэтому оно является системообразующим для остальных секторов сельского хозяйства, и, прежде всего животноводства. Таким образом, объем производства зерна оказывает существенное влияние на уровень жизни населения и обеспечение продовольственной безопасности страны. Одним из показателей, характеризующих объем производства зерна, является урожайность. Вследствие этого, особую актуальность приобретает задача поэтапного, до наступления уборки прогноза урожайности сельскохозяйственных культур как в разрезе поля, так и на уровне отдельных сельхозпредприятий, районов, областей и страны.

Заблаговременный прогноз урожайности может использоваться как коммерческими, так и государственными организациями при:

– *определении дозы внесения минеральных удобрений в период вегетации.* Традиционные подходы внесения минеральных удобрений (на основе среднегодовой урожайности) характеризуются низкой эффективностью – около 33% (Шульц, 2018). В инновационном подходе “точного земледелия” ключ к повышению эффективности заключается в достижении лучшего соответствия между дозой внесения минеральных удобрений и потребностью в них сельскохозяйственных культур на данном поле в данный период времени. Указанное соответствие достигается учетом прогноза урожайности (включая её пространственную изменчивость), обусловленной в том числе и погодными условиями от посева до момента вне-

сения минеральных удобрений. Данный подход позволяет сэкономить до 15% (при сохранении урожайности) от объема вносимых минеральных удобрений;

– *подготовке необходимых мощностей для хранения зерна.* В благоприятные годы (когда урожайность сельскохозяйственных культур находится на пике), а также в период уборки сельхозпредприятия сталкиваются с проблемой снижения (порой радикального) закупочных цен. Поэтому с коммерческой точки зрения целесообразно обеспечить длительное хранение зерна, которое позволяет отказаться от его реализации в период падения цен (Дринча, Цыдендоржиев, 2010). Все сельхозпредприятия Республики Беларусь имеют зернохранилища, рассчитанные на хранение не менее 80% объемов среднегодового валового сбора. При отсутствии свободных мощностей для хранения зерно зачастую приходится размещать в непригодных складах. Из-за такого хранения не только неизбежны потери количества, но и качества собранного зерна – возникает вопрос о его безопасном использовании для продовольственных и фуражных нужд. В среднем при хранении запасов зерна на базе сельхозпредприятия потери составляют около 15%. Правильная организация хранения зерна благодаря своевременной подготовке необходимых мощностей для его хранения на основе прогноза урожайности позволяет сохранить его качество и свести к минимуму потери. Также это повышает ликвидность и стоимость зерна на 10–20%;

– *организации сушки зерна.* В совокупности с неблагоприятными погодными условиями влажность зерна при уборке может достигать 40%. При недостаточной мощности и неправильной организации функционирования имеющиеся в сельхозпредприятии мощности по сушке зерна могут не справиться с его потоком. В результате свежесобранное зерно могут размещать в открытых условиях – на площадках в специальной таре или насыпью в виде буртов для временного хранения. Данная форма хранения зерна непрактична из-за большого влияния на него внешней среды, что значительно сокращает время хранения таких партий. При неблагоприятных погодных условиях сельхозпредприятия теряют до 40% собранного урожая. Причем до 74% из указанных потерь приходится на доработку и хранение зерна (Кулагин, 2013). Количественные потери сопровождаются снижением качества, посевных и продовольственных кондиций зерна;

– *оценке кредитоспособности сельхозпредприятий.* В последнее время агросектор становится одним из приоритетных направлений для кредитования. Ведь это сектор, продукция которого привязана к валюте, а сам агропромышленный комплекс постепенно приобретает статус все ме-

нее рискованного. Урожайность сельскохозяйственных культур используется как одна из составляющих комплексной оценки кредитоспособности сельхозпредприятия при выдаче кредита.

Урожайность характеризует продуктивность культуры в конкретных условиях ее возделывания и является сложным показателем с точки зрения прогнозирования, поскольку ее формирование связано не только с применяемыми агротехнологическими приемами, но и с погодными и природно-климатическими условиями. Территория Республики Беларусь расположена в зоне рискованного земледелия, поэтому погодные условия существенно влияют на урожайность зерновых культур, и валовые сборы в благоприятные годы (в 2012 г. – 9226 тыс. тонн, в 2014 г. – 9564 тыс. тонн – по данным Министерства сельского хозяйства и продовольствия Республики Беларусь) могут значительно превышать сборы в неблагоприятные годы (в 2005 г. – 6421 тыс. тонн, в 2006 г. – 5923 тыс. тонн).

В настоящее время для прогноза урожайности в Республике Беларусь, в основном, используются традиционные подходы оценки погодных условий и районирования территории с помощью комплексных агроклиматических показателей, что связано с существенными материальными и временными затратами и не обеспечивается необходимой оперативностью. В мировой же практике в разных масштабах и географических регионах все шире применяются подходы прогноза урожайности по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Это обусловлено повышением их доступности, объективностью, возможностью оперативной коррекции, охватом больших территорий и развитием вычислительной техники.

Предоставленный свободный доступ к данным со спутников серии Sentinel-2 программы “Copernicus” Европейского космического агентства с пространственным разрешением 10 м (4 из 13 спектральных каналов), 20 м (6 из 13 спектральных каналов) и периодичностью 5 дней (после запуска в марте 2017 г. второго спутника серии) создал уникальную возможность прогноза урожайности сельскохозяйственных культур по данным ДЗЗ.

