



Возможность оценки степени развития растений озимой пшеницы в период «всходы – кущение» по данным дистанционного зондирования Земли

И. Г. Сторчак*, Ф. В. Ерошенко, Л. Р. Оганян,
Е. О. Шестакова, А. А. Калашникова
ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный
центр» (г. Михайловск, Российская Федерация)
*sniih.storchak@gmail.com

Введение. Важность контроля этапов органогенеза заключается в том, что появляется возможность воздействовать на растения посредством уходовых мероприятий для создания благоприятных условий в периоды формирования определенных элементов структуры урожая и влиять на качество зерна. Цель работы – установить связь данных дистанционного зондирования Земли с состоянием растений озимой пшеницы в начальный период их роста и развития.

Материалы и методы. Объектом исследований стали посевы озимой пшеницы. На опытном поле поделаячно высевали пшеницу следующих сортов: «Одиссея», «Олимп», «Нива Ставрополя», «Виктория 11», «Настя» и «Фируза 40». На производственных посевах озимой пшеницы проводились исследования по оценке состояния растений в фазу кушения в 2012–2013, 2013–2014 и 2015–2016 сельскохозяйственных годах. Данные дистанционного зондирования Земли получены с помощью сервиса «ВЕГА» ФГБУН «ИКИ РАН».

Результаты исследования. Полученная функция зависимости NDVI посевов озимой пшеницы от высоты растений и соответствующей фазы их развития представляет собой полином третьей степени и характеризуется высокой точностью ($R_{\text{corr}} = 0,98$). Анализ данных NDVI, RED и NIR полей в даты, близкие к датам проведения отборов растительных образцов, показал достаточно высокий уровень сопряжения между вегетационным индексом NDVI и высотой растений озимой пшеницы. В 2013 г. был получен коэффициент корреляции 0,60, в 2014 – 0,66, а в 2016 – 0,80, в среднем за 2013–2016 гг. – 0,85.

Обсуждение и заключение. Исследования показали, что для оценки состояния и степени развития посевов озимой пшеницы в период «всходы – кущение», в том числе в производственных условиях, могут быть использованы данные дистанционного зондирования Земли. Для повышения точности такой оценки лучше применять значения спектральной яркости в инфракрасной области спектра.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, нормализованный разностный вегетационный индекс, коэффициент спектральной яркости, озимая пшеница, этапы органогенеза

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Возможность оценки степени развития растений озимой пшеницы в период «всходы – кущение» по данным дистанционного зондирования Земли / И. Г. Сторчак, Ф. В. Ерошенко, Л. Р. Оганян [и др.]. – DOI 10.15507/2658-4123.031.202101.021-036 // Инженерные технологии и системы. – 2021. – Т. 31, № 1. – С. 21–36.

© Сторчак И. Г., Ерошенко Ф. В., Оганян Л. Р., Шестакова Е. О., Калашникова А. А., 2021



Assessment of Winter Wheat Plant Development during the Seeding and Tillering Stages According to the Earth Remote Sensing Data

I. G. Storchak*, F. V. Eroshenko, L. R. Oganyan,

E. O. Shestakova, A. A. Kalashnikova

North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (Mikhailovsk, Russian Federation)

*sniish.storchak@gmail.com

Introduction. The importance of controlling the organogenesis stages is that it provides the opportunity to create favorable conditions during the development of certain elements of the yield structure by caring crops and influence the grain quality. The objective of the work is to define a connection between the Earth remote sensing data and the state of winter wheat plants in the initial period of their growth and development.

Materials and Methods. The object of the study was the winter wheat plantings. The wheat varieties “Odiseya”, “Olympus”, “Niva Stavropolya”, “Victoria 11”, “Nastya” and “Firuza 40” were sown by plot in the experimental field. The industrial crops of winter wheat were studied to assess the state of the plants in the tillering stage in 2012–2013, 2013–2014 and 2015–2016 agricultural years. The Earth remote sensing data were obtained using the “VEGA” service of FBSI “Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences”.

Results. The obtained function of the dependence of NDVI of winter wheat crops on the height and development stage of plants is a polynomial of the third degree and is characterized by high accuracy ($R_{\text{corr}} = 0.98$). The analysis of the NDVI, RED and NIR data of fields on dates close to the dates of collecting plant samples showed a considerable degree of relationship between the vegetation index NDVI and height of winter wheat plants. In 2013, the correlation coefficient was 0.60, in 2014 – 0.66, in 2016 – 0.80, and in 2013–2016 on average about 0.85.

Discussion and Conclusion. The studies have shown that the Earth remote sensing data can be used to assess the state and degree of the development of winter wheat crops during the seeding and tillering stages, including in the production conditions. To improve the accuracy of the assessment, it is better to use the spectral brightness values in the infrared region of the spectrum.

Keywords: remote sensing data, normalized difference vegetation index, spectral brightness ratio, winter wheat, stages of organogenesis

Conflict of interest: The authors declare no conflict of interest.

For citation: Storchak I.G., Eroshenko F.V., Oganyan L. R., et al. Assessment of Winter Wheat Plant Development during the Seeding and Tillering Stages According to the Earth Remote Sensing Data. *Inzhenernyye tekhnologii i sistemy* = Engineering Technologies and Systems. 2021; 31(1):21-36. DOI: <https://doi.org/10.15507/2658-4123.031.202101.021-036>

Введение

Очень важное значение для формирования будущего урожая имеет контроль состояния посевов и степени развития растений в самый начальный период роста озимой пшеницы [1]. Это позволяет эффективно планировать уходные мероприятия (боронование, ремонт посевов, при необходимости их пересев и т. д.),

вносить коррективы в рекомендации по ранневесенней азотной подкормке (дозы, сроки и очередность применения), а также оценивать потенциальные возможности посевов по формированию урожая и качества зерна [2–5].

Оценка состояния посевов и развития растений должна быть максимальной объективной и оперативной. Такими

свойствами характеризуются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса [6; 7]. К сожалению, исследования по выявлению связи ДЗЗ с оценочными характеристиками роста и развития растений озимой пшеницы в литературе практически отсутствуют.

Обзор литературы

Из литературных источников известно, что в течение вегетации растения озимой пшеницы проходят следующие основные фазы роста и развития: всходы, кущение, выход в трубку, колошение, цветение и созревание [8; 9]. Фенологические наблюдения фиксируют лишь фазовые изменения в жизни растений, которые не раскрывают всю сложность процессов образования органов в онтогенезе [10; 11].

