Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»

УДК 633.11:631.52:581.1

Физиологическая и методологическая репрезентативность результатов мониторинга GreenSeeker и данных фотосинтетических пигментов у яровой пшеницы при разных приёмах агротехнологии в Среднем Предуралье

Пикулева Г.И., Заболотнова М.В., Зубарев Ю.Н.

Пермский государственный аграрно-технологический университет имени академика Д.Н. Прянишникова

Аннотация

Проведено исследование по оценке физиологической и методологической корректности сопоставления данных дистанционного мониторинга состояния посевов с помощью электронной системы GreenSeeker и лабораторного анализа содержания фотосинтетических пигментов (хлорофилл a, b, каротиноиды) у яровой пшеницы при различных системах обработки почвы и применении регуляторов роста. Показатели NDVI измеряли в три срока: начало кущения, выход в трубку и восковая спелость. Параллельно отбирали листовой материал для определения содержания фотосинтетических пигментов. Установлено, что NDVI в фазе восковой спелости достоверно коррелирует с урожайностью (r = 0,54), превосходя по информативности концентрацию хлорофиллов a+b в листе (r = 0,45). Прямое сопоставление NDVI и пигментов ограничено из-за различий в спектральных диапазонах измерений (GreenSeeker: 660 и 770 нм; спектрофотометрия: 665, 649 и 440 нм) и уровня представления данных - популяционного (NDVI) и клеточного (пигменты в мг/г). Выявлено, что в разные фазы роста различные показатели связаны с урожайностью: на ранних этапах важны хлорофилл b и сумма хлорофиллов, в фазе выхода в трубку — баланс хлорофиллов и каротиноидов, а к восковой спелости наибольшую прогностическую ценность приобретает NDVI. Максимальная урожайность (4,2 т/га) достигнута при дисковании (8–10 см) в сочетании с обработкой Эпин-Экстра, Р, что связано с высокой фотосинтетической активностью и стабильным уровнем NDVI. Рекомендовано использовать NDVI как основной инструмент оперативного мониторинга продуктивности, а анализ пигментов - как вспомогательный метод физиологической диагностики.

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

Ключевые слова*:* ЯРОВАЯ ПШЕНИЦА, GREENSEEKER, NDVI, ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИЕ ПИГМЕНТЫ, ХЛОРОФИЛЛ, УРОЖАЙНОСТЬ, ОБРАБОТКА ПОЧВЫ, РЕГУЛЯТОРЫ РОСТА

Введение

Современные технологии мониторинга состояния сельскохозяйственных культур всё активнее интегрируют дистанционные методы, такие как измерение индекса вегетации NDVI с помощью портативных систем (например, GreenSeeker), с традиционными лабораторными методами, включая анализ содержания фотосинтетических пигментов. Однако вопрос о корректности сопоставления этих данных остаётся недостаточно изученным, особенно в условиях различных агротехнологий.

NDVI теоретически отражает активность хлорофилла, но его формирование зависит не только от биохимического состава, но и от структуры посевов, плотности растений, архитектуры листового аппарата и внешних факторов [1-5]. Это создаёт методологическую проблему: NDVI - популяционный, интегральный показатель, в то время как концентрация пигментов в мг/г сырой массы - клеточный уровень, характеризующий метаболическое состояние отдельного листа, но не всего посева. Исследования подтверждают высокую корреляцию между NDVI и общей биомассой, однако указывают на эффект насыщения сигнала при высокой плотности зелёной массы. В отечественной литературе также исследования подтверждают высокую прогностическую ценность NDVI для урожайности зерновых [6-9], но редко оценивают его согласованность с биохимией растений. При этом климатические условия (влажность, УФ-излучение) и агротехника (обработка почвы, удобрения) существенно влияют на динамику NDVI [10, 11], требуя калибровки индексов под конкретные условия.

Важную роль в интерпретации пигментного состава играют современные исследования, раскрывающие функциональное значение отдельных компонентов фотосинтетического аппарата. Так, Тютерева Е.В., Иванова А.Н., Войцеховская О.В. подчеркивают, что хлорофилл b выполняет не только светособирающую функцию, но и выступает в качестве компонента, для образования и поддержания многотилакоидных гран хлоропластов, которые являются основой для осуществления мощного фотосинтеза, что напрямую связанно с адаптацией растений к изменению освещённости и стрессовым

условиям [12]. Так, исследования В.А. Лиховидовой, О.С. Амуновой и Е.М. Лисицына демонстрируют, что водный дефицит приводит к снижению содержания хлорофиллов a и b, особенно в критические фазы развития, что напрямую связано с падением продуктивности [13, 14].

