

Применение гиперспектральной съёмки с беспилотного летательного аппарата для оценки засорённости посевов зерновых культур

А. М. Шпанев¹, А. Ф. Петрушин²

¹ *Агрофизический научно-исследовательский институт
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mail: ashpanev@mail.ru*

² *Санкт-Петербургский государственный университет
Санкт-Петербург, 199034, Россия
E-mail: alfiks@mail.ru*

Сорная растительность — один из наиболее значимых факторов, ограничивающих потенциал продуктивности зерновых культур в Северо-Западном регионе Российской Федерации. Современные тенденции в мониторинге засорённости агроценозов включают использование беспилотных летательных аппаратов и гиперспектральной съёмки с координатной привязкой к местности. Изучение отражательной способности посевов озимой тритикале и яровой пшеницы в зависимости от степени засорённости и уровня азотного питания проводилось в 2022–2023 гг. на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института с использованием гиперспектральной съёмки с беспилотного летательного аппарата. Схема опыта включала наличие трёх уровней азотного питания (низкий, средний, высокий) и четырёх степеней засорённости посева (нулевая, слабая, средняя, сильная). По результатам исследований определено, что с увеличением засорённости посева его отражательная способность повышалась, особенно сильно на фоне внесения азотных удобрений, способствующих росту надземной массы сорных растений. В фазу выхода в трубку озимой тритикале изменения в отражательной способности посева под влиянием сорных растений были более выражены, чем в фазу кущения яровой пшеницы в условиях острого дефицита влаги. Достоверные различия в отражательных свойствах делянок с разной степенью засорённости фиксировались только в ближнем инфракрасном (NIR, *англ.* near infrared) диапазоне спектра. Усреднённые значения коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в пределах данного участка спектра увеличивались с 0,49 до 0,76 и с 0,42 до 0,52 соответственно в посевах озимой тритикале и яровой пшеницы. Выявленные закономерности получили подтверждение в виде статистически значимых положительных коэффициентов корреляции между значениями КСЯ в NIR-диапазоне, численностью сорных растений (0,46 и 0,59) и их проективным покрытием (0,68 и 0,63). Получены диапазоны значений КСЯ в NIR-области спектра для каждой степени засорённости и уровня азотного питания озимой тритикале и яровой пшеницы, в том числе для средней и высокой засорённости, в отношении которых целесообразно проведение гербицидной обработки.

Ключевые слова: озимая тритикале, *Triticosecale Wittm.* Ex A. Camus, яровая пшеница, *Triticum aestivum* L., сорные растения, азотные удобрения, беспилотные летательные аппараты, гиперспектральные измерения, отражательная способность, коэффициент спектральной яркости

Одобрена к печати: 17.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-136-148

Введение

В регионах с достаточным увлажнением сорная растительность является одним из наиболее значимых факторов, ограничивающих потенциал продуктивности зерновых культур. Из литературы известно, что потери урожая пшеницы и овса от сорных растений на Северо-Западе Российской Федерации (РФ) могут достигать 20 %, что делает востребованным проведение гербицидной обработки в абсолютном большинстве случаев (Шпанев, 2016, 2018, 2024).

Существующая система мониторинга по-прежнему ориентирована на наземный учёт сорных растений путём их подсчёта и визуального определения проективного покрытия в 10–20 местах на поле, что даёт весьма усреднённое представление о засорённости агро-

ценозов (Павлюшин и др., 2015). При этом игнорируется сама возможность гетерогенного размещения сорных растений на полях, а значит и пространственная неоднородность количественных параметров засорённости, что на самом деле не соответствует действительности. В отечественной и зарубежной литературе накоплено уже достаточно много сведений об индивидуальных особенностях пространственной структуры засорённости, присущих возделываемым полям. Так, хорошо известно о куртинном произрастании в пределах одного поля многолетних корневищных и корнеотпрысковых сорных растений (Самсонова и др., 2014; Шпаар и др., 2002; Шпанев и др., 2020). Примеры неравномерного распространения были выявлены и в отношении малолетних видов сорных растений (Шпанев, 2022; Шпанев, Смук, 2019; Gerhards et al., 2000; Lettner et al., 2001). Гетерогенность пространственного размещения сорных растений на полях может быть обусловлена как природными факторами, например особенностью его рельефа, так и антропогенными — неравномерной глубиной обработки почвы, неравномерным высевом культуры и внесением удобрений (Назранов, Хуцинова, 2018; Izquierdo et al., 2009).

Приоритетный подход в оценке засорённости агроценозов основан на использовании дистанционных методов геокодированного сбора данных и цифровых технологий, позволяющих отказаться от сплошных обработок гербицидами в пользу пространственно-дифференцированных