В связи с этим специалисты государственного научного учреждения “Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси” совместно со специалистами республиканского унитарного предприятия “Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по земледелию” (РУП “НПЦ НАН Беларуси по земледелию”) с 2014 г. приступили к адаптации существующих подходов к прогнозу урожайности сельскохозяйственных культур по данным ДЗЗ к условиям Республики Беларусь

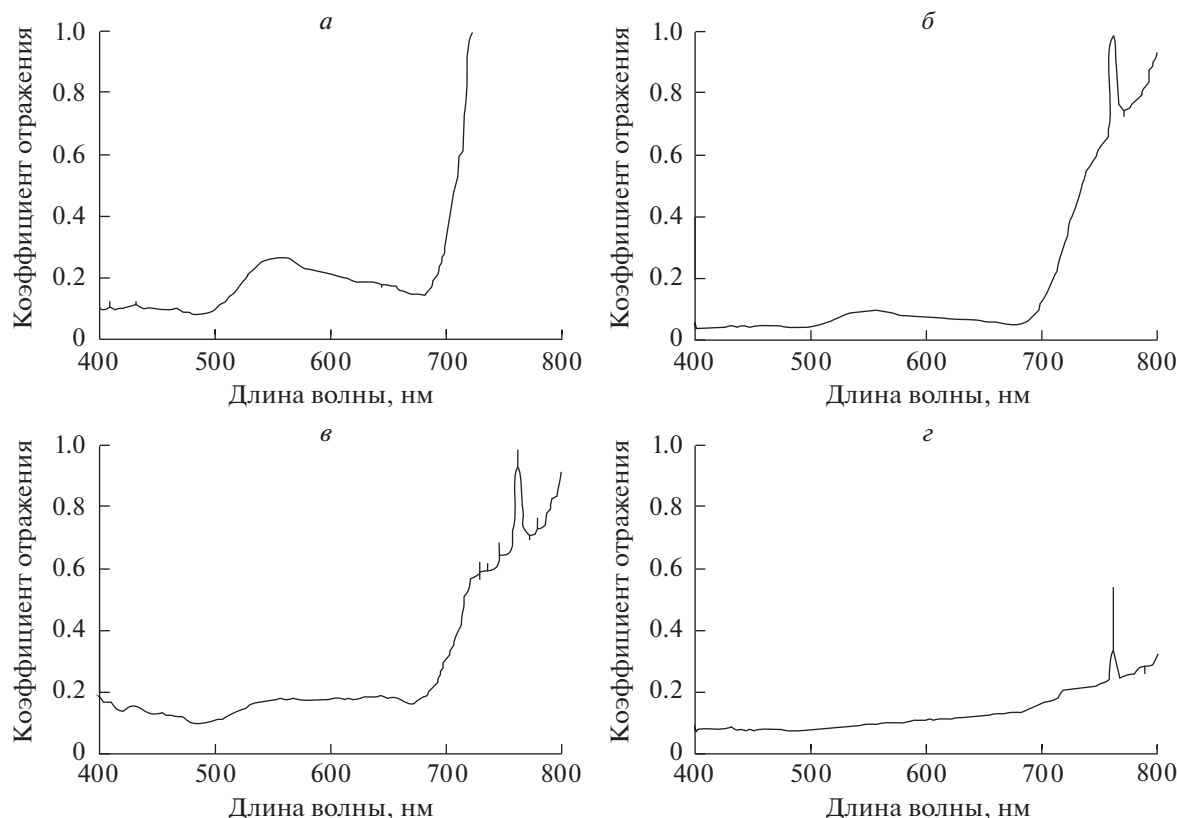


Рис. 1. Результаты спектрометрических измерений для одного из участков рапса озимого: *a* – 14.05.2015; *б* – 04.06.2015; *в* – 08.07.2015; *г* – 11.08.2015.

(Кравцов и др., 2015). Работы (получение исходных данных, проведение испытаний) проводились на опытных полях РУП “НПЦ НАН Беларуси по земледелию” Смолевичского района Минской области, расположенных в почвенно-климатических условиях, являющихся типичными для центральной зоны Республики Беларусь.

Цель работы – определение параметров уравнения (в виде степенной функции) прогноза урожайности сельскохозяйственных культур (пшеницы, ячменя, рапса – как озимых, так и яровых форм) для территории Республики Беларусь по данным ДЗЗ.

ПРОВЕДЕНИЕ СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Для определения параметров уравнения прогноза урожайности на специально выделенных участках (размером около 2×2 м), представляющих исследуемые сельскохозяйственные культуры (пшеницу, ячмень, рапс – как озимые, так и яровые формы) в течение вегетационных сезонов 2014–2016 гг. с интервалом 6–11 дней проводились измерения с использованием спектрометра USB-650 компании “Ocean Optics” (рис. 1). Стан-

дартизация и точность спектрометрических измерений обеспечивались использованием справочной панели Spectralon® (Кравцов и др., 2017). На каждом из участков урожайность определялась путем ручных резки, обмолота, очистки, сушки (до значений показателей для хранения в зернохранилище) непосредственно перед проведением уборочных работ на поле, в пределах которого находились участки. Всего было выделено участков: пшеницы озимой – 47, пшеницы яровой – 10, ячменя озимого – 25, ячменя ярового – 22, рапса озимого – 35, рапса ярового – 47. На выделенных участках выращивались следующие сорта культур: пшеницы озимой – Августина, Ода; пшеницы яровой – Рассвет; ячменя озимого – Циндарелла; ячменя ярового – Атаман, Дзівосны, Радзіміч, Фэст; рапса озимого – Прогресс, Август, Александр, Геркулес F1; рапса ярового – Гедемин, Герцог, Прамень. Погодные условия вегетационных сезонов 2014 г. и 2015 г. были близки к среднестатистическим, тогда как в 2016 г. наблюдался длительный засушливый период.

Участки выбирались таким образом, чтобы максимально охватить диапазон изменения значений урожайности сельскохозяйственных куль-

тур: для пшеницы озимой диапазон значений урожайности на участках составил 27.1–82.4 ц/га, пшеницы яровой – 34.4–72.2 ц/га, ячменя озимого – 29.3–68.1 ц/га, ячменя ярового – 33.2–78.1 ц/га, рапса озимого – 11.1–34.4 ц/га, рапса ярового – 8.6–32.0 ц/га.

УРАВНЕНИЕ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Количество дней после прорастания. Для каждого участка регистрировались даты посева и прорастания, которые использовались для расчета количества дней от прорастания до измерений. При этом учитывались только способствующие росту дни GDD (Growing Degree Days, GDD). С этой целью для каждого дня рассчитывалось значение (Aula et al., 2021):

$$GDD = (T_{\min} + T_{\max})/2 - 4.4,$$

где GDD – значение способствующего росту дня; T_{\min}, T_{\max} – минимальная и максимальная температуры дня, соответственно (°C).

Чтобы день считался способствующим росту соответствующее ему GDD должно быть больше 0.