Цель исследования - оценить физиологическую и методологическую корректность сопоставления данных GreenSeeker и лабораторного анализа фотосинтетических пигментов у яровой пшеницы в Среднем Предуралье. Задачи: 1) оценить взаимосвязь NDVI, содержания хлорофиллов a, b, каротиноидов с урожайностью яровой пшеницы; 2) определить взаимосвязь основной обработки почвы и применения регуляторов роста с показателями мониторинга состояния растения; 3) выявить методологические ограничения сопоставления показателей мониторинга.

Методика

Исследование проведено в 2024-2025 гг. в центре трансфера технологий ФГБОУ ВО Пермского ГАТУ был заложен двухфакторный полевой опыт. Объекты исследований – яровая пшеница сорт Каменка, основная обработка почвы: А1 - отвальная выровненная оборотным плугом Алмаз-6 на глубину 20-24 см; А2 - безотвальная культиватором-глубокорыхлителем КПЭ-3,8А на глубину 24-26 см; А3 - минимальная дисковой бороной БДТ-2,4 на глубину 8-10 см; А4 - отвальная гребнистая ПЛН-3-35 на глубину 20-22 (контроль); регуляторы роста: В1-Эпин-Экстра (Р); В2-Фитоспорин АС, (Ж); В3-Циркон (Р). Повторность - четырёхкратная. Общая площадь делянки: Фактор А – 40х12=480 м^2; фактор В – 3х40=120 м^2. Учётная площадь делянки 2 порядка 2х40=80 м^2. Измерение NDVI выполняли с помощью системы Green Seeker Handheld Crop Sensor, Model HCS-100 на высоте 60 см от посева в три срока: начало кущения, выход в трубку, восковая спелость. Отбор листового материала проводили в те же сроки, анализ – в течение 24 ч. Урожайность зерна яровой пшеницы определяется сплошным поделяночным методом. Содержание пигментов определяли фотоколориметрически с экстракцией этанолом. Расчёт хлорофилла a, b и каротиноидов выполнен по формулам Винтерманса, Де Мотса (1965) Wintermans J.A.C.M., de Mots A. (1965) - для хлорофилла a и b. и Веттштейна (1957) Wettstein D. von

(1957) – для каротиноидов [15]. Статистическая обработка включала двухфакторный дисперсионный анализ и корреляционный анализ с использованием программы Excel.

Результаты

Значения NDVI в зависимости от способа обработки почвы и применения регуляторов роста с использованием электронной системы идентификации изменения состояния с.-х. культур в период вегетации GreenSeeker (среднее за 2024-2025 гг.) представлены в таблице 1.

Дисперсионный анализ показал отсутствие значимого влияния фактора А (обработка почвы) на значения NDVI (Fф<F05) фазах выход в трубку и восковая спелость. В фазе начало кущения достоверно друг от друга отличаются только варианты Вспашка оборотным плугом (Отвальная), 20-24 см и Культивация глубокорыхлителем (Безотвальная), 24-26 см – 0,34 и 0,27 соответственно. Значимое влияние выявлено для фактора В (регуляторы роста) в фазе выхода в трубку, в то время как взаимодействие АВ оказалось незначимым, что напрямую связано со сроками обработки регулятором роста. Видимый эффект от применения регулятора роста сохраняется до восковой спелости, где влияние фактора В (регуляторы роста) становится уже не значимым.

Таблица 1. Значения NDVI в зависимости от способа обработки почвы и применения регуляторов роста (среднее за 2024-2025 гг.)

Фактор А	Фактор В	Фаза развития пшеницы		
		начало кущения	выход в трубку	восковая спелость
A_1 - Вспашка оборотным плугом (Отвальная выровненная), 20-24 см	B_1- Без обработки (контроль)	0,34	0,60	0,35
	B_2- Эпин-Экстра, Р	0,33	0,64	0,37
	B_3- Фитоспорин АС, Ж	0,33	0,62	0,37
	B_4- Циркон, Р	0,34	0,63	0,31
Среднее по фактору A_1		0,34	0,62	0,35
A_2 - Культивация глубокорыхлителем (Безотвальная), 24-26 см	B_1- Без обработки (контроль)	0,27	0,61	0,41
	B_2- Эпин-Экстра, Р	0,27	0,62	0,35
	B_3- Фитоспорин АС, Ж	0,24	0,65	0,4
	B_4- Циркон, Р	0,28	0,67	0,38
Среднее по фактору A_2		0,27	0,64	0,39