Органогенез – процесс формирования органов растения в их эмбриональном зачаточном состоянии (происходит дифференцирование клеток). Органы растений в процессе своего развития проходят несколько этапов органогенеза. Например, у озимой пшеницы, по Ф. М. Куперман, их 12¹. Важность контроля этапов органогенеза заключается в том, что появляется возможность воздействовать на растения посредством уходовых мероприятий для создания благоприятных условий в периоды формирования определенных элементов структуры урожая (продуктивный стеблестой, озерненность колоса и колосков, масса 1 000 зерен и т. д.), а также на формирование качества зерна (содержание элементов минерального питания в органах растений, их утилизация, аттракция и т. д.).

Существует соответствие между этапами органогенеза и фазами развития растений. Поэтому применение тех или иных технологических приемов выращивания в определенные фазы развития растений позволяет управлять

ходом формирования урожая и качеством зерна озимой пшеницы [12; 13].

Необходимо разработать методы, позволяющие давать объективную оценку степени развития посевов не только отдельного поля, но и сельхозпредприятия в целом. Такие методы могут быть разработаны на основе данных ДЗЗ, которые в последнее время стали широко использоваться в сельском хозяйстве [14–16].

Системы спутникового мониторинга активно применяются для контроля состояния растительности сельскохозяйственных посевов в течение вегетации. Главными преимуществами такого наблюдения являются оперативность (получение снимков возможно несколько раз в сутки), полимасштабность (информация как о небольших объектах (поле), так и о более крупных (край или область)), объективность (космоснимки показывают действительное состояние исследуемых объектов), экономичность (минимальные финансовые затраты) [17; 18]. Поэтому необходимо использовать специализированные сервисы пространственного разрешения, содержащие данные различного типа, и иметь многолетние архивы наблюдений. Одним из таких сервисов является «ВЕГА-Science», созданный в Институте космических исследований Российской академии наук [19].

Цель работы – установить связь данных ДЗЗ с состоянием растений озимой пшеницы в начальный период их роста и развития.

Материалы и методы

Объектом исследований были посевы озимой пшеницы. На опытном поле поделяночно высевали пшеницу следующих сортов: «Одиссея», «Олимп», «Нива Ставрополя», «Виктория 11», «Настя» и «Фируза 40». Предшественники: 1) пар; 2) озимая пшеница. Фоны

¹ Куперман Ф. М. Биологические основы культуры пшеницы: в 3-х ч. Ч. 2. М., 1953. 300 с.

минерального питания: контроль (без удобрений); 2) удобренный фон (НРК по 60 кг/га по д.в. при посеве и ранневесенняя азотная подкормка 30 кг/га по д.в.). Повторность трехкратная. Площадь одной делянки 25 м². Кроме того, в 2013, 2014 и 2016 годах в ЗАО «СХП “Родина”» (Шпаковский р-н, Ставропольский край) на производственных посевах озимой пшеницы (рис. 1) в рамках НИОКР по научному обеспечению производства зерна озимой пшеницы проводились исследования по оценке состояния растений в фазу кущения.

На рост и развитие большое влияние оказывают условия выращивания: почвенно-климатические и технологические. Вторые включают в себя: предшественника, сорт, фон минерального питания, сроки и нормы посева. Растения являются индикатором условий выращивания, поэтому, в зависимости от технологических приемов, наблюдается различная степень их роста и развития на определенных этапах органогенеза. Все это оказывает влияние на оптико-биологические свойства посевов и, как следствие, на данные дистанционного зондирования.

Погодные условия осеннего периода 2012–2013 сельскохозяйственного года были неблагоприятными для сева и появления всходов озимой пшеницы. Температура воздуха сентября была выше климатической нормы на 12,5 %, осадков при этом выпало всего 11 мм (норма 49 мм). Температурный режим октября был превышен на 4,6 °С при значительном недоборе осадков (85 %). Выпавшие осадки в первой декаде ноября и повышенные температуры всего месяца способствовали хорошему развитию посевов. Недобор осадков в зимний период составил 43 %, а температура воздуха была на 1,5 °С выше климатической нормы. Возобновление весенней вегетации началось в среднем на 15 дней раньше среднелетних

значений. В марте температура воздуха была выше климатической нормы на 2,2 °С, осадков выпало 53 мм. В апреле при повышенном температурном режиме наблюдался недобор осадков. В мае температура воздуха была выше климатической нормы на 3,3 °С с дефицитом осадков 7,6 %. В июне температура воздуха была в пределах нормы, за месяц выпало 134 мм осадков.

Агроклиматические условия осени и зимы 2013–2014 сельскохозяйственного года сложились в целом благоприятно для роста и развития растений озимой пшеницы. Возобновление весенней вегетации началось на 14 дней раньше обычного срока. Температура воздуха в марте превышала значения климатической нормы на 2 °С, суммарное количество выпавших осадков за месяц составило 39 мм. Среднемесячная температура апреля была равна 9,3 °С, осадков выпало 61 мм. Температура воздуха в мае была выше среднелетних значений на 2 °С, осадков выпало 135 мм. Поэтому сложившиеся погодные условия не оказали отрицательного воздействия на формирование урожая озимой пшеницы. Достаточное количество выпавших осадков в весенний период компенсировало их нехватку в июне, тем более что температура воздуха была близка к климатической норме. Сложившиеся условия положительно отразились на формировании урожая зерна.

Теплообеспеченность растений озимой пшеницы в 2015 году в период сева и осенней вегетации была выше климатической нормы на 1,9–3,5 °С. Температура воздуха в феврале и марте 2016 года превышала среднелетнюю на 5,8 и 2,5 °С. В августе, сентябре и октябре 2015 года отмечалась засуха. Выпавшие осадки в ноябре превышали климатическую норму на 12 мм, в декабре – на 53 мм, в январе – на 22 мм, что привело к улучшению влагообеспеченности посевов.



Р и с. 1. Поля, занятые под посевы озимой пшеницы в ЗАО «СХП «Родина»

F i g. 1. Fields for winter wheat plantings in the Rodina Agricultural Company

Поэтому климатические условия весеннего периода в 2016 году были в целом благоприятными для роста и развития растений озимой пшеницы.

Вегетационный индекс Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) на опытных делянках определяли с помощью ручного прибора GreenSeeker (Trimble, США). Измерения проводили каждые 2-3 дня (не менее четырех замеров на каждой повторности). Одновременно с этим определяли высоту побегов и кустистость растений. По полученным данным была построена зависимость, где y – NDVI, x – высота растений.

Данные ДЗЗ (NDVI, NIR и RED) в период осенне-весеннего кушения посевов ЗАО «СХП «Родина»» получали с помощью сервиса «ВЕГА» ФГБУН «ИКИ РАН». В этот период на посевах отбирали образцы и определяли высоту растений и их кустистость по методике государственного сортоиспытания сельскохозяйственных культур (1989).

Результаты исследования

Спутниковый сервис «ВЕГА» позволяет использовать информацию, полученную с общедоступных данных дистанционного зондирования [20]. Значения нормализованного разностного вегетационного индекса NDVI сельскохозяйственных культур получены по данным спутника «Терра» (MODIS) [21].

