

СВЯЗЬ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI С СОДЕРЖАНИЕМ ХЛОРОФИЛЛА В РАСТЕНИЯХ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ

Ф. В. ЕРОШЕНКО, доктор биологических наук, заведующий отделом,

И. Г. СТОРЧАК, кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник,

Е. О. ШЕСТАКОВА, аспирант,

Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр

(356241, г. Михайловск, Ставропольский край, ул. Никонова, д. 49; e-mail: yer-sniish@mail.ru, sniish.storchak@gmail.com, shestakova.e.o@yandex.ru)

Ключевые слова: вегетационный индекс, NDVI, озимая пшеница, хлорофилл, фотосинтетическая продуктивность, урожай зерна.

Установленные связи NDVI с урожайностью озимой пшеницы для таких территорий, как район, почвенно-климатическая зона и край (область) в целом, не сохраняются для отдельных полей. Поэтому изучение влияния одной из важнейших характеристик фотосинтетической продуктивности – содержания хлорофилла в растениях на NDVI – может позволить разработать методы оценки продуктивности посева по данным ДЗЗ. Цель исследований – установить взаимосвязь между содержанием хлорофилла в растениях озимой пшеницы и вегетационным индексом NDVI для условий Ставропольского края. Работу проводили в 2011–2014 гг. на полях производственных посевов Ставропольского научно-исследовательского института сельского хозяйства. Проведен анализ корреляционной связи между относительным содержанием зеленых пигментов в единице биомассы, в единице площади ассимиляционной поверхности, а также валовым их количеством на 1 кв. м посева и NDVI полей. Он показал, что устойчивая связь (обратная) наблюдается только в случае с количеством хлорофилла в единице биомассы (мг/г), которая в среднем оценивается величиной $-0,79$. С остальными показателями она либо неустойчивая, либо вовсе отсутствует. Отрицательные значения полученных коэффициентов корреляции объясняются тем, что максимальное количество хлорофилла в растениях озимой пшеницы отмечается в начальные периоды роста и развития, а далее наблюдается так называемое ростовое разбавление, которое сопровождается уменьшением количества зеленых пигментов в единице биомассы, при этом NDVI посевов возрастает. Таким образом, между относительным содержанием хлорофилла в растениях озимой пшеницы и вегетационным индексом NDVI существует достаточно высокая и устойчивая обратная взаимосвязь.

THE CONNECTION BETWEEN THE VEGETATIVE INDEX NDVI AND THE CHLOROPHYLL CONTENT IN PLANTS OF WINTER WHEAT

F. V. EROSHENKO, doctor of biological sciences, head of department,

I. G. STORCHAK, candidate of agricultural sciences, senior research fellow,

E. O. SHESTAKOVA, postgraduate student,

North-Caucasian Federal Scientific Agrarian Center

(49 Nikonova str., 356241, Mikhailovsk, Stavropol territory; e-mail: yer-sniish@mail.ru, sniish.storchak@gmail.com, shestakova.e.o@yandex.ru)

Keywords: vegetative index, NDVI, winter wheat, chlorophyll, photosynthetic productivity, grain yield.

The established NDVI connections with the yield of winter wheat for such territories as the region, soil-climatic zone and the region (region) are not generally preserved for individual fields. Therefore, the study of the influence of one of the most important characteristics of photosynthetic productivity – the chlorophyll content in plants on NDVI – may allow us to develop methods for evaluating the productivity of crops according to remote sensing data. The aim of the studies was to establish the relationship between the chlorophyll content in winter wheat plants and the vegetative index NDVI for the conditions of the Stavropol Territory. The work was carried out in 2011–2014 on the fields of industrial crops of Stavropol Scientific Research Institute of Agriculture. We analyzed the correlation between the relative content of green pigments in a biomass unit, in the unit area of the assimilation surface, as well as their gross quantity on 1 square meter of sowing and NDVI fields. Which showed that a stable link (reverse) is observed only in the case of the amount of chlorophyll per unit of biomass (mg/g), which is estimated at an average of -0.79 . With the rest of the indicators, it is either unstable or completely absent. The negative values of the correlation coefficients obtained are explained by the fact that the maximum amount of chlorophyll in the plants of winter wheat is observed in the initial periods of growth and development, and then there is the so-called growth dilution, which is accompanied by a decrease in the amount of green pigments in a biomass unit, with NDVI growing. Thus, between the relative content of chlorophyll in plants of winter wheat and the vegetative index NDVI, there is a sufficiently high and stable inverse relationship.