Оценка урожайности в период вегетации INSEY (IN-Season Estimate of Yield, INSEY). Параметр рассчитывался делением измеренного на участке значения вегетационного индекса на количество дней от прорастания до измерений (Kumar et al., 2017; Aula et al., 2021):

$$INSEY = VI / DAE,$$

где INSEY – оценка урожайности в период вегетации; VI – значение вегетационного индекса; DAE – количество дней после прорастания с GDD более 0.

Прогноз урожайности. Взаимосвязь урожайности многих видов сельскохозяйственных культур со значением параметра INSEY достаточно хорошо описывается степенной функцией (Kumar et al., 2017):

$$GY = \alpha INSEY^{\beta},$$

где GY – прогнозируемая урожайность; α, β – коэффициенты аппроксимации.

ВЕГЕТАЦИОННЫЕ ИНДЕКСЫ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В ИССЛЕДОВАНИИ ВЗАИМОСВЯЗИ УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР СО ЗНАЧЕНИЕМ ПАРАМЕТРА INSEY

Несмотря на то, что диапазон измерений спектрометром USB-650 составлял 350–1000 нм (дискретность измерений 1 нм), адекватные измере-

ния находились в диапазоне 350–740 нм (рис. 1). В этой связи не оказалось возможным вычисление значений наиболее часто используемого как в исследованиях растительности, так и в аппаратуре дистанционного зондирования спектрального канала в ближней инфракрасной области спектра.

В результате исследовались следующие, вычисляемые по результатам спектрометрических измерений, вегетационные индексы (Zhou et al., 2019; Cao et al., 2021):

– *разностные нормализованные*: нормализованный разностный красный края/красный индекс NDRERI (Normalized Difference RedEdge/Red Index, NDRERI), нормализованный разностный красный края/зеленый индекс NDREGI (Normalized Difference RedEdge/Green Index, NDREGI);

– *относительные*: относительный красный края/красный индекс SRRER (Simple Ratio Red-Edge/Red Index, SRRER), относительный красный края/зеленый индекс SRREG (Simple Ratio RedEdge/Green Index, SRREG).

Индекс NDRERI рассчитывается по формуле:

$$NDRERI_{(x,y)} = (I_{(x,y)}^{\text{RedEdge}} - I_{(x,y)}^{\text{Red}}) / (I_{(x,y)}^{\text{RedEdge}} + I_{(x,y)}^{\text{Red}}),$$

где $NDRERI_{(x,y)}$ – значение нормализованного разностного красного края/красного индекса в пикселе (x, y) изображения; $I_{(x,y)}^{\text{RedEdge}}$ – значение пикселя (x, y) изображения в канале, охватывающем область красного края; $I_{(x,y)}^{\text{Red}}$ – значение пикселя (x, y) изображения в канале, охватывающем красную область спектра.

Индекс NDREGI вычисляется как:

$$NDREGI_{(x,y)} = (I_{(x,y)}^{\text{RedEdge}} - I_{(x,y)}^{\text{Green}}) / (I_{(x,y)}^{\text{RedEdge}} + I_{(x,y)}^{\text{Green}}),$$

где $NDREGI_{(x,y)}$ – значение нормализованного разностного красного края/зеленого индекса в пикселе (x, y) изображения; $I_{(x,y)}^{\text{Green}}$ – значение пикселя (x, y) изображения в канале, охватывающем зеленую область спектра.

Индекс SRRER определен следующим образом:

$$SRRER_{(x,y)} = I_{x,y}^{\text{RedEdge}} / I_{x,y}^{\text{Red}},$$

где $SRRER_{(x,y)}$ – значение относительного красного края/красного индекса в пикселе (x, y) изображения.

Индекс SRREG вычисляется как:

$$SRREG_{(x,y)} = I_{(x,y)}^{\text{RedEdge}} / I_{(x,y)}^{\text{Green}},$$

где $SRREG_{(x,y)}$ – значение относительного красного края/зеленого индекса в пикселе (x, y) изображения.

Таблица 1. Значения коэффициентов аппроксимации зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от значения параметра INSEY – индекс NDRERI (BVCH = 40, 50, 60)

Культура	Значение кода BVCH					
	40		50		60	
	α	β	α	β	α	β
Пшеница озимая	0.354762	-0.87685	0.300329	-0.90426	223.2	0.294
Пшеница яровая	1.071419	-0.65857	437.6114	0.349376	38 1467.1	1.462725
Ячмень озимый	12.34062	-0.23156	0.525191	-0.79822	28 656.79	1.044063
Ячмень яровой	4884.814	0.762304	27799.91	1.029846	486030	1.511946
Рапс озимый	411.4661	0.50032	36028.3	1.098221	26 865.46	1.021154
Рапс яровой	4530.961	0.772985	100 138.4	1.210054	33 362.59	1.05492

Таблица 2. Значения коэффициентов аппроксимации зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от значения параметра INSEY – индекс NDRERI (BVCH = 70, 80, 90)

Культура	Значение кода BVCH					
	70		80		90	
	α	β	α	β	α	β
Пшеница озимая	139287.9	1.307827	576978.1	1.541591	493 372.5	1.513113
Пшеница яровая	191067	1.356314	339791.3	1.447745	3440320	1.824214
Ячмень озимый	38592.22	1.085331	56965.5	1.152874	333576.1	1.44204
Ячмень яровой	102487	1.247685	270970.7	1.412255	382066.6	1.474988
Рапс озимый	7785.074	0.844621	38405.31	1.070296	23922.59	1.021053
Рапс яровой	6146.724	0.814365	30702.39	1.042758	119316.4	1.234453

Результаты измерений спектрометра USB-650 адаптировались (путем усреднения) к параметрам каналов спутников серии Sentinel-2: 3 (зеленый, 542–577 нм), 4 (красный, 650–680 нм) и 5 (красного края, 697–712 нм), шириной 35, 30 и 15 нм соответственно.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Различие год от года погодных условий приводит к изменению как дат посева (и соответственно всходов), так и динамики развития растений. Поэтому параметры уравнения прогноза урожайности сельскохозяйственных культур определены на фиксированные значения кода развития растений BVCH (Biologische Bundesanstalt, Bundes-sortenamt und Chemische Industrie, BVCH) 40, 50, 60, 70, 80, 90 (Каленська и др., 2018) и ориентированы на спектральные каналы спутников серии Sentinel-2 (табл. 1–2, рис. 2). Поскольку по данным наземных спектрометрических измерений

наилучшие результаты прогноза урожайности исследованных видов сельскохозяйственных культур получены для индекса NDRERI (см. далее п. “Оценка точности уравнения прогноза урожайности сельскохозяйственных культур”), то и значения коэффициентов аппроксимации зависимости урожайности сельскохозяйственных культур от значения параметра INSEY приведены в табл. 1–2 для указанного индекса.