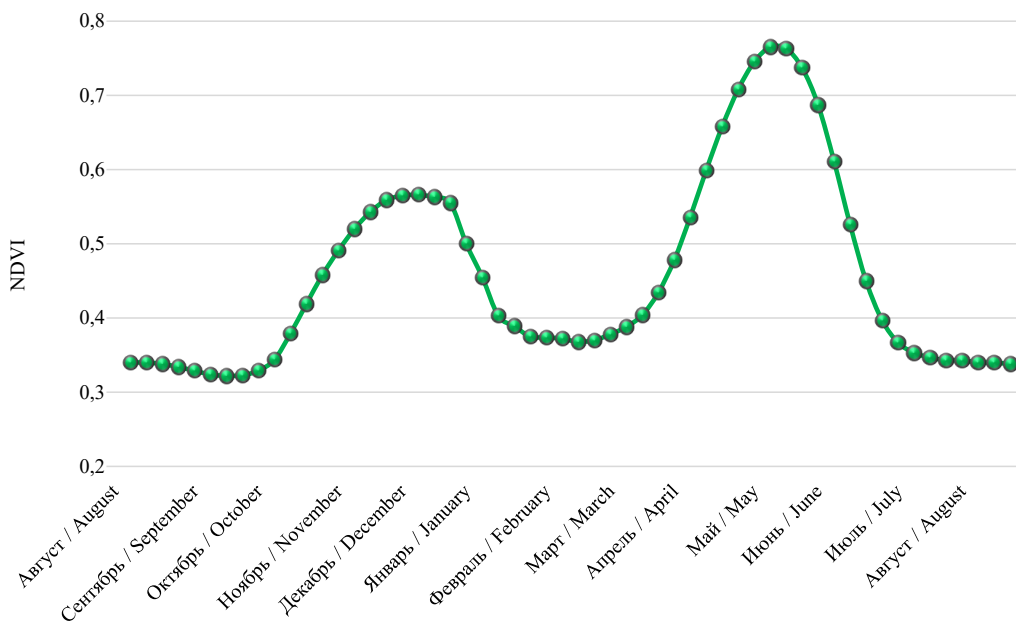
Динамика вегетационного индекса NDVI посевов озимой пшеницы в Ставропольском крае представляет собой кривую с двумя максимумами (рис. 2). Наличие первого максимума, который наблюдается перед уходом в зиму, объясняется нарастанием биомассы в период осеннего кушения. Далее, в зимний период растения под действием отрицательных температур частично теряют листовую аппарат, что ведет к снижению NDVI. С возобновлением весенней вегетации отмечается рост биомассы и, как следствие, веге-

тационного индекса NDVI, который продолжается вплоть до начала фазы колошения. Далее, наблюдается уменьшение значения NDVI, главным образом за счет уменьшения количества хлорофилла в растениях.

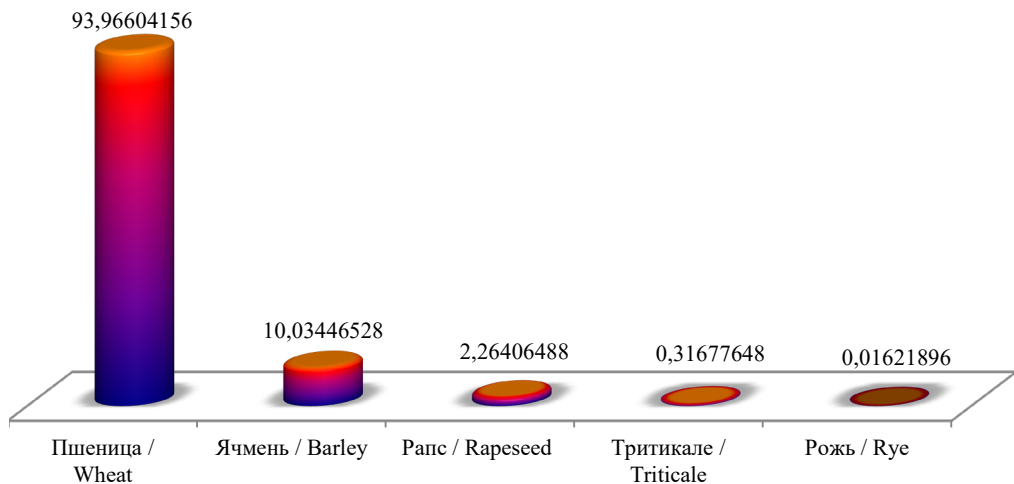
На рисунке 2 представлены усредненные значения вегетационного индекса NDVI озимых культур в Ставропольском крае. Их мы применили для озимой пшеницы. Правильность такого подхода объясняется тем, что более 90 % посевных площадей в крае занимают посевы озимой пшеницы, около 10 % – ячменя, который по биологическим особенностям схож с пшеницей (рис. 3).

Была изучена связь значений NDVI со степенью развития растений озимой пшеницы в начальный период ее роста и развития. Для этого с помощью ручного сканера в осенний период определяли NDVI посевов опытных делянок и сравнивали их с биометрическими показателями. Исследования показали, что в начальный период роста растений озимой пшеницы (шильца), когда их высота увеличивается от 0 до 5 см, наблюдается рост NDVI, который обусловлен выходом из почвы побегов, их утолщением и появлением первых листьев (рис. 4).