Положительная рецензия представлена М. П. Жуковой, доктором сельскохозяйственных наук, профессором Ставропольского государственного аграрного университета.

Для условий Ставропольского края данные дистанционного зондирования Земли могут быть использованы при оценке продуктивности озимой пшеницы [1, 8]. Регрессионные модели зависимости урожайности от вегетационного индекса NDVI строят для таких территорий, как район, почвенно-климатическая зона и край в целом. Анализ проводят по усредненным значениям вегетационного индекса NDVI всех полей выбранной территории. В результате происходит нивелирование сортовых, технологических, почвенных и погодных особенностей. К сожалению, для отдельных полей такая связь неустойчива или вовсе отсутствует [7].

Известно [3–6, 9], что из всех основных характеристик фотосинтетической продуктивности растений содержание хлорофилла более точно отражает продукционный процесс. В то же время при расчете NDVI используется коэффициент отражения посева в красной области спектра электромагнитных волн, в которой находится максимум поглощения зеленых пигментов. Поэтому изучение зависимости вегетационного индекса NDVI от содержания хлорофилла в растениях позволит раскрыть некоторые механизмы взаимосвязи данных дистанционного зондирования Земли с продукционным процессом сельскохозяйственных культур.

Цель и методика исследований. Целью наших исследований было установить взаимосвязь между содержанием хлорофилла в растениях озимой пшеницы и вегетационным индексом NDVI для условий Ставропольского края.

Общие условия и методы проведения исследований. Работу проводили в 2011–2014 гг. на полях производственных посевов Ставропольского НИИ сельского хозяйства, расположенного в зоне неустойчивого увлажнения. 2011/2012 сельскохозяйственный год характеризовался ранним прекращением осенней и поздним возобновлением весенней вегетации при повышенном температурном режиме и недоборе осадков в весенне-летний период. Особенно в 2012/2013 сельскохозяйственного года были: сильная засуха в сентябре и октябре, которая в значительной степени компенсировалась благоприятными условиями ноября и декабря, раннее возобновление весенней вегетации и своевременное выпадение осадков в репродуктивный период. 2013/2014 сельскохозяйственный год отличался благоприятными условиями температурного и водного режимов во все периоды роста и развития озимой пшеницы.

Вегетационный индекс NDVI получали с помощью сервиса «ВЕГА» Института космических исследований РАН. Содержание хлорофилла определяли по методу Я. И. Милаевой и Н. П. Примак.

Результаты исследований. Существует несколько показателей, связанных с хлорофиллом: относи-

тельное содержание в единице биомассы, в единице площади и валовое его количество. Нами был проведен анализ взаимосвязи между этими показателями и вегетационным индексом NDVI. Полученные результаты свидетельствуют о том, что такая взаимосвязь неоднозначна как по показателям, так и по годам.

Анализ полученных данных показал, что коэффициент корреляции между количеством хлорофилла на квадратном метре посева озимой пшеницы и вегетационного индекса NDVI составил 0,62, 0,25 и 0,39 в 2012, 2013 и 2014 гг. соответственно (рис. 1). Таким образом, взаимосвязь между количеством хлорофилла на единице площади посева озимой пшеницы и NDVI в среднем за годы исследований очень слабая (коэффициент корреляции равен 0,42), а по отдельным полям крайне нестабильна, независимо от условий выращивания.

Связь между относительным содержанием хлорофилла в единице площади ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы и NDVI в среднем по полям за годы наших исследований полностью отсутствует, коэффициент корреляции составляет $-0,20$ (рис. 2). Следовательно, взаимосвязь содержания хлорофилла в единице площади ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы и NDVI в среднем по вариантам и годам практически отсутствует (коэффициент корреляции равен $-0,20$). По отдельным полям такая связь либо отсутствует вовсе, либо еще более нестабильна, чем в случае с валовым количеством зеленых пигментов на квадратном метре ценоза.

Нами был проведен анализ взаимосвязи NDVI посевов озимой пшеницы и такого показателя, как содержание хлорофилла в единице биомассы растений [2, 10], который наряду с валовым количеством зеленых пигментов на квадратном метре посева чаще всего используется для характеристики размеров фотосинтетического аппарата (рис. 3).

Анализ полученных данных показал, что коэффициент корреляции между вегетационными индексами и относительным содержанием хлорофилла в мг/г в среднем по всем изученным полям за годы исследований составляет $-0,79$. Это говорит о достаточно высокой степени сопряжения NDVI с количеством фотосинтетических пигментов в органах растений озимой пшеницы.