Оказалось, что значения урожайности всех сортов всех исследованных видов сельскохозяйственных культур сравнительно равномерно распределены относительно кривой уравнения прогноза урожайности при всех значениях кода BVCH (см., например, рис. 2) – какой-либо устойчивой взаимосвязи не наблюдалось. Это позволило определять параметры уравнения прогноза урожайности без учета сорта сельскохозяйственных культур.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ УРАВНЕНИЯ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

Оценка точности уравнения прогноза урожайности сельскохозяйственных культур проведена

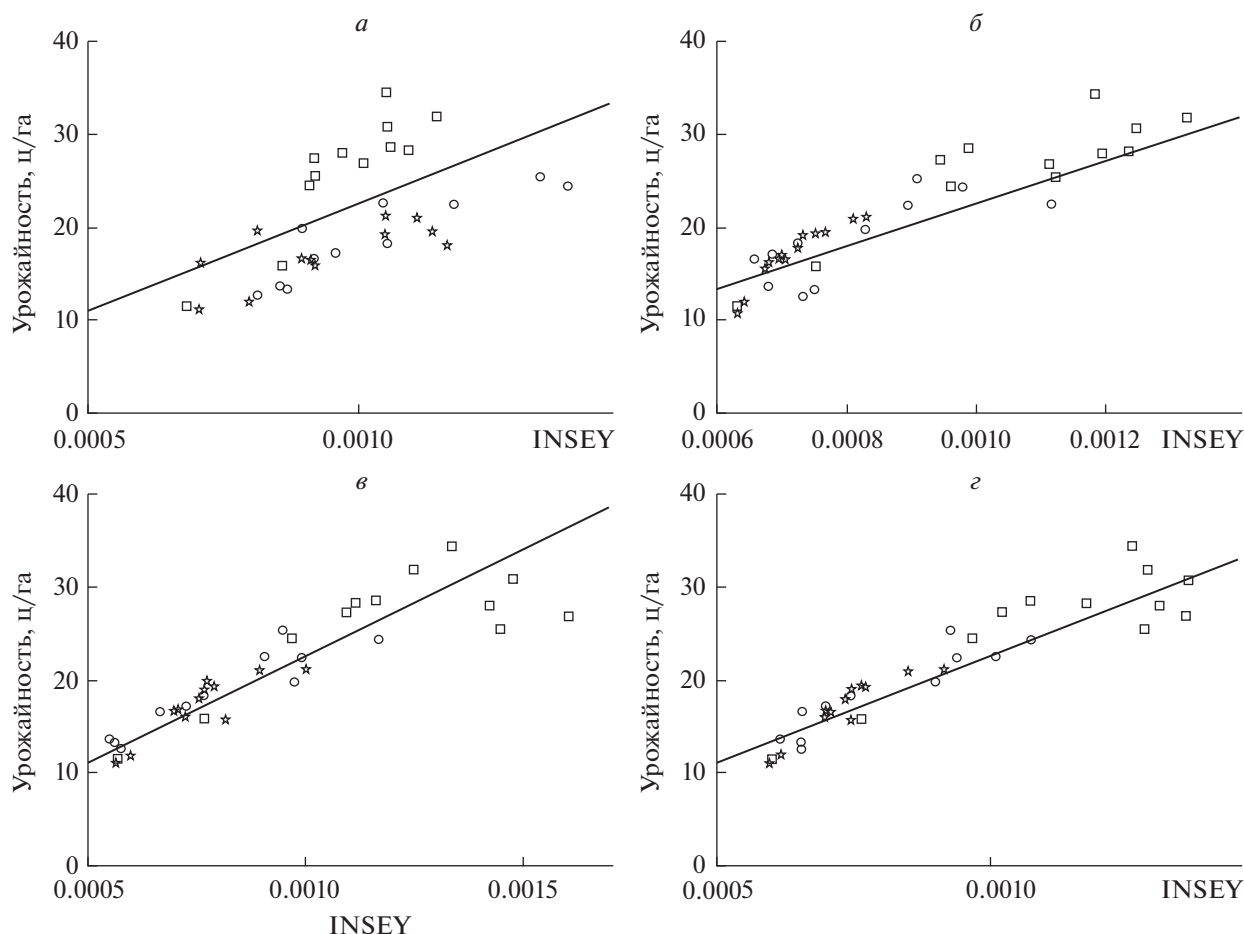


Рис. 2. Зависимость урожайности рапса озимого от значения параметра INSEY: а – BVCH = 50; б – BVCH = 60; в – BVCH = 70; г – BVCH = 80; ○ – сорт Август; ☆ – сорт Геркулес F1; □ – сорт Александр.

как по данным наземных спектрометрических измерений, так и по данным со спутников серии Sentinel-2 – по одному и по множеству участков.

Оценка точности уравнения прогноза урожайности по данным наземных спектрометрических измерений. Наилучшие результаты прогноза урожайности исследованных видов сельскохозяйственных культур получены для индекса NDRERI (табл. 3–4). Наблюдалась устойчивая взаимосвязь между его значениями и урожайностью всех сельскохозяйственных культур при всех значениях кода BVCH. Следует также отметить, что при $BVCH \geq 60$ взаимосвязь между фактическими и прогнозными значениями урожайности всех сельскохозяйственных культур близка к линейной – значение коэффициента корреляции составило более 0.75.

Для индекса NDRERI по данным наземных спектрометрических измерений средняя точность прогноза урожайности по одному участку оказалась не хуже ($BVCH \geq 60$): пшеницы озимой – 87.95%, пшеницы яровой – 88.41%, ячменя ози-

мого – 90.37%, ячменя ярового – 88.77%, рапса озимого – 87.39%, рапса ярового – 82.27% (табл. 3, 4). Для всех видов исследованных сельскохозяйственных культур наилучшим, с точки зрения достоверности прогноза (минимальные значения средней погрешности и среднеквадратического отклонения (СКО)), является прогноз урожайности в период $BVCH \approx 60-70$ – приблизительно за месяц до уборки урожая.