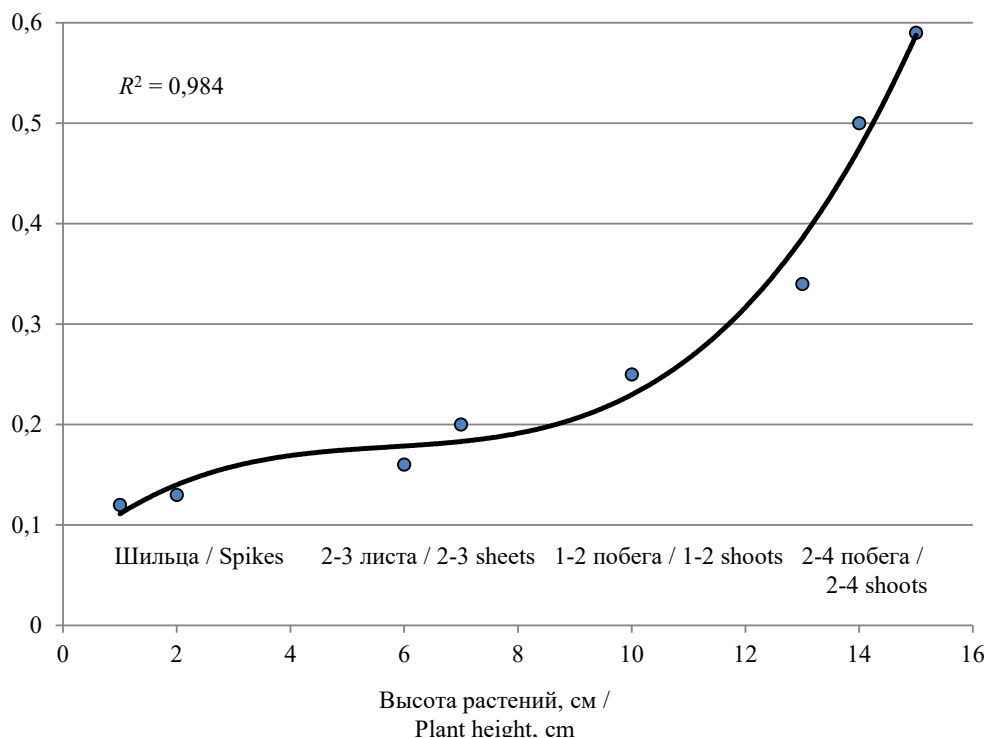
Далее рост вегетационного индекса замедляется. При этом развитие растений соответствует фазе 2-3 листьев, а их высота варьируется в довольно широких пределах 5–10 см. Такое поведение динамики NDVI объясняется тем, что в этот период основные изменения в растениях связаны с увеличением высоты побега, в то же время проективное покрытие почвы посевом почти не изменяется. С началом осеннего кушения (10–12 см) наблюдается резкий рост вегетационного индекса, который обусловлен увеличением площади покрытия почвы за счет появления новых побегов.



Р и с. 2. Динамика вегетационного индекса NDVI озимых в Ставропольском крае, 2001–2020 гг.
 F i g. 2. Dynamics of the NDVI vegetation index for winter crops in the Stavropol Krai, 2001–2020 years



Р и с. 3. Структура посевных площадей озимых культур в Ставропольском крае, 2019 г.
 F i g. 3. The structure of the areas under winter crops in the Stavropol Krai, 2019 year



Р и с. 4. Зависимость NDVI посева от степени его развития в осенний и ранневесенний периоды
 F i g. 4. Dependence of NDVI of sowing on the degree of its development in the autumn and early spring periods

Полученная функция зависимости NDVI посевов озимой пшеницы от высоты растений и соответствующей фазы их развития представляет собой полином третьей степени и характеризуется довольно высокой точностью (коэффициент корреляции равен 0,98, коэффициент аппроксимации – 0,91).

Таким образом, результаты наших исследований позволяют сделать вывод о том, что вегетационный индекс NDVI может быть использован при разработке способа оценки физиологического состояния посевов озимой пшеницы в начальный период роста и развития.

Чтобы проверить возможность использования данных дистанционного зондирования для оценки состояния растений в производственных усло-

виях, были проанализированы результаты исследований, полученные при изучении полей в осенне-весенний период в ЗАО «СХП «Родина» Шпаковского района, расположенного в зоне неустойчивого увлажнения Ставропольского края. Они были проведены в рамках выполнения хозяйственных работ по научному обеспечению производства зерна озимой пшеницы (2013, 2014 и 2016 годов). Нами была выполнена оцифровка всех полей с озимой пшеницей в каждый год исследований. С помощью сервиса «ВЕГА» ФГБУН «ИКИ РАН» были получены данные ДЗЗ соответствующих полей и в даты, близкие к датам проведения отборов растительных образцов (NDVI, RED и NIR).

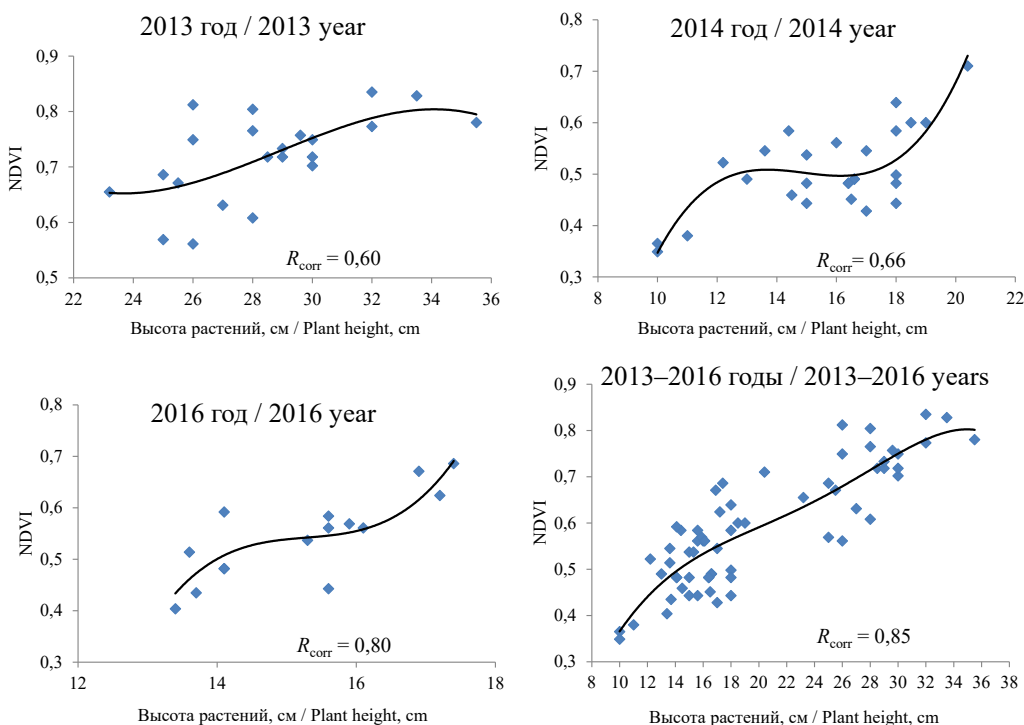
Анализ полученных данных показал достаточно высокий уровень сопряжения между вегетационным индексом NDVI и высотой растений озимой пшеницы (рис. 5).

Так, в 2013 году был получен коэффициент корреляции, значимый для $p = 0,05$ (0,60), в 2014 – для $p = 0,05$ (0,66), а в 2016 – для $p = 0,01$ (0,80). Более высокий коэффициент корреляции 0,85 между значениями NDVI и высотой растений в начальный период роста и развития был получен при анализе усредненных данных за 3 года.

Несколько разный характер зависимости NDVI от высоты растений по годам объясняется влиянием погодных условий, складывающихся как перед посевами озимой пшеницы, так и в период начального роста и развития.