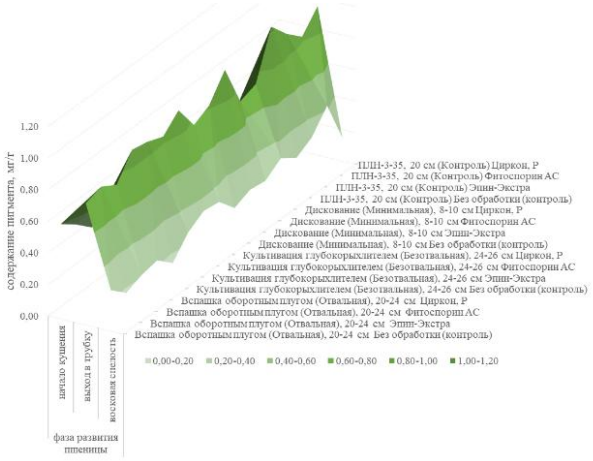
Фактор А	Фактор В	Фаза развития пшеницы		
		начало кущения	выход в трубку	восковая спелость
A_3 - Дискование (Минимальная), 8-10 см	B_1- Без обработки (контроль)	0,29	0,66	0,37
	B_2- Эпин-Экстра, Р	0,28	0,64	0,36
	B_3- Фитоспорин АС, Ж	0,28	0,61	0,38
	B_4- Циркон, Р	0,34	0,63	0,34
Среднее по фактору A_3		0,30	0,64	0,36
A_4 – Отвальная гребнистая ПЛН-3-35, 20-22 см (Контроль)	B_1- Без обработки (контроль)	0,28	0,65	0,40
	B_2- Эпин-Экстра, Р	0,34	0,56	0,37
	B_3- Фитоспорин АС, Ж	0,28	0,59	0,35
	B_4- Циркон, Р	0,33	0,64	0,38
Среднее по фактору A_4		0,31	0,61	0,38
Среднее по фактору B_1		0,30	0,63	0,38
Среднее по фактору B_2		0,31	0,62	0,36
Среднее по фактору B_3		0,28	0,62	0,38
Среднее по фактору B_4		0,32	0,64	0,35
главных эффектов	фактора А	0,05	$F_ф<F_{05}$	$F_ф<F_{05}$
	фактора В и взаимодействия АВ	$F_ф<F_{05}$	0,01	$F_ф<F_{05}$
частных различий	I порядка	0,09	0,05	0,07
	II порядка	0,07	0,03	0,06

Наиболее высокие значения NDVI в фазе выхода в трубку наблюдались при культивации и применении Циркона, Р. При этом дискование в сочетании с Эпин-Экстра, Р обеспечивает стабильные значения NDVI на протяжении вегетации. Уровень NDVI в фазе восковой спелости наиболее высок при культивации глубокорыхлителем и вспашке ПЛН-3-35.

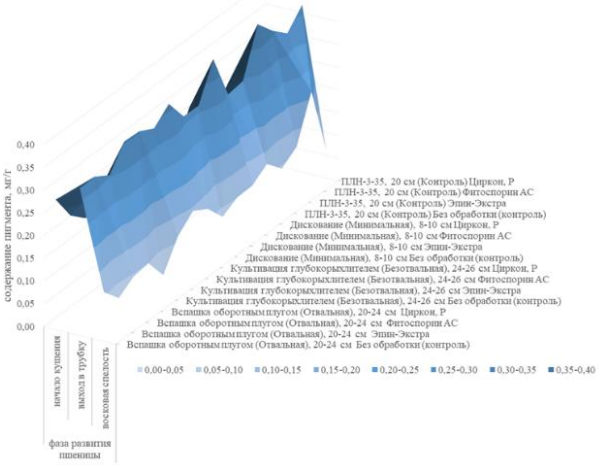
Содержание пигментов в листьях пшеницы в зависимости от фазы развития, способа обработки почвы и применения регуляторов роста приведены на рисунке 1, а результаты корреляционного анализа в таблице 2.