Оценка точности уравнения прогноза урожайности по данным со спутников серии Sentinel-2. Для оценки точности уравнения прогноза урожайности сельскохозяйственных культур также использовались прошедшие атмосферную коррекцию данные со спутников серии Sentinel-2 (спектральные каналы 542–577, 650–680 нм – пространственное разрешение 10 м и спектральный канал 697–712 нм – 20 м) за 03.07.2016 ($BVCH \geq 70$), 28.07.2017 ($BVCH \geq 80$) и 18.06.2019 ($BVCH \geq 70$). Заявленная погрешность восстановления коэффициента отражения поверхности земли не превышает: 2% (для коэффициента отражения менее

Таблица 3. Погрешность прогноза урожайности сельскохозяйственных культур по данным наземных спектрометрических измерений – по одному участку (ВВСН = 40, 50, 60)

Культура, индекс		Значение кода ВВСН											
		40				50				60			
		погрешность		СКО		погрешность		СКО		погрешность		СКО	
		ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
Пшеница озимая	NDRERI	5.96	10.20	4.83	11.93	9.37	16.87	5.69	16.63	5.55	9.35	2.99	6.04
	NDREGI	8.67	16.74	7.75	24.87	8.21	18.13	6.56	25.69	8.72	16.91	7.16	24.88
	SRRER	11.55	19.27	6.81	15.90	10.40	17.83	7.56	19.52	12.67	23.61	8.99	17.19
	SRREG	13.80	23.24	9.40	19.07	11.99	19.17	8.41	14.06	13.68	26.37	9.35	21.20
Пшеница яровая	NDRERI	11.14	21.98	5.11	10.07	9.09	16.98	6.22	11.20	4.72	9.23	2.20	4.06
	NDREGI	11.52	23.75	7.28	18.19	12.80	25.67	7.46	15.11	13.68	27.60	6.17	13.72
	SRRER	16.39	34.73	11.94	29.22	11.23	24.36	4.83	15.20	13.71	26.26	9.75	16.29
	SRREG	14.81	31.56	11.45	29.80	14.28	28.48	7.56	17.72	15.37	32.77	10.82	27.96
Ячмень озимый	NDRERI	7.36	15.60	4.16	10.67	7.06	15.51	3.83	10.79	3.83	8.28	2.61	6.12
	NDREGI	5.72	12.23	4.74	11.32	7.30	12.35	5.78	16.04	7.08	16.03	5.30	15.30
	SRRER	11.80	26.15	7.03	18.34	10.75	24.08	6.64	17.66	10.10	24.09	9.49	29.85
	SRREG	10.92	26.00	8.81	28.00	10.88	25.48	8.22	25.60	8.51	19.21	6.06	15.94
Ячмень яровой	NDRERI	9.55	18.64	4.98	7.79	5.75	13.13	2.93	8.94	5.34	11.23	3.55	8.57
	NDREGI	12.40	25.69	6.64	16.73	13.55	27.12	6.83	14.28	12.79	25.80	6.72	14.64
	SRRER	14.03	30.86	9.11	23.53	17.43	36.72	10.98	27.28	12.87	26.90	10.02	24.54
	SRREG	18.23	39.29	9.28	24.63	16.52	36.09	9.82	26.68	16.16	34.60	9.97	27.05
Рапс озимый	NDRERI	4.76	22.66	3.18	10.93	4.71	24.26	2.09	12.17	2.45	12.41	1.62	7.43
	NDREGI	5.25	27.89	3.15	20.62	4.84	26.17	3.64	24.00	5.12	27.40	3.36	22.27
	SRRER	4.74	25.92	3.23	21.50	5.32	27.87	3.78	22.35	6.79	35.84	4.32	27.96
	SRREG	6.04	33.23	4.05	31.30	6.06	32.14	3.42	22.90	6.33	34.34	4.54	30.61
Рапс яровой	NDRERI	5.16	30.17	2.53	17.28	2.01	11.66	1.08	7.01	1.97	11.55	1.19	8.39
	NDREGI	7.10	43.96	3.81	32.69	6.73	42.49	4.61	38.29	6.32	38.39	4.67	35.28
	SRRER	5.76	32.66	5.06	32.07	5.49	35.31	4.39	36.38	6.49	39.59	4.05	34.85
	SRREG	6.71	41.10	4.13	32.95	6.44	38.92	4.41	31.77	6.10	39.11	4.39	37.77

10%) и 4% (для коэффициента отражения более 40%). Участки (поля) достаточного размера для их уверенного выделения на данных со спутников серии Sentinel-2 составляли лишь небольшую часть от посевных площадей РУП “НПЦ НАН Беларуси по земледелию” и были распределены среди исследованных видов сельскохозяйственных культур не равномерно. Поэтому с учетом высокой облачности на данных со спутников серии Sentinel-2 за 03.07.2016, 28.07.2017 и 18.06.2019 было выделено: пшеницы озимой – 22 участка, пшеницы яровой – 6 участков, ячменя озимого – 2 участка, ячменя ярового – 14 участков, рапса озимого – 17 участков, рапса ярового – 10 участков. На каждом из участков урожайность определялась по результатам уборки (зерноуборочным

комбайном), после очистки и сушки (до значений показателей для хранения в зернохранилище).

Поскольку по данным наземных спектрометрических измерений наилучшие результаты прогноза урожайности исследованных видов сельскохозяйственных культур получены для индекса NDRERI, то и точность прогноза урожайности по данным со спутников серии Sentinel-2 также оценивалась для указанного индекса. Средняя точность прогноза урожайности по одному участку (индекс NDRERI) составила: пшеницы озимой – 73.28%, пшеницы яровой – 71.25%, ячменя озимого – 88.02%, ячменя ярового – 77.44%, рапса озимого – 78.43%, рапса ярового – 75.89% (табл. 5).