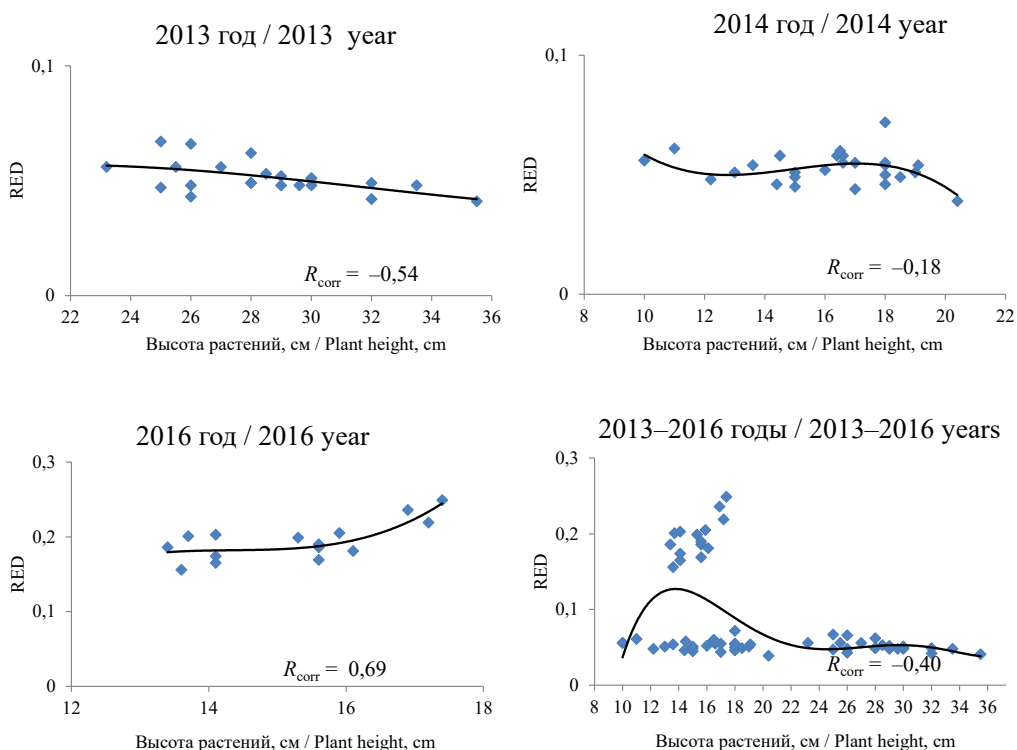
Полученные нами зависимости схожи с теми, которые были вычислены для опытных делянок с использованием ручного сканера GreenSeeker. Следовательно, вегетационный индекс NDVI может быть использован для оценки высоты растений озимой пшеницы в период «всходы – кущение».

Также была проанализирована связь высоты растений с NIR и RED (коэффициентами спектральной яркости в инфракрасной и в красной областях спектра электромагнитных волн). Так как RED напрямую связан с максимумом поглощения хлорофилла, а у растений нет прямой зависимости их высоты от количества зеленых пигментов, то ожидается не получена взаимосвязь между степенью развития и спектральной яркостью в красной области посевов (рис. 6).



Р и с. 5. Зависимость NDVI посевов от высоты растений озимой пшеницы. ЗАО «СХП “Родина”»

F i g. 5. Dependence of NDVI of crops on the height of winter wheat plants. Rodina Agricultural Company



Р и с. 6. Зависимость RED посевов от высоты растений озимой пшеницы. ЗАО «СХП «Родина»»
 F i g. 6. Dependence of RED of crops on the height of winter wheat plants. Rodina Agricultural Company

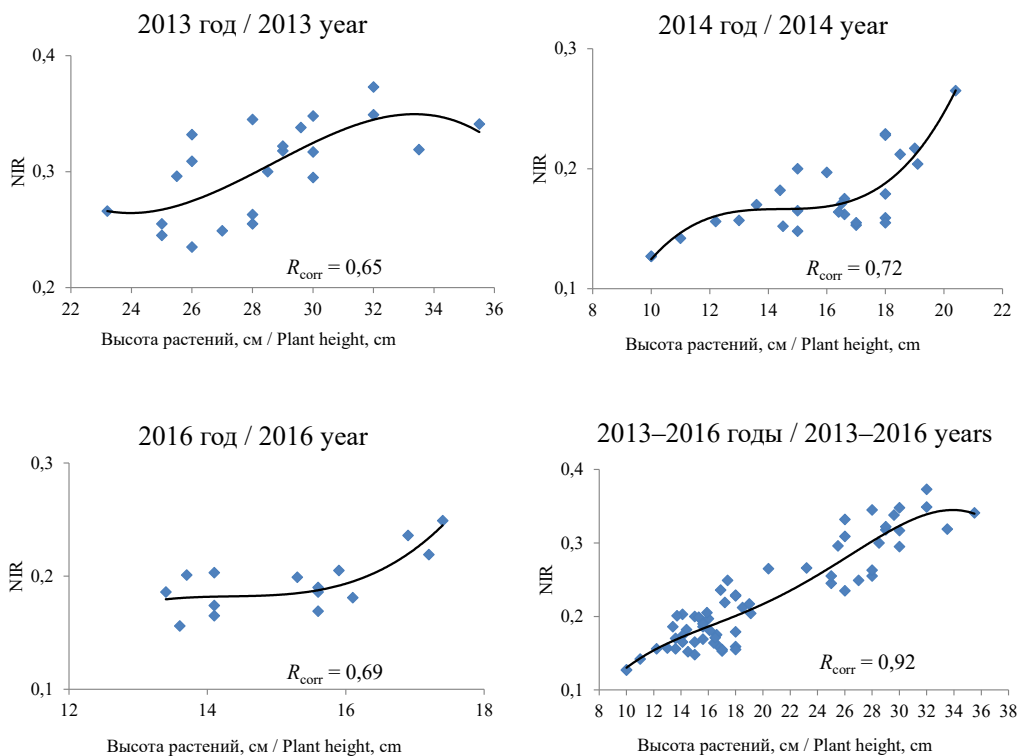
Степень развития посевов, особенно в начальный период роста озимой пшеницы, напрямую связана с биомассой и, как следствие, с площадью ассимиляционной поверхности и с высотой растений. Поэтому чем лучше развит посев, тем большую отражающую площадь растений он имеет. Как следствие, при использовании в наших анализах данных NIR были получены наилучшие результаты по взаимосвязи высоты растений озимой пшеницы с данными ДЗЗ (рис. 7).

Нами также был рассчитан коэффициент корреляции между высотой растений и их кустистостью. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени сопряжения между характе-

ристиками развития растений озимой пшеницы – коэффициент корреляции составляет 0,72 (табл. 1).