Таким образом, существует тесная обратная и достаточно стабильная взаимосвязь между количеством хлорофилла в единице биомассы растений озимой пшеницы и NDVI, которая оценивается коэффициентом корреляции, равным $-0,79$.

Полученные результаты можно объяснить следующим. Вегетационный индекс NDVI рассчитывается по данным коэффициентов спектральной яркости посева в красной и инфракрасной областях спектра

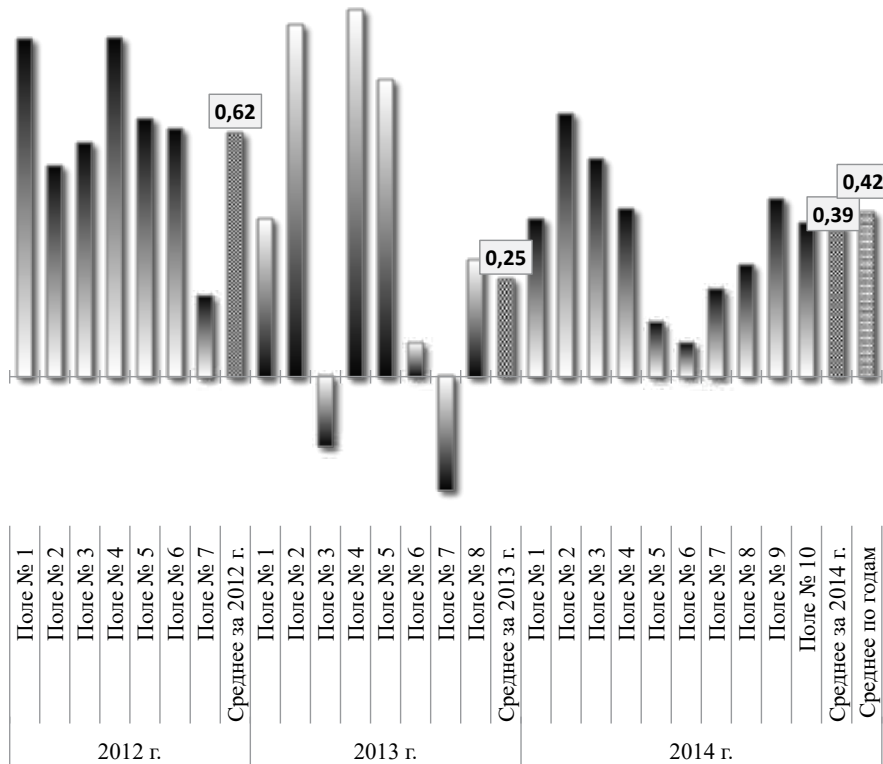


Рис. 1. Коэффициенты корреляции между количеством хлорофилла на квадратном метре посева озимой пшеницы (g/m^2) и NDVI

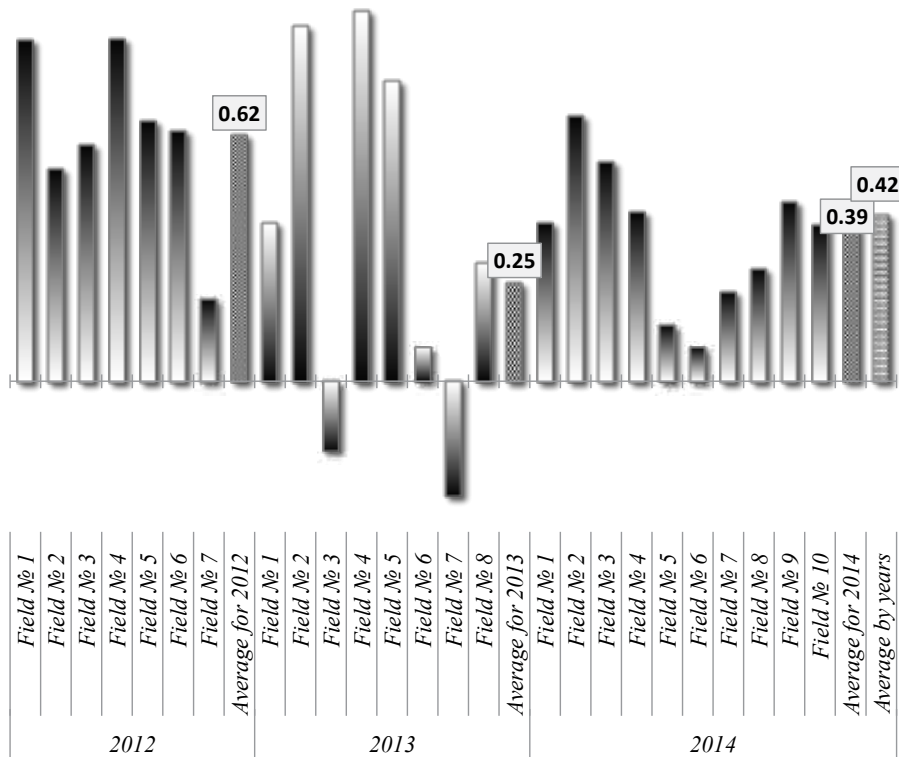


Fig. 1. Correlation coefficients between the amount of chlorophyll per square meter of winter wheat planting (g/m^2) and NDVI