Оценка точности прогноза урожайности по множеству участков. Зачастую важную роль играет прогноз урожайности сельскохозяйственных

Таблица 4. Погрешность прогноза урожайности сельскохозяйственных культур по данным наземных спектрометрических измерений – по одному участку (ВВСН = 70, 80, 90)

Культура, индекс		Значение кода ВВСН											
		70				80				90			
		Погрешность		СКО		Погрешность		СКО		Погрешность		СКО	
		ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
Пшеница озимая	NDRERI	6.03	12.05	5.25	19.12	5.10	10.28	3.64	12.58	5.24	11.38	3.93	13.64
	NDREGI	8.91	17.01	7.52	24.12	10.94	21.69	7.65	22.84	15.90	32.09	9.51	25.83
	SRRER	13.13	22.04	9.91	23.27	11.97	20.68	9.20	16.57	12.69	27.04	10.50	30.51
	SRREG	15.02	24.66	9.24	16.70	13.24	23.67	7.38	14.90	15.93	47.00	8.84	25.69
Пшеница яровая	NDRERI	4.50	9.00	2.16	4.47	4.14	8.31	2.16	4.26	5.98	11.59	4.31	7.97
	NDREGI	12.76	25.69	7.40	15.81	11.52	24.06	7.23	16.57	15.67	32.55	10.08	24.19
	SRRER	17.48	36.66	8.70	21.72	14.70	28.20	7.98	13.87	11.16	20.59	6.80	9.85
	SRREG	14.72	31.69	8.45	24.25	10.77	22.05	7.43	16.68	14.60	29.47	7.33	14.98
Ячмень озимый	NDRERI	3.42	7.73	2.48	7.74	2.98	6.71	1.88	6.04	4.19	9.63	2.99	8.75
	NDREGI	7.40	16.59	5.28	15.04	7.38	16.47	5.61	15.43	12.20	28.34	8.51	27.66
	SRRER	10.61	24.38	8.52	23.62	12.31	28.12	8.64	25.65	12.27	28.17	8.41	26.49
	SRREG	10.15	22.54	7.29	20.37	10.47	23.82	7.29	20.79	14.92	33.27	8.40	23.87
Ячмень яровой	NDRERI	4.45	9.51	1.80	4.62	4.76	10.09	2.26	5.74	4.65	10.44	2.23	6.47
	NDREGI	10.84	21.86	7.26	15.83	12.14	24.06	7.01	14.98	14.68	30.24	9.46	19.35
	SRRER	17.84	38.24	9.48	23.85	15.21	32.74	9.89	24.66	17.42	33.98	10.61	19.91
	SRREG	16.83	34.99	8.09	17.91	20.29	43.15	11.22	26.45	15.81	34.88	9.82	27.17
Рапс озимый	NDRERI	2.25	10.21	1.91	6.73	1.92	9.32	1.36	5.42	2.28	12.61	1.47	7.31
	NDREGI	5.22	27.85	3.22	21.31	5.01	26.92	2.99	21.86	6.12	29.66	4.51	19.35
	SRRER	5.67	29.96	4.64	27.72	5.98	31.96	4.51	29.30	6.36	33.94	4.18	24.23
	SRREG	6.79	33.65	5.12	27.45	6.57	34.33	4.26	25.87	7.02	35.15	4.60	25.52
Рапс яровой	NDRERI	2.90	15.80	1.99	9.34	1.78	10.20	1.31	7.91	3.14	17.73	2.16	11.67
	NDREGI	6.38	41.24	4.95	41.76	6.86	42.21	4.62	38.17	5.89	36.53	4.36	37.06
	SRRER	6.19	38.26	4.35	34.27	6.48	40.72	4.61	38.78	6.64	44.45	4.75	45.19
	SRREG	6.52	43.42	5.04	45.31	6.09	37.92	4.20	35.34	7.06	43.40	4.65	35.34

Таблица 5. Погрешность прогноза урожайности сельскохозяйственных культур по данным со спутников серии Sentinel-2 – индекс NDRERI

Культура	По одному участку				По множеству участков			
	погрешность		СКО		погрешность (без учета площади участков)		погрешность (с учетом площади участков)	
	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
Пшеница озимая	10.35	26.72	7.86	29.98	2.70	5.70	1.34	3.09
Пшеница яровая	8.53	28.75	6.26	18.45	5.10	16.98	8.24	24.85
Ячмень озимый	5.60	11.98	1.10	0,435	5.60	12.04	5.37	11.94
Ячмень яровой	9.54	22.56	6.92	11.55	6.00	14.93	0.26	0.74
Рапс озимый	7.23	21.57	6.70	15.40	2.17	7.10	0.78	2.51
Рапс яровой	4.53	24.11	4.08	24.45	1.89	9.62	3.39	18.22

Таблица 6. Погрешность прогноза урожайности сельскохозяйственных культур по данным наземных спектрометрических измерений – по множеству участков

Культура	Значение кода ВВСН											
	40		50		60		70		80		90	
	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%	ц/га	%
Пшеница озимая	4.49	7.99	4.55	8.10	4.77	8.49	9.18	16.34	4.06	7.23	1.14	2.03
Пшеница яровая	0.98	1.84	2.39	4.50	0.02	0.038	1.90	3.57	0.92	1.73	0.28	0.53
Ячмень озимый	2.55	5.18	2.85	5.79	2.85	5.79	0.61	1.24	1.71	3.47	1.70	3.45
Ячмень яровой	0.41	0.80	3.64	7.09	1.59	3.10	0.96	1.87	1.24	2.42	2.28	4.44
Рапс озимый	1.92	9.24	1.27	6.11	1.29	6.21	0.07	0.34	0.69	3.32	0.58	2.79
Рапс яровой	0.10	0.53	0.14	0.74	0.11	0.58	0.19	1.01	0.16	0.85	0.17	0.90

культур не для одного участка (поля), а для множества участков области (например, для полей сельхозпредприятия). Точность прогноза урожайности сельскохозяйственных культур по множеству участков оценивалась как по данным наземных спектрометрических измерений, так и по данным со спутников серии Sentinel-2.

Фактическая урожайность сельскохозяйственных культур по множеству участков рассчитывалась следующим образом:

$$GY_{\text{факт}} = \sum_{i=1}^N GY_{\text{факт},i} / N,$$

$$GY_{\text{факт},S} = \sum_{i=1}^N GY_{\text{факт},i} S_i / \sum_{i=1}^N S_i,$$

где $GY_{\text{факт}}$, $GY_{\text{факт},S}$ – фактическая урожайность по множеству участков без учета и с учетом их площади, соответственно (ц/га); $GY_{\text{факт},i}$ – фактическая урожайность i -го участка (ц/га); S_i – площадь i -го участка (га); i – номер участка.