Обсуждение и заключение

Анализ полученных данных показал достаточно высокий уровень сопряжения между вегетационным индексом NDVI и высотой растений озимой пшеницы: в 2013 г. коэффициент корреляции был равен 0,60 (значимый для $p = 0,05$), в 2014 г. – 0,66 (значимый для $p = 0,05$), а в 2016 г. – 0,80 (значимый для $p = 0,01$). Наиболее тесная связь между этими показателями в начальный период роста и развития растений получена при анализе объединенных данных за 2013–2016 гг., когда коэффициент корреляции составил 0,85.



Р и с. 7. Зависимость NIR посевов от высоты растений озимой пшеницы. ЗАО «СХП «Родина»
 F i g. 7. Dependence of NIR of crops on the height of winter wheat plants. Rodina Agricultural Company

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

**Связь высоты растений озимой пшеницы с коэффициентом кущения в период
 «всходы – кущение»**

**Relationship between the height of winter wheat plants and the tillering coefficient during the
 seeding and tillering stages**

Коэффициент кущения / Tillering coefficient	1,0–1,5	1,5–2,0	2,0–2,5	2,5–3,0	3,0–3,5	3,5–4,0	4,0–5,0
Высота растения, см / Plant height, cm	5–10	10–13	13–16	16–20	20–25	25–30	>30
Коэффициент корреляции / Correlation coefficient	0,72						

При анализе связи высоты растений и коэффициентов спектральной яркости в красной области спектра электромагнитных волн (RED) коэффициенты корре-

ляции составили значения $-0,54$ в 2013 г., $-0,18$ в 2014 г. и $0,69$ в 2016 г., по объединенным данным за период 2013–2016 гг. – минус $0,40$. Это объясняется тем, что RED

напрямую связан с максимумом поглощения хлорофилла, а у растений нет прямой зависимости их высоты от количества зеленых пигментов.

Проанализировав коэффициенты корреляции между спектральной яркостью в инфракрасной области спектра электромагнитных волн (NIR) и высотой растений озимой пшеницы, мы получили наилучшие результаты: коэффициент корреляции равнялся 0,65 в 2013 г., 0,72 в 2014 г., 0,69 в 2016 г. По данным за все годы исследований коэффициент корреляции составил 0,92.

При расчете коэффициента корреляции между высотой растений и кусти-

стостью нами были получены результаты, которые свидетельствуют о высокой степени сопряжения между этими характеристиками степени развития растений озимой пшеницы, коэффициент корреляции составляет 0,72.

Таким образом, наши исследования показали, что для оценки состояния и степени развития посевов озимой пшеницы в период «всходы – кущение», в том числе в производственных условиях, могут быть использованы данные ДЗЗ. Для повышения точности такой оценки лучше применять значения спектральной яркости в инфракрасной области спектра.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Влияние сорта, предшественника, уровня минерального питания, сроков и норм высева на относительное содержание хлорофилла в растениях озимой пшеницы / Е. О. Шестакова, Л. Р. Оганян, И. В. Чернова, Е. А. Бильдиева. – DOI 10.25930/2218-855X/122.3.12.2019 // Новости науки в АПК. – 2019. – № 3 (12). – С. 487–490. – URL: <http://dois.fnac.center/2218-855X/3.12.2019/122.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

2. **Чернова, И. В.** Оценка качества зерна озимой пшеницы в Ставропольском крае по данным дистанционного зондирования Земли / И. В. Чернова, Е. О. Шестакова, Е. А. Бильдиева. – DOI 10.25930/2218-855X/121.3.12.2019 // Новости науки в АПК. – 2019. – № 3 (12). – С. 482–486. – URL: <http://dois.fnac.center/2218-855X/3.12.2019/121.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

3. **Менькина, Е. А.** Влияние предшественников и удобрений на урожайность озимой пшеницы, возделываемой по технологии No-till на обыкновенном черноземе Ставропольского края / Е. А. Менькина, Н. Н. Шаповалова, А. А. Ворopaева. – DOI 10.25930/n5cv-wa92 // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – 2018. – № 3 (71). – С. 55–59. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35173225> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

4. **Артемьев, А. А.** Эффективность возделывания озимой пшеницы при дифференцированном использовании минеральных удобрений / А. А. Артемьев, А. М. Гурьянов. – DOI 10.24411/0235-2451-2020-10405 // Достижения науки и техники АПК. – 2020. – Т. 34, № 4. – С. 26–31. – URL: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10405> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

5. **Гостев, А. В.** Условия формирования зерна высокого качества в высокопродуктивных ресурсосберегающих агротехнологиях ЦЧР / А. В. Гостев. – DOI 10.24411/0044-3913-2019-10604 // Земледелие. – 2019. – № 6. – С. 16–20. – URL: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10604> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

6. Selecting the Optimal NDVI Time-Series Reconstruction Technique for Crop Phenology Detection / W. Wei, W. Wu, Zh. Li [et al.]. – DOI 10.1080/10798587.2015.1095482 // Intelligent Automation & Soft Computing. – 2016. – Vol. 22, Issue 2. – Pp. 237–247. – URL: <http://agri.ckcest.cn/ass/NK005-20161128004.pdf> (дата обращения: 22.01.2021).

7. Мониторинг состояния растительного покрова территории центрального Ирака с использованием спутниковых данных Landsat-8 / О. С. Токарева, О. А. Пасько, С. М. Маджид, П. Кабраль. – DOI 10.18799/24131830/2020/6/2671 // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 6. – С. 19–31. – URL: <http://izvestiya.tpu.ru/archive/article/view/2671> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

8. **Подлесных, Н. В.** Особенности прохождения этапов органогенеза, фаз роста и развития, урожайности и качество озимой твердой и мягкой пшеницы в условиях лесостепи Воронежской области / Н. В. Подлесных // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. – 2015. – № 3 (46). – С. 12–22. – URL: <http://vestnik.vsau.ru/wp-content/uploads/2015/10/12-22.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

9. **Ториков, В. Е.** Фотосинтетический потенциал посевов и накопление сухой биомассы озимой пшеницы в зависимости от сроков посева и уровня минерального питания / В. Е. Ториков, И. Н. Романова, Н. В. Птицына // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 3. – С. 8–12. – URL: <https://clck.ru/SvQ7m> (дата обращения: 22.01.2021).

10. **Савиченко, Д. Л.** Изучение потенциальной и реализованной продуктивности главного колоса коллекционных образцов озимой пшеницы, обладающих признаком «многоцветковость» / Д. Л. Савиченко, Л. В. Цаценко, Н. Н. Нецадим. – DOI 10.25637/TVAN.2018.03.11. // Таврический вестник аграрной науки. – 2018. – № 3 (15). – С. 99–108. – URL: http://tvan.niishk.ru/data/documents/11_2.pdf (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

11. **Бондаренко, Е. В.** Фенологические наблюдения за растениями озимой пшеницы при реализации технологий координатного земледелия / Е. В. Бондаренко, М. А. Белик // АгроФорум. – 2019. – № 8. – С. 107–111. – URL: <https://clck.ru/SvQjd> (дата обращения: 22.01.2021).