Анализ корреляций показал, что в начало кущения наибольшую связь с урожайностью имеют хлорофилл b (r = 0,41) и сумма хлорофиллов (r = 0,39), что согласуется с данными Тютеревой Е.В. и др. (2014), подчёркивающими ключевую роль хлорофилла b в формировании светособирающих комплексов и адаптации к переменным условиям освещённости [16]. Отрицательная корреляция отношения a/b (–0,36) говорит о

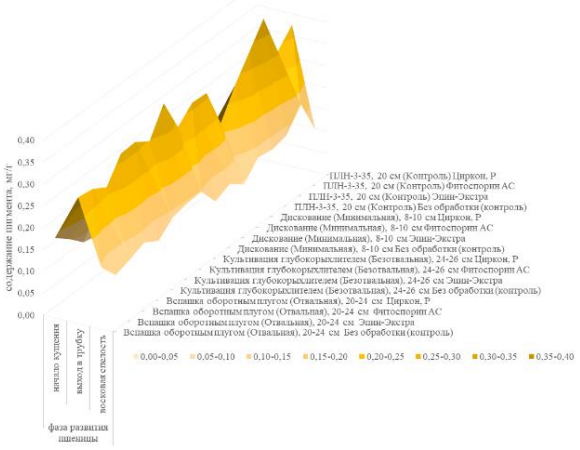
преимуществе растений с относительно повышенным содержанием хлорофилла b, что ассоциируется с более эффективным поглощением света в условиях затенения или стресса.



Содержание хлорофилла a



Содержание хлорофилла b



Содержание каратиноидов

Рис. 1. Содержание пигментов в листьях пшеницы в зависимости от фазы развития, способа обработки почвы и применения регуляторов роста, мг/г.

Таблица 2. Результаты корреляционного анализа: данные GreenSeeker, лабораторный анализ пигментов и урожайность яровой пшеницы, (r)

Показатель	Начало кущения	Выход в трубку	Восковая спелость
NDVI (GreenSeeker)	0,34	0,27	0,54
хлорофилл *a*	0,37	0,38	0,39
хлорофилл *b*	0,41	0,35	0,42
сумма хлорофиллов (*a+b)*	0,39	0,39	0,45
каротиноиды	0,18	0,19	0,28
отношение хлорофилла *a/b*	–0,36	-0,42	-0,17
отношения ∑хлор./ ∑кар.	–0,15	0,45	0,41

В фазе выхода в трубку максимальную корреляцию с урожайностью демонстрирует отношение суммы хлорофиллов к каротиноидам (r = 0,45), что отражает баланс между фотосинтезом и защитой от окислительного стресса. Каротиноиды выполняют антиоксидантную функцию, предотвращая фотооксидационное повреждение фотосистем, что особенно важно в период активного роста [17, 18].

В фазе восковой спелости наиболее информативным становится NDVI (r = 0,54), что согласуется с данными Родимцева С.А. и др. (2022), где коэффициент корреляции между пиковыми значениями NDVI и урожайностью составил 0,79 для озимой пшеницы и 0,75 для ярового ячменя, то есть сохранения фотосинтетически активной поверхности до конца вегетации. Этот эффект подтверждается данными Лукина С.В. и др. (2004), которые установили, что сохранение хлорофилла в листьях яровой пшеницы даже при загрязнении почвы кадмием положительно влияет на урожайность, несмотря на наличие стресса [19]. Сумма хлорофиллов также положительно коррелирует с урожайностью (r = 0,45), но слабее, чем NDVI.

Положительная корреляция между NDVI и суммой хлорофиллов (a+b) объясняется тем, что хлорофилл поглощает красный свет (~660 нм), снижая отражение в Red-канале, что увеличивает NDVI. Каротиноиды вносят минимальный вклад в NDVI, так как их максимум поглощения приходится на синюю часть спектра (~470 нм), вне диапазона сенсоров GreenSeeker.

Критическим ограничением является чувствительность NDVI к плотности посева. Например, при культивации (А2) наблюдается высокий NDVI, обусловленный хорошей густотой, хотя урожайность ниже, чем при дисковании. Это указывает на то, что высокий

NDVI не всегда соответствует высокой продуктивности. Кроме того, при водном стрессе или старении хлорофилл разрушается, но лист остаётся плотным и отражает ИК-свет, поэтому NDVI может оставаться высоким, хотя физиологическая активность снижена. Такая ситуация была зафиксирована при дисковании в сочетании с Эпин-Экстра, Р, где при относительно низком содержании хлорофилла наблюдался высокий NDVI и максимальная урожайность (4,2 т/га), что может быть связано с эффективным использованием ресурсов и задержкой старения.