электромагнитных волн. Если в первом диапазоне спектра находится максимум поглощения хлорофилла, то во втором отражают биологические объекты. Поэтому чем больше хлорофилла в растениях, тем меньше коэффициент отражения в красной области спектра. И наоборот, чем больше площадь ассимиляционной поверхности (или количества биомассы), тем больше коэффициент отражения в инфракрасном диапазоне. Поэтому плотность связи с NDVI

и ее направленность в случае с валовым количеством хлорофилла и количеством хлорофилла в единице площади растений крайне нестабильны, так как расчет этих показателей проводится с использованием величин, характеризующих как концентрацию зеленых пигментов в растительном организме, так и фотосинтезирующую поверхность, либо величину биомассы, которые в итоге оказывают влияние на значение NDVI. В то же время относительное со-

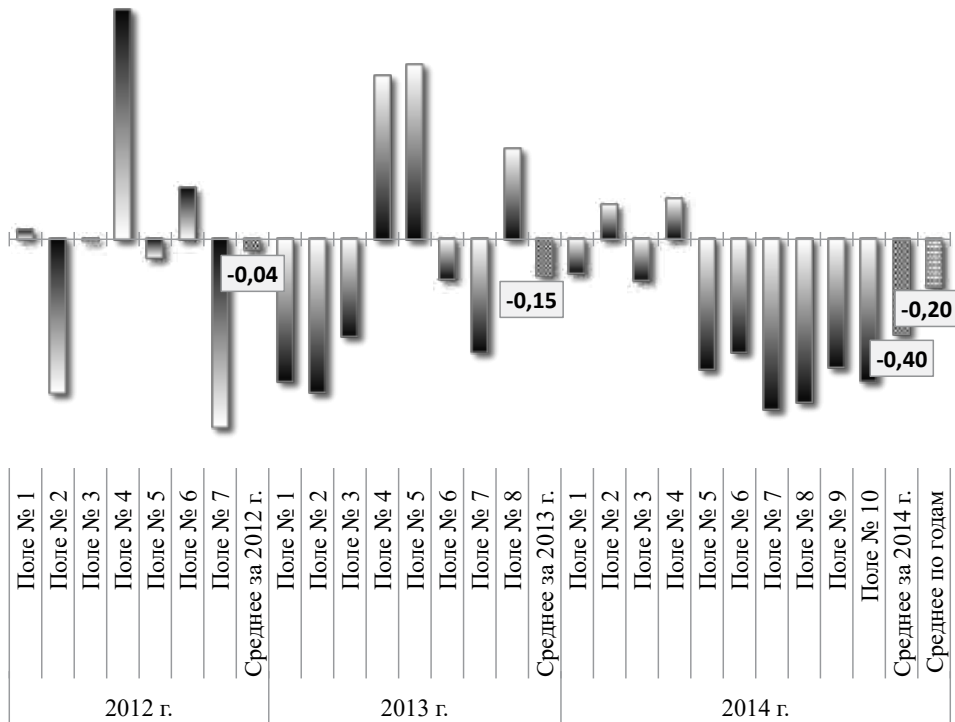


Рис. 2. Коэффициенты корреляции между относительным содержанием хлорофилла в единице площади ассимиляционной поверхности растений озимой пшеницы (mg/dm^2) и NDVI