12. Using Physiologically Active Substances into the Technology for Winter Wheat Cultivation in the Zone of Unstable Moistening of the Stavropol Region / F. V. Eroshenko, T. V. Simatin, E. I. Godunova [et al.]. – DOI 10.25930/gwmmr-ad54 // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2018. – Vol. 9, Issue 5. – Pp. 2121–2128. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36304807> (дата обращения: 22.01.2021).

13. Влияние физиологически активных веществ на продуктивность озимой пшеницы в условиях Ставропольского края / Т. В. Симатин, Е. А. Бильдиева, И. В. Чернова, Е. О. Шестакова. – DOI 10.25930/2218-855X/116.3.12.2019 // Новости науки в АПК. – 2019. – № 3 (12). – С. 460–465. – URL: <http://dois.fnac.center/2218-855X/3.12.2019/116.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

14. Дистанционная оценка озимых культур урожая 2017 года в Российской Федерации / С. А. Барталев, Е. С. Елкина, Е. А. Лулян [и др.]. – DOI 10.21046/2070-7401-2017-14-4-275-280 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 275–280. – URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2017t4/275-280.pdf (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

15. **Степанов, А. С.** Влияние климатических характеристик и значений вегетационного индекса NDVI на урожайность сои (на примере районов Приморского края) / А. С. Степанов, Т. А. Асеева, К. Н. Дубровин. – DOI 10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19 // Аграрный вестник Урала. – 2020. – Т. 192, № 1. – С. 10–19. – URL: <https://usau.editorum.ru/ru/nauka/article/34557/view> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

16. Получение временных рядов LAI сельскохозяйственных культур для прогнозирования урожайности / Е. В. Федотова, Ю. А. Маглинец, Р. В. Брежнев, А. Г. Вырвинский. – DOI 10.21046/2070-7401-2020-17-4-195-203 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2020. – Т. 17, № 4. – С. 195–203. – URL: http://d33.infospace.ru/d33_conf/sb2020t4/195-203.pdf (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

17. **Лысенко, С. А.** Прогнозирование урожайности сельскохозяйственных культур на основе спутникового мониторинга динамики углерода в наземных экосистемах / С. А. Лысенко. – DOI 10.31857/S0205-96142019448-59 // Исследование Земли из космоса. – 2019. – № 4. – С. 48–59. – URL: <https://journals.eco-vector.com/0205-9614/article/view/15714> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

18. Dynamic Model of Crops' Normalized Difference Vegetation Index in Central Federal District Environment / A. G. Bukhovets, E. A. Semin, M. V. Kucherenko, S. I. Yablonovskaya. – DOI 10.1088/1755-1315/548/4/042019 // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 548. – 7 p. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/548/4/042019> (дата обращения: 22.01.2021).

19. Информационные технологии в системе точного земледелия / А. В. Акинчин, Л. В. Левшаков, С. А. Линков [и др.] // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2017. – № 9. – С. 16–21. – URL: <http://www.journal-kgsha.ru/data/documents/2017-09.pdf> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

20. Развитие метода автоматического распознавания озимых культур на основе спутниковых данных для оценки их состояния на территории республики Крым / Д. Е. Плотников, Е. С. Ёлкина, Е. А. Дунаева [и др.]. – DOI 10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83 // Таврический вестник аграрной науки. – 2020. – № 1 (21). – С. 64–82. – URL: http://tvan.niishk.ru/data/documents/7_11.pdf (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

21. Использование сервиса спутникового мониторинга «ВЕГА-Science» для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур / С. А. Линков, А. В. Акинчин, И. С. Донченко, А. А. Попов. – DOI 10.25930/77n0-vw24 // Новости науки в АПК. – 2018. – № 2-2 (11). – С. 16–19. – URL: <https://fnac.center/> (дата обращения: 22.01.2021). – Рез. англ.

Поступила 11.08.2020; одобрена после рецензирования 10.09.2020; принята к публикации 24.09.2020

Об авторах:

Сторчак Ирина Геннадьевна, старший научный сотрудник отдела физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), Researcher ID: AAB-4142-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8741-6882>, sniish.storchak@gmail.com.

Ерошенко Федор Владимирович, заведующий отделом физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), доктор биологических наук, Researcher ID: AAB-4769-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0238-3861>, yer-sniish@mail.ru

Оганян Лусине Робертовна, научный сотрудник отдела физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), Researcher ID: AAB-4805-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0019-8956>, oganyan@inbox.ru

Шестакова Елена Олеговна, научный сотрудник отдела физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), Researcher ID: AAB-4741-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5764-0576>, shestakova.e.o@yandex.ru

Калашникова Анастасия Александровна, аспирант отдела физиологии растений ФГБНУ «Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр» (356241, Российская Федерация, г. Михайловск, ул. Никонова, д. 49), Researcher ID: AAE-8789-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3422-2256>, anaskar@mail.ru

Заявленный вклад соавторов:

И. Г. Сторчак – проведение исследований, подготовка начального варианта текста с последующей доработкой, подготовка и первичный анализ литературных данных.

Ф. В. Ерошенко – научное руководство, формулирование основной концепции, анализ и доработка текста.

Л. Р. Оганян – проведение исследований.

Е. О. Шестакова – проведение исследований.

А. А. Калашникова – проведение исследований.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

REFERENCES

1. Shestakova E.O., Oganyan L.R., Chernova I.V., et al. Effect of Variety, Predator, Level of Mineral Nutrition, Timing and Normal Seeding Rates on the Relative Content of Chlorophyll in Winter Wheat Plants. *Novosti nauki v APK = News of Science in the Agroindustrial Complex*. 2019; (3):487-490. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/2218-855X/122.3.12.2019>