Прогнозируемая урожайность сельскохозяйственных культур по множеству участков рассчитывалась как:

$$GY_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^N GY_{\text{пр},i} / N,$$

$$GY_{\text{пр},S} = \sum_{i=1}^N GY_{\text{пр},i} S_i / \sum_{i=1}^N S_i,$$

где $GY_{\text{пр}}$, $GY_{\text{пр},S}$ – прогнозируемая урожайность по множеству участков без учета и с учетом их площади, соответственно (ц/га); $GY_{\text{пр},i}$ – прогнозируемая урожайность для i -го участка (ц/га).

Площадь участков, использовавшихся для оценки точности прогноза урожайности сельскохозяйственных культур по множеству участков:

– по данным наземных спектрометрических измерений – была равной. Сами участки описаны в п. “Проведение спектрометрических измерений”;

– по данным со спутников серии Sentinel-2 – находилась в диапазоне для: пшеницы озимой 0.13–15.77 га (средняя – 3.18 га), пшеницы яровой – 0.70–3.45 га (средняя – 1.86 га), ячменя озимого – 1.64–2.56 га (средняя – 2.10 га), ячменя ярового – 0.15–14.12 га (средняя – 3.08 га), рапса озимого – 0.25–25.72 га (средняя – 3.88 га), рапса ярового – 0.17–2.71 га (средняя – 1.27 га). Средний размер участка составил 2.92 га.

Точность прогноза урожайности по множеству участков по данным наземных спектрометрических измерений ($ВВСН \geq 60$) оказалась не хуже (табл. 6): для пшеницы озимой – 83.66%, пшеницы яровой – 96.43%, ячменя озимого – 94.21%, ячменя ярового – 95.56%, рапса озимого – 93.79%, рапса ярового – 98.99%. Для данных же со спутников серии Sentinel-2 точность прогноза урожайности по множеству участков составила (без учета площади участков): для пшеницы озимой – 94.30%, пшеницы яровой – 83.02%, ячменя озимого – 87.96%, ячменя ярового – 85.07%, рапса озимого – 92.90%, рапса ярового – 90.38% (табл. 5). Таким образом, точность прогноза урожайности сельскохозяйственных культур значительно повышалась при переходе от одного участка к множеству.

В целом на точность прогноза урожайности исследованных сельскохозяйственных культур повлияли следующие факторы: выход значений урожайности за пределы диапазона выборки, на которой определялись параметры уравнения, по-

годные условия в течение сельскохозяйственного сезона, неполное соответствие индекса NDRERI объему биомассы, несоответствие между пространственным разрешением данных со спутников серии Sentinel-2 и размером участков (полей) — сложности в выборе “чистых” пикселей, облачное закрытие и тени облаков и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определены параметры уравнения (использован статистический подход) прогноза урожайности сельскохозяйственных культур (пшеницы, ячменя, рапса — как озимых, так и яровых форм) для территории Республики Беларусь по данным ДЗЗ. Наилучшие результаты среди исследованных индексов получены при использовании индекса NDRERI. При этом не выявлено влияние сорта сельскохозяйственных культур на взаимосвязь урожайности и значений параметра INSEY при всех значениях кода ВВСН. Это позволило не учитывать сорт сельскохозяйственных культур при определении параметров уравнения прогноза урожайности. Кроме того, точность прогноза урожайности сельскохозяйственных культур значительно повышалась при переходе от одного участка к множеству (как по данным наземных спектрометрических измерений, так и по данным со спутников серии Sentinel-2). Увязка параметров уравнения прогноза урожайности со значением кода развития растений ВВСН позволила нивелировать влияние погодных условий на достоверность прогноза. Для всех видов исследованных сельскохозяйственных культур наилучшим, с точки зрения достоверности прогноза (минимальные значения средней погрешности и СКО), оказался период ВВСН $\approx 60-70$ — приблизительно за месяц до уборки урожая.

Таким образом, относительно простое уравнение в виде степенной функции с откалиброванными для условий Республики Беларусь параметрами позволяет получить достаточно достоверный прогноз урожайности сельскохозяйственных культур для множества участков (например, полей сельхозпредприятия). Вместе с тем, точность прогноза урожайности с использованием такого уравнения нельзя считать удовлетворительной, например, при определении дозы внесения минеральных удобрений в период вегетации, которое должно проводиться для каждого участка (поля) индивидуально. В этом случае достижение необходимой точности прогноза урожайности требует использования более сложного модельного подхода (например, применения таких широко используемых моделей как модель исследования продовольствия мира WOFOST (World Food Studies, WOFOST), или модель расчета влияния эрозии на продуктивность EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator, EPIC)).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Дринча В., Цыдендоржиев Б.* Резервы снижения потерь зерна при хранении // Комбикорма. М.: 2010. № 7. С. 59–60.
- Каленська С.М., Присяжнюк О.І., Половинчук О.Ю., Новицька Н.В.* Порівняльна характеристика шкал росту й розвитку зернових культур // Plant varieties studying and protection. Т. 14(4), 2018. С. 406–414. <https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.4.2018.151906>
- Кравцов С.Л., Голубцов Д.В., Лепесевич Е.В., Лапаник С.А., Небышинец С.С.* Разработка системы дистанционного мониторинга состояния сельскохозяйственных культур в масштабе отдельного хозяйства // Материалы Всероссийской научной конференции “Применение средств дистанционного зондирования Земли в сельском хозяйстве”. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2015. С. 95–99.
- Кравцов С.Л., Привалов Ф.И., Голубцов Д.В., Холодинский В.В., Лапаник С.А., Гвоздов А.П., Лепесевич Е.В., Симченков Д.Г.* Прогноз урожайности сельскохозяйственных культур на территории Республики Беларусь по данным дистанционного зондирования Земли // Материалы седьмого белорусского космического конгресса. 24–26 октября 2017. Т. 2. Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2017. С. 79–82.
- Кулагин Я.В.* Возможность применения микро-газотурбинных установок для мобильных зерносушилок // Инновации в сельском хозяйстве. М.: 2013. № 2(4). С. 2–9.
- Шульц П.* Баланс и использование питательных веществ из минеральных удобрений в современном сельском хозяйстве // Экономический рост Республики Беларусь: глобализация, инновационность, устойчивость: материалы XI Международной научно-практической конференции. 17 мая 2018. Минск: БГЭУ, 2018. С. 544–545.
- Aula L., Omara P., Nambi E., Oyebiyi F.B., Dhillon J.S., Eickhoff E., Carpenter J., Raun W.R.* Active optical sensor measurements and weather variables for predicting winter wheat yield // Agronomy Journal. 2021. V. 113(3). P. 2742–2751. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.20620>
- Cao X., Liu Y., Yu R., Han D., Su B.* A comparison of UAV RGB and multispectral imaging in phenotyping for stay green of wheat population // Remote Sensing. 2021. V. 13(24): 5173. 21 p. <https://doi.org/10.3390/rs13245173>
- Kumar S., Karaliya S.K., Chaudhary S.* Precision farming technologies towards enhancing productivity and sustainability of rice-wheat cropping system // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. 2017. V. 6(3). P. 142–151. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.603106>
- Zhou J., Yungbluth D., Vong C.N., Scaboo A., Zhou, J.* Estimation of the maturity date of soybean breeding lines using UAV-based multispectral imagery // Remote Sensing. 2019. V. 11(18): 2075. 17 p. <https://doi.org/10.3390/rs11182075>