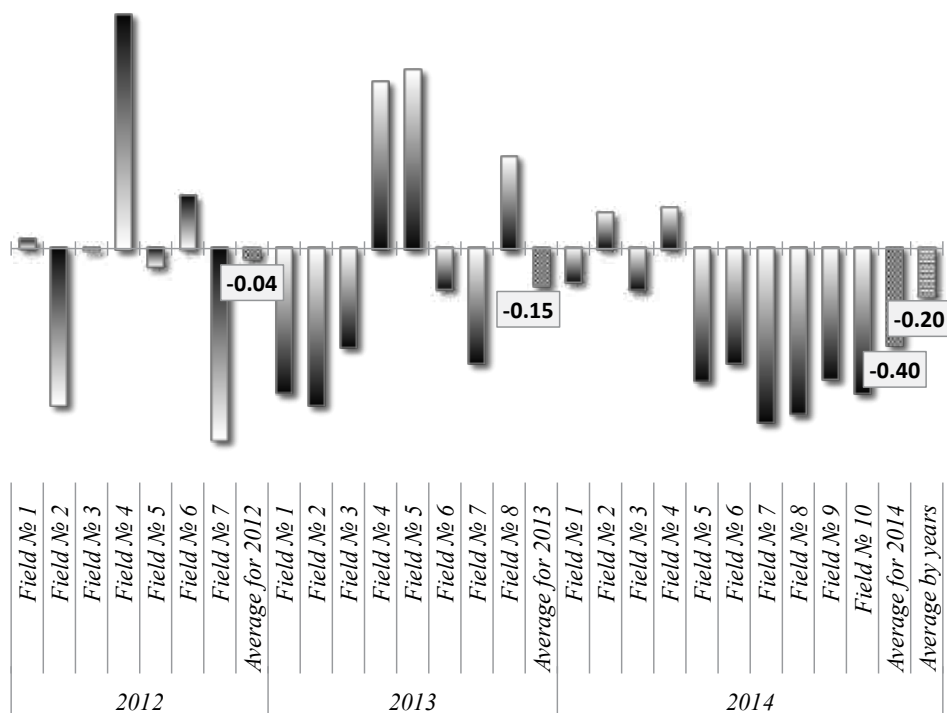


Fig. 2. Coefficients of correlation between the relative content of chlorophyll per unit area of the assimilative surface of winter wheat plants (mg/dm^2) and NDVI

держание хлорофилла в единице биомассы отражает только его концентрацию, а связь этого показателя с коэффициентом отражения в красной области спектра обратная. Этим объясняются полученные нами результаты.

Анализ коэффициентов корреляции между хлорофилловыми показателями растений озимой пшеницы и вегетационным индексом по этапам органогенеза за годы исследования позволяет сделать вывод

о том, что взаимосвязь между этими характеристиками если и проявляется, то в начальный период роста и развития, но значительно в меньшей степени, чем в случае с площадью ассимиляционной поверхности и NDVI (табл. 1).

При улучшении условий выращивания коэффициенты корреляции между рассматриваемыми показателями увеличиваются. Следует отметить, что в этом случае так же проявляется довольно тесная взаимо-

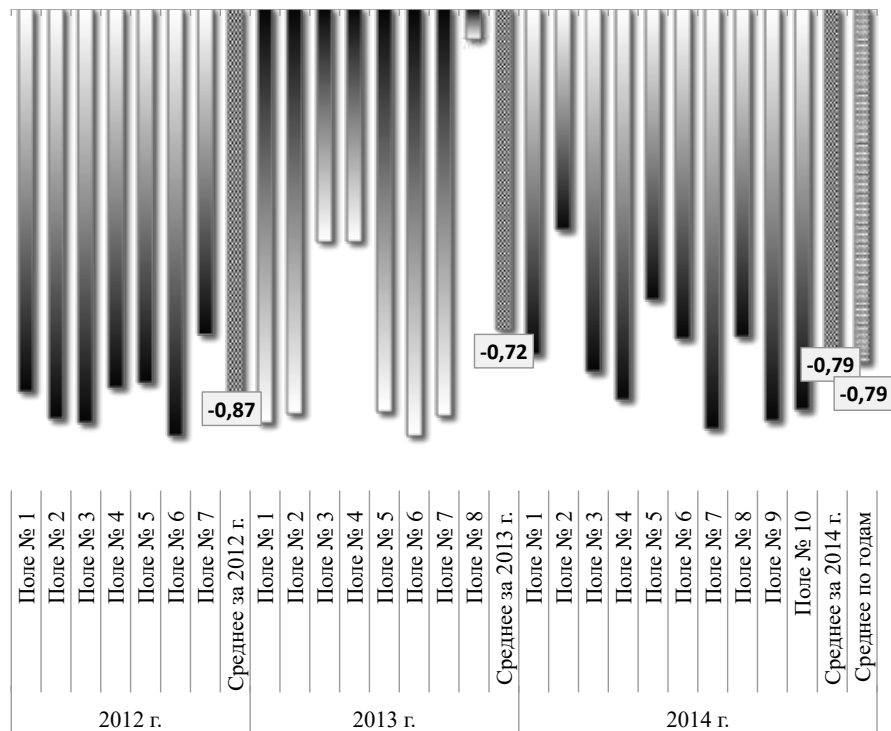


Рис. 3. Коэффициенты корреляции между относительным содержанием хлорофилла в единице биомассы растений озимой пшеницы (mg/g) и NDVI