2. Chernova I.V., Shestakova E.O., Bildieva E.A. Assessment of the Quality of Grain of Winter Wheat in the Stavropol Territory under Data Protection of the Earth. *Novosti nauki v APK* = News of Science in the Agroindustrial Complex. 2019; (3):482-486. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/2218-855X/121.3.12.2019>
3. Menkina Ye.A., Shapovalova N.N., Voropaeva A.A. Influence of Predecessors and Fertilizers on the Yields of Winter Wheat Cultivated by Using the No-Till Technology on Common Chernozem Soil in Stavropol Region. *Izvestiya Orenburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Orenburg State Agrarian University Bulletin. 2018; (3):55-59. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/n5cv-wa92>
4. Artemjev A.A., Guryanov A.M. Efficiency of Winter Wheat Cultivation with the Differentiated Application of Mineral Fertilizers. *Dostizheniya nauki i tekhniki APK* = Achievements of Science and Technology of AIC. 2020; 34(4):26-31. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0235-2451-2020-10405>
5. Gostev A.V. Conditions for the Formation of High-Quality Grain in Highly Productive Resource-Saving Agricultural Technologies in the Central Chernozem Region. *Zemledelie* = Agriculture. 2019; (6):16-20. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.24411/0044-3913-2019-10604>
6. Wei W., Wu W., Li Zh., et al. Selecting the Optimal NDVI Time-Series Reconstruction Technique for Crop Phenology Detection. *Intelligent Automation & Soft Computing*. 2016; 22(2):237-247. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1080/10798587.2015.1095482>
7. Tokareva O.S., Pasko O.A., Majid S.M., et al. Monitoring Vegetation State in the Central Iraq Using Landsat-8 Satellite Data. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2020; 331(6):19-31. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2020/6/2671>
8. Podlesnykh N.V. Peculiarities of Stages of Organogenesis, Growth and Development Phases, Crop Yield and Quality of Hard and Soft Winter Wheat under the Conditions of the Forest-Steppe of Voronezh Oblast. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta* = Voronezh State Agrarian University Bulletin. 2015; (3):12-22. Available at: <http://vestnik.vsu.ru/wp-content/uploads/2015/10/12-22.pdf> (accessed 22.01.2021). (In Russ.)
9. Torikov V.E., Romanova I.N., Ptitsyna N.V. Dependence of Photosynthetic Crop Potential and Dry Biomass Accumulation of Winter Wheat on the Sowing Dates and Mineral Nutrition Level. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskokhozyaystvennoy akademii* = Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2017; (3):8-12. Available at: <https://clck.ru/SvQ7m> (accessed 22.01.2021). (In Russ.)
10. Savichenko D.L., Tsatsenko L.V., Neshchadim N.N. Comparative Characteristic of Potential and Real Productivity of the Main Ear of Collection Samples of Winter Wheat Having a “Multiflorous Effect” Feature. *Tavricheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Tavrida Bulletin of Agrarian Science. 2018; (3):99-108. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25637/TVAN.2018.03.11>
11. Bondarenko Ye.V., Belik M.A. [Phenological Observations of Winter Wheat Plants in the Implementation of Coordinate Farming Technologies]. *AgroForum* = AgroForum. 2019; (8):107-111. Available at: <https://clck.ru/SvQjd> (accessed 22.01.2021). (In Russ.)
12. Eroshenko F.V., Simatin T.V., Godunova E.I., et al. Using Physiologically Active Substances into the Technology for Winter Wheat Cultivation in the Zone of Unstable Moistening of the Stavropol Region. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*. 2018; 9(5):2121-2128. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.25930/gwmr-ad54>
13. Simatin T.V., Bildieva E.A., Chernova I.V., et al. The Influence of Physiologically Active Substances on the Productivity of Winter Wheat in the Conditions of Stavropol Region. *Novosti nauki v APK* = News of Science in the Agroindustrial Complex. 2019; (3):460-465. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/2218-855X/116.3.12.2019>
14. Bartalev S.A., Elkina E.S., Loupian E.A., et al. Remote Sensing of 2017 Winter Crops in the Russian Federation. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2017; 14(4):275-280. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2017-14-4-275-280>
15. Stepanov A.S., Aseyeva T.A., Dubrovin K.N. The Influence of Climatic Characteristics and Values of NDVI at Soybean Yield (On the Example of the Districts of the Primorskiy Region). *Agrarnyy Vestnik Urala* = Agrarian Bulletin of the Ural. 2020; 192(1):10-19. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.32417/1997-4868-2020-192-1-10-19>

16. Fedotova E.V., Maglinets Yu.A., Brezhnev R.V., et al. Obtaining Time Series of LAI to Predict Crop Yield. *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* = Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2020; 17(4):195-203. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.21046/2070-7401-2020-17-4-195-203>
17. Lysenko S.A. Crop Yield Forecasting Based on the Satellite Monitoring of Carbon Dynamics in Terrestrial Ecosystems. *Issledovanie Zemli iz kosmosa* = Exploring the Earth from Space. 2019; (4):48-59. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019448-59>
18. Bukhovets A.G., Semin E.A., Kucherenko M.V., et al. Dynamic Model of Crops' Normalized Difference Vegetation Index in Central Federal District Environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020; 548. 7 p. (In Eng.) DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/548/4/042019>
19. Akinchin A.V., Levshakov L.V., Linkov S.A., et al. Information Technologies in the System of Precision Farming. *Vestnik Kurskoy gosudarstvennoy selskhozaystvennoy akademii* = Vestnik of the Kursk State Agricultural Academy. 2017; (9):16-21. Available at: <http://www.journal-kgsha.ru/data/documents/2017-09.pdf> (accessed 22.01.2021). (In Russ.)
20. Plotnikov D.E., Elkina E.S., Dunaieva Ie.A., et al. Development of the Method for Automatic Winter Crops Mapping by Means of Remote Sensing Aimed at Crops State Assessment over the Republic of Crimea. *Tavrisheskiy vestnik agrarnoy nauki* = Tavrida Bulletin of Agrarian Science. 2020; (1):64-82. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.33952/2542-0720-2020-1-21-64-83>
21. Linkov S.A., Akinchin A.V., Donchenko I.S., et al. The Use of Satellite Monitoring Service "Vega-Science" to Assess the Status of Crops. *Novosti nauki v APK* = News of Science in the Agroindustrial Complex. 2018; (2):16-19. (In Russ.) DOI: <https://doi.org/10.25930/77n0-vw24>

Received 11.08.2020; approved after reviewing 10.09.2020; accepted for publication 24.09.2020

About the authors:

Irina G. Storchak, Senior Researcher of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Researcher ID: AAB-4142-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8741-6882>, sniish.storchak@gmail.com.

Fedor V. Eroshenko, Head of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), D.Sc. (Biology), Researcher ID: AAB-4769-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0238-3861>, yer-sniish@mail.ru

Lusine R. Oganyan, Researcher of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Researcher ID: AAB-4805-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0019-8956>, oganyan@inbox.ru

Elena O. Shestakova, Researcher of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Researcher ID: AAB-4741-2020, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5764-0576>, shestakova.e.o@yandex.ru

Anastasiya A. Kalashnikova, Postgraduate Student of the Department of Plant Physiology, North Caucasus Federal Agricultural Research Centre (49 Nikonov St., Mikhailovsk 356241, Russian Federation), Researcher ID: AAE-8789-2021, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3422-2256>, anaskar@mail.ru

Contribution of the authors:

I. G. Storchak – research, preparation of the initial version of the text with subsequent revision, preparation and primary analysis of literary data.

F. V. Eroshenko – scientific guidance, formulation of the research concept, analysis and revision of the text.

L. R. Oganyan – research.

E. O. Shestakova – research.

A. A. Kalashnikova – research.

All authors have read and approved the final manuscript.