Determination of the Equation Parameters in the Form of a Power Function for Forecasting the Yield of Agricultural Crops in Belarus with Use of Earth Remote Sensing Data

S. L. Krautsou¹, F. I. Privalov², S. A. Pushkina¹, V. V. Kholodinsky², K. V. Lepiasevich¹,
D. V. Golubtsov¹, A. P. Gvozdo², and D. G. Simchenkov²

¹The State Scientific Institution “The United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus”, Minsk, Belarus

²Republican unitary enterprise “Research and Practical Center of National Academy of Sciences of the Republic of Belarus for Arable Farming”, Zhodino, Belarus

The parameters of the equation for forecasting the yield of agricultural crops (wheat, barley, rape – both winter and spring) are determined according to the Earth’s remote sensing data for the territory of the Republic of Belarus. As an equation for forecasting the yield, a power function is considered that uses the value of the vegetation index as one of the input values. The equation parameters are determined (using a statistical approach) without taking into account the variety of agricultural crops for fixed values of the plant phenological development stages and are focused to the spectral channels of the Sentinel-2 series satellites. The normalized vegetation index, using the spectral channels of the red edge and red spectral bands, turned out to be the best. When using this vegetation index a stable interrelation between the values of the index and the yield of all types of crops for all values of the plant phenological development stages was observed. Accuracy of the crops yield forecast equations was estimated both according to ground-based measurements and to atmospheric corrected data from Sentinel-2 series satellites: by one and multiple sites. The average accuracy of the crops yield forecast was considerably higher when many sites are considered.

Keywords: forecast, yield, crop, parameters, equations, accuracy, data of remote sensing of Earth

REFERENCES

- Aula L., Omara P., Nambi E., Oyebiyi F.B., Dhillon J.S., Eickhoff E., Carpenter J., Raun W.R. Active optical sensor measurements and weather variables for predicting winter wheat yield // *Agronomy J.* 2021. V. 113(3). P. 2742–2751. <https://doi.org/10.1002/AGJ2.20620>
- Cao X., Liu Y., Yu R., Han D., Su B. A comparison of UAV RGB and multispectral imaging in phenotyping for stay green of wheat population // *Remote Sensing.* 2021. V. 13(24). 21 p. <https://doi.org/10.3390/rs13245173>.
- Drincha V., Tsyndendorzhiev B. Rezervy snizheniya poter' zerna pri khranении. *Kombikorma*, Moscow, 2010. № 7. P. 59–60. (In Russian).
- Kalens'ka S.M., Prisyazhnyuk O.I., Polovinchuk O.YU., Novic'ka N.V. Porivnyal'na harakteristika shkal rostu j rozvitku zernovih kul'tur. Plant varieties studying and protection. T. 14(4). 2018. P. 406–414. (In Ukraine). <https://doi.org/10.21498/2518-1017.14.4.2018.151906>
- Kravtsov S.L., Golubtsov D.V., Lepesevich E.V., Lapanik S.A., Nebyshinets S.S. Razrabotka sistemy distantsionnogo monitoringa sostoyaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur v masshtabe otdel'nogo khozyaistva. Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii “Primenenie sredstv distantsionnogo zondirovaniya Zemli v sel'skom khozyaistve”. SPb.: FGB-NU AFI, 2015. P. 95–99. (In Russian).
- Kravcov S.L., Privalov F.I., Golubcov D.V., Kholodinskij V.V., Lapanik S.A., Gvozdo A.P., Lepesevich E.V., Simchenkov D.G. Prognoz urozhajnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur na territorii Respubliki Belarus' po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli // Materialy sed'mogo belorusskogo kosmicheskogo kongressa. V. 2. 24–26 October 2017. Minsk: OIPI NAN Belarusi, P. 79–82. (In Russian).
- Kulagin YA.V. Vozmozhnost' primeneniya mikro-gazoturbinykh ustanovok dlya mobil'nykh zernosushilok // *Innovacii v sel'skom hozyajstve*. Moscow: 2013. № 2(4). P. 2–9.
- Kumar S., Karaliya S.K., Chaudhary S. Precision farming technologies towards enhancing productivity and sustainability of rice-wheat cropping system // *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences.* 2017. V. 6(3). P. 142–151. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2017.603.016>.
- SHul'c P. Balans i ispol'zovanie pitatel'nykh veshchestv iz mineral'nykh udobrenij v sovremennom sel'skom hozyajstve // *Ekonomicheskij rost Respubliki Belarus': globalizaciya, innovacionnost', ustojchivost'*: materialy XI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferentsii. 17 May 2018. Minsk: BGEU, 2018. P. 544–545.
- Zhou J., Yungbluth D., Vong C.N., Scaboo A., Zhou, J. Estimation of the maturity date of soybean breeding lines using UAV-based multispectral imagery // *Remote Sensing.* 2019. V. 11(18). 17 p. <https://doi.org/10.3390/rs11182075>.