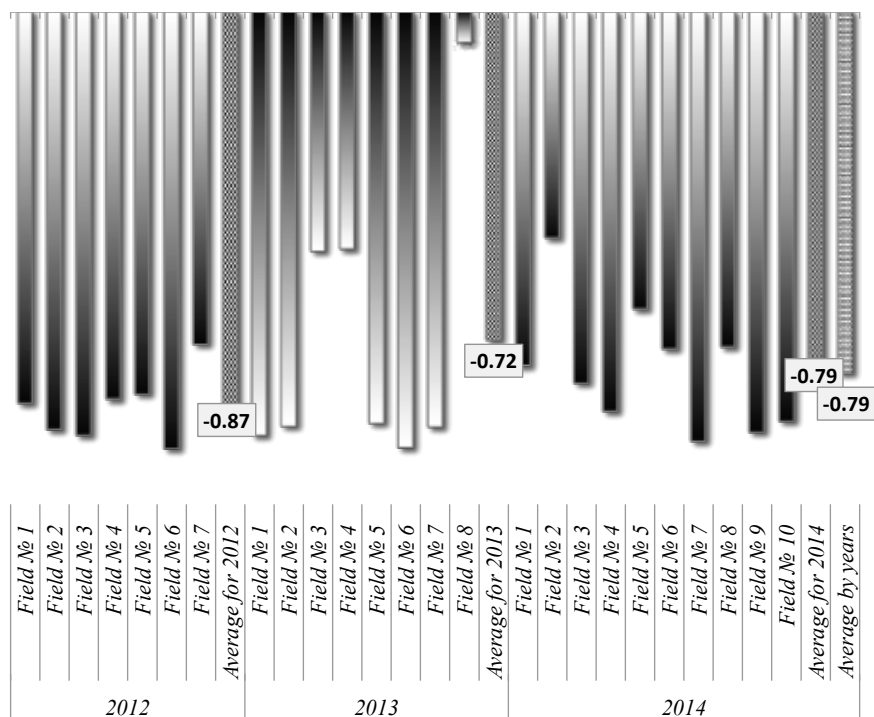


Fig. 3. Coefficients of correlation between the relative content of chlorophyll in a unit of winter wheat biomass (mg/g) and NDVI

связь между хлорофилловыми показателями растений озимой пшеницы и NDVI их посевов в период налива зерна (R_{corr} находятся в пределах 0,67–0,83).

Построенные нами регрессионные модели зависимости NDVI посевов от содержания хлорофилла в органах растений озимой пшеницы наглядно демонстрируют влияние внешних факторов на взаимосвязь между этими оптико-биологическими характеристиками (рис. 4).

Таким образом, наиболее тесная и стабильная взаимосвязь между хлорофилловыми показателями растений озимой пшеницы и вегетационным индексом посевов наблюдается в случае с относительным содержанием зеленых пигментов в единице биомассы, коэффициент корреляции составляет $-0,79$. Так как фотосинтетическая продуктивность растений является наиболее значимой составляющей их продукционного процесса, а самое точное отражение

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между хлорофилловыми показателями растений озимой пшеницы и NDVI по фазам роста и развития

Table 1

Coefficients of correlation between chlorophyll indexes of plants of winter wheat and NDVI on phases of growth and development

Количество хлорофилла <i>Amount chlorophyll</i>	Фазы развития <i>Phases of development</i>				
	Весеннее кущение <i>Spring tillering</i>	Трубкавание <i>Tubing</i>	Колошение <i>Earing</i>	Налив зерна <i>Filling grains</i>	Среднее <i>Average</i>
2012					
Валовое, г/м ² <i>Gross, g/m²</i>	0,61	-0,69	0,26	-0,81	-0,16
Относительное, мг/дм ² <i>Relative, mg / dm²</i>	0,42	-0,37	0,40	-0,88	-0,11
Относительное, мг/г <i>Relative, mg / g</i>	0,47	0,22	0,58	-0,73	0,13
2013					
Валовое, г/м ² <i>Gross, g/m²</i>	0,64	0,08	-0,03	0,10	0,20
Относительное, мг/дм ² <i>Relative, mg / dm²</i>	0,09	-0,38	-0,12	0,15	-0,07
Относительное, мг/г <i>Relative, mg / g</i>	0,14	-0,46	0,14	-0,03	-0,05
2014					
Валовое, г/м ² <i>Gross, g/m²</i>	0,71	0,49	0,29	0,67	0,54
Относительное, мг/дм ² <i>Relative, mg / dm²</i>	0,57	0,35	0,34	0,82	0,52
Относительное, мг/г <i>Relative, mg / g</i>	0,47	0,10	0,49	0,83	0,47
Среднее по годам <i>Average by years</i>					
Валовое, г/м ² <i>Gross, g/m²</i>	0,52	-0,04	0,17	0,01	0,19
Относительное, мг/дм ² <i>Relative, mg / dm²</i>	0,36	-0,13	0,21	0,03	0,11
Относительное, мг/г <i>Relative, mg / g</i>	0,36	-0,05	0,40	0,02	0,18