Одним из ключевых методологических ограничений сопоставления является расхождение в используемых спектральных диапазонах между дистанционным сенсором и лабораторным анализом: GreenSeeker измеряет отражение в двух узких диапазонах: Red: 660 нм (±10 нм), NIR: 770 нм (±10 нм). Эти диапазоны выбраны так, чтобы максимизировать чувствительность к содержанию хлорофилла и минимизировать влияние других факторов. Красный диапазон (0,62–0,75 мкм) соответствует зоне максимального поглощения хлорофиллом, а ближний ИК (0,75–1,3 мкм) - зоне максимального отражения клеточной структурой листа. Лабораторный анализ пигментов основан на измерении поглощения в следующих диапазонах: Хлорофилл a: 665 нм, Хлорофилл b: 649 нм, Каротиноиды: 440 нм. Хоть и существует частичное перекрытие (660 нм и 665 нм), оно не является полным или точным. Разница в 5 нм может быть существенной при высокой чувствительности спектральных характеристик. Кроме того, каротиноиды поглощают преимущественно в синей части спектра (~470 нм), где GreenSeeker не имеет сенсоров, поэтому их содержание практически не влияет на NDVI.

Таким образом, прямое сопоставление концентрации пигментов с NDVI методологически некорректно без учёта этого спектрального несоответствия. Это объясняет, почему в некоторых случаях (например, при применении Эпин-Экстра) наблюдается высокий NDVI при относительно низком содержании хлорофилла «а»: возможно, изменяется структура антенных комплексов, повышается отражение в NIR или происходит задержка старения, не сопровождающаяся увеличением концентрации пигментов.

Выводы:

Прямое сопоставление NDVI и концентрации пигментов дополнительно ограничено из-за различий в спектральных диапазонах: GreenSeeker работает на длинах волн 660 и 770 нм, тогда как спектрофотометрия оценивает пигменты по полосам поглощения при 665, 649 и 440 нм, что снижает корреляцию между методами. NDVI отражает популяционный уровень состояния посевов, тогда как содержание пигментов в мг/г характеризует биохимическое состояние отдельного листа. Для сопоставимости данных рекомендуется пересчитать пигменты на единицу площади (мг/м²) и учесть такие параметры, как площадь листьев или плотность посева. Соответственно, следует продолжить исследования для уточнения методики расчёта пигментов с единицы площади.

На разных фазах роста различные показатели фотосинтетических пигментов и NDVI по-разному связаны с урожайностью. В начале кущения ключевую роль играют хлорофилл b и сумма хлорофиллов, что указывает на важность светособирающих комплексов. В фазу выхода в трубку значимость приобретает баланс между хлорофиллами и каротиноидами, отражающий защиту фотосистем от стресса. К восковой спелости наибольшая информативность отмечена у показателя NDVI.

Установлено, что NDVI в фазе восковой спелости достоверно коррелирует с урожайностью ($r = 0,54$), превосходя по информативности концентрацию хлорофиллов a+b в листе ($r = 0,45$). Максимальная урожайность (4,2 т/га) достигнута при дисковании (8–10 см) в сочетании с обработкой Эпин-Экстра,Р, что связано с высокой фотосинтетической активностью и эффективным использованием ресурсов, отражённым в стабильно высоком NDVI.

Лабораторный анализ пигментов позволяет оценить физиологическое состояние растений, включая баланс между фотосинтезом и защитой, но менее эффективен для прогноза урожайности, чем NDVI. Рекомендуется использовать NDVI для оперативного мониторинга и прогнозирования урожайности, а анализ пигментов - как вспомогательный инструмент диагностики стрессов и оценки метаболического состояния растений.

Финансирование:

Работа выполнена в рамках субсидии из федерального бюджета образовательным организациям высшего образования на реализацию мероприятий, направленных на поддержку студенческих научных сообществ (IV Конкурс студенческих научных обществ – 2025)

Список использованных источников:

1. Chen J. et al. Estimating aboveground biomass of grassland having a high canopy cover: an exploratory analysis of in situ hyperspectral data //International Journal of Remote Sensing. – 2009. – Т. 30. – №. 24. – С. 6497-6517.

2. Chen Q. et al. Spectral indices in remote sensing of soil: definition, popularity, and issues. A critical overview //Remote Sensing of Environment. – 2025. – Т. 329. – С. 114918.

3. Florian A. M. et al. Field spectroscopy and machine learning successfully predict grassland forage quality and quantity across climate zones //Ecological Informatics. – 2025. – С. 103426.

4. Mutanga O., Skidmore A. K. Hyperspectral band depth analysis for a better estimation of grass biomass (Cenchrus ciliaris) measured under controlled laboratory conditions //International journal of applied earth observation and geoinformation. – 2004. – Т. 5. – №. 2. – С. 87-96.