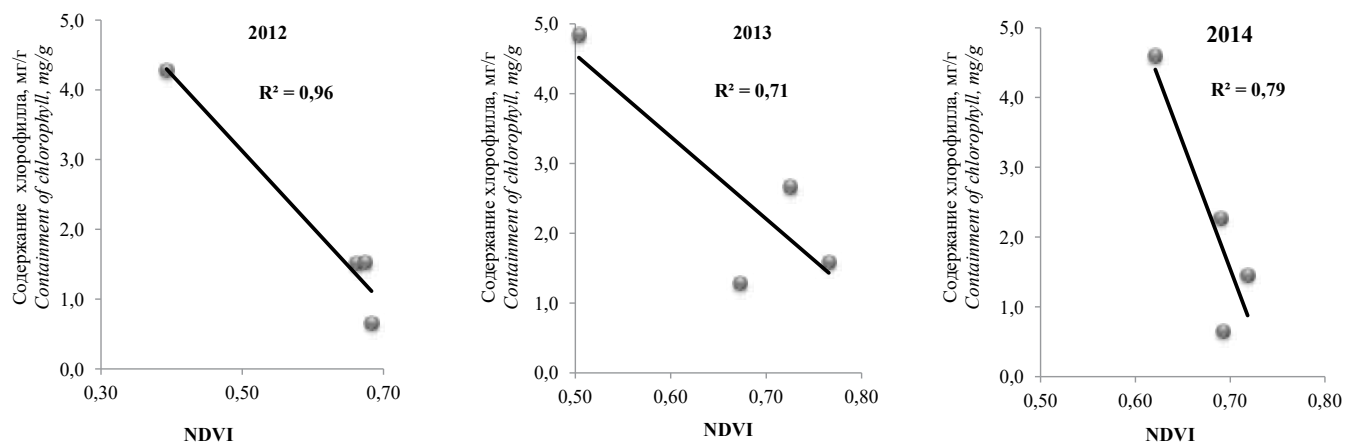


Рис. 4. Регрессионные модели зависимости NDVI посевов от количества хлорофилла в органах растений озимой пшеницы
Fig. 4. Regression models of the dependence of NDVI crops on the amount of chlorophyll in the organs of plants of winter wheat

фотосинтетической деятельности посева дают показатели, рассчитанные по содержанию хлорофилла, то данные дистанционного зондирования Земли могут быть использованы при разработке методов мониторинга хода формирования урожая сельскохозяйственных культур.

Литература

1. Ерошенко Ф. В. Возможности дистанционной оценки урожайности озимой пшеницы на основе вегетационного индекса фотосинтетического потенциала / Ф. В. Ерошенко, С. А. Барталев, И. Г. Сторчак, Д. Е. Плотников // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2016. Т. 13. № 4. С. 99–112.
2. Ерошенко Ф. В. NDVI и оптико-биологические свойства посевов озимой пшеницы / Ф. В. Ерошенко, И. Г. Сторчак // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса : двенадцатая Всероссий. открытая конф. Институт космических исследований РАН (Москва 10–14 ноября 2014 г.)*. М., 2014. С. 357.
3. Ерошенко Ф. В. Активный фотосинтетический потенциал / Ф. В. Ерошенко // *Евразийский союз ученых*. 2016. № 2–3 (23). С. 117–120.
4. Заводнов Д. В. Продуктивность сортов озимой пшеницы в связи с их фотосинтетическим потенциалом / Д. В. Заводнов // *Молодежь, наука, творчество : сб. студенческих науч. ст. по материалам 81-й региональной науч.-практ. конф. Ставрополь, 2016*. С. 196–198.
5. Рашидов К. А. Фотосинтетический потенциал и чистая продуктивность фотосинтеза посевов пшеницы в зависимости от технологии выращивания / К. А. Рашидов, Х. А. Муминджонов, Т. Д. Джаборов, Н. С. Шарипов // *Кишоварз*. 2015. Т. 1. С. 9–11.
6. Стасик О. О. Влияние новых регуляторов роста, полученных из природного сырья, на фотосинтетический аппарат и продуктивность озимой пшеницы / О. О. Стасик, Г. О. Прядкина, В. И. Ткачев, В. В. Франтийчук // *Актуальность идей В. Н. Хитрово в исследовании биоразнообразия : сб. Орел, 2014*. С. 192–196.
7. Сторчак И. Г. Прогноз урожайности озимой пшеницы с использованием вегетационного индекса NDVI для условий Ставропольского края : дис. ... канд. с.-х. наук / И. Г. Сторчак. Ставрополь : ФГБОУ ВО «Ставропольский государственный аграрный университет», 2016.
8. Сторчак И. Г., Ерошенко Ф. В. Использование NDVI для оценки продуктивности озимой пшеницы в Ставропольском крае // *Земледелие*. 2014. № 7. С. 12–15.
9. Тютерева Е. В. Хлорофилл В как источник сигналов, регулирующих развитие и продуктивность растений / Е. В. Тютерева, В. А. Дмитриева, О. В. Войцеховская // *Сельскохозяйственная биология*. 2017. Т. 52. № 5. С. 843–855.
10. Yeroshenko F. V. NDVI and photosynthetic characteristics of winter wheat crops / F. V. Yeroshenko, I. G. Storchak // *Materiály X mezinárodní vědecko-praktická conference «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2014»*. Díl 26. Biologické vědy. Praha : Publishing House «Education and Science», 2014. P. 31–37.

References

1. Eroshenko F. V. The possibilities of remote evaluation of the yield of winter wheat on the basis of the vegetative index of the photosynthetic potential / F. V. Eroshenko, S. A. Bartalev, I. G. Storchak, D. E. Plotnikov // *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*. 2016. T. 13. No. 4. P. 99–112.
2. Eroshenko F. V. NDVI and optical and biological properties of winter wheat sowing / F. V. Eroshenko, I. G. Storchak // *Modern Problems of Earth Remote Sensing from Space : twelfth All-Russian Open Conf. Institute of Space Research, Russian Academy of Sciences, Moscow 10–14 November 2014*. M., 2014. P. 357.
3. Eroshenko F. V. Active photosynthetic potential / F. V. Eroshenko // *Eurasian Union of Scientists*. 2016. No. 2–3 (23). P. 117–120.
4. Zavodnov D. V. Productivity of winter wheat varieties in connection with their photosynthetic potential / D. V. Zavodnov // *Youth, Science, Creativity – 2016 : collection of student scientific articles on the materials of the 81st regional scientific and practical conference*. Stavropol, 2016. P. 196–198.
5. Rashidov K. A. Photosynthetic potential and net productivity of photosynthesis of wheat sowing depending on growth technology / K. A. Rashidov, H. A. Muminjonov, T. D. Jaborov, N. S. Sharipov // *Kishovarz*. 2015. T. 1. P. 9–11.
6. Stasik O. O. Influence of new growth regulators obtained from natural raw materials on the photosynthetic apparatus and productivity of winter wheat / O. O. Stasik, G. O. Pryadkina, V. I. Tkachov, V. V. Frantiychuk // *The urgency of ideas VN. Sly in the study of biodiversity Eagle : collection*. Orel, 2014. P. 192–196.
7. Storchak I. G. Forecast of the productivity of winter wheat using the vegetative index NDVI for the conditions of the Stavropol Territory : dis. ... cand. of agricult. sc. / I. G. Storchak. Stavropol : FGBOU VO «Stavropol State Agrarian University», 2016.
8. Storchak I. G., Eroshenko F. V. Using NDVI to assess the productivity of winter wheat in the Stavropol Territory // *Agriculture*. 2014. No. 7. P. 12–15.
9. Tyutereva E. V. Chlorophyll B as a source of signals regulating the development and productivity of plants / E. V. Tyutereva, V. A. Dmitrieva, O. V. Wojciechowska. // *Agricultural Biology*. 2017. T. 52. No. 5. P. 843–855.
10. Yeroshenko F. V. NDVI and photosynthetic characteristics of winter wheat crops / F. V. Yeroshenko, I. G. Storchak // *Materiály X mezinárodní vědecko-praktická conference «Věda a technologie: krok do budoucnosti – 2014»*. Díl 26. Biologické vědy. Praha : Publishing House «Education and Science», 2014. P. 31–37.