5. Mutanga O., Skidmore A. K. Narrow band vegetation indices overcome the saturation problem in biomass estimation //International journal of remote sensing. – 2004. – Т. 25. – №. 19. – С. 3999-4014.

6. Гулянов Ю. А. и др. Оценка биоклиматического потенциала и уровня его реализации в урожаях полевых культур в агротехнологиях степной зоны Алтайского края //Пермский аграрный вестник. – 2024. – №. 1 (45). – С. 12-23.

7. Железова С. В., Березовский Е. В., Аброськин Д. П. Использование прибора Green Seeker® RT200 для мониторинга посевов озимой пшеницы при разных технологиях возделывания //Проблемы агрохимии и экологии. – 2013. – №. 1. – С. 56-60.

8. Новикова Т. В., Зубарев Ю. Н., Чиркова А. Н., Шитикова А. В. Нормализованный вегетационный индекс растений (NDVI) как цифровой трекер формирования продукционного процесса яровых зерновых и зернобобовых культур в среднем Предуралье/ Агротехнологии XXI века: стратегия развития, технологии, инновации: Материалы Международной конференции. В 3-х частях, Пермь, 11–15 ноября 2024 года. – Пермь: ИПЦ Прокростъ, 2024. – С. 51-56. – EDN JHHZLY.

9. Фомин, Д. С. Геоинформационные технологии в повышении урожайности яровой пшеницы / Д. С. Фомин, Д. С. Фомин, Ю. Н. Зубарев // Аграрный вестник Урала. – 2025. – Т. 25, № 4. – С. 552-563. – DOI 10.32417/1997-4868-2025-25-04-552-563. – EDN BZIKHR.

10. Родимцев С.А., Павловская Н.Е., Вершинин С.В. и др. Использование вегетативного индекса NDVI для прогноза урожайности зерновых культур // Вестник НГАУ. 2022. № 4 (65). С. 56–67.

11. Уфимцев А., Абрамов Н.В. Использование коэффициента NDVI в системе точного земледелия // Интеграция науки и образования в аграрных вузах для обеспечения продовольственной безопасности России. 2022. С. 228–234.

12. Тютерева Е.В., Иванова А.Н., Войцеховская О.В. К вопросу о роли хлорофилла b в онтогенетических адаптациях растений // Успехи современной биологии. 2014. Т. 134, № 3. С. 249–256.

13. Амунова О.С., Лисицын Е.М. Влияние различных условий увлажнения на пигментный комплекс листьев сортов мягкой яровой пшеницы разных групп спелости // Самарский научный вестник. 2019. Т. 8, № 3. С. 19–25.

14. Лиховидова В.А., Газе В.Л., Ионова Е.В. Влияние фотосинтетического пигмента хлорофилла при различной влагообеспеченности на продуктивность растений озимой мягкой пшеницы // Аграрная наука. 2020. № 7–8. С. 86–89.

15. Фомин Д.С., Пикулева Г.И., Полякова С.С. и др. Спектральные характеристики посевов ячменя в зависимости от агротехнических приемов // Труды XVII Международной научно-технической конференции. Москва, 2024. С. 376–378.

16. Воробьев Н. И. и др. Цифровая обработка фотометрических данных дистанционного зондирования полей озимой ржи //Аграрный вестник Урала. – 2024. – Т. 24. – №. 2. – С. 152-162.

17. Загоскина, Н. В. Активные формы кислорода и антиоксидантная система растений / Н. В. Загоскина, Л. В. Назаренко // Вестник МГПУ. Серия: Естественные науки. – 2016. – № 2(22). – С. 9-23. – EDN VZSFBT.

18. Панихина Л.В., Зайцева И.Ю., Кокина Л.П. Пигментный комплекс в листьях ярового ячменя в условиях Волго-Вятского региона // Вестник аграрной науки. 2022. № 3 (96). С. 37–44.

19. Лукин С.В., Кононенко Л.А., Мирошникова Ю.В. Влияние кадмия на развитие фотосинтетического аппарата и урожайность яровой пшеницы // Агрохимия. 2004. № 3. С. 63–68.

Цитирование: Пикулева Г.И., Заболотнова М.В., Зубарев Ю.Н. Физиологическая и методологическая репрезентативность результатов мониторинга GreenSeeker и данных фотосинтетических пигментов у яровой пшеницы при разных приёмах агротехнологии в Среднем Предуралье [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2025. – № 5. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2025/5/st_520.pdf DOI: https://doi.org/10.51419/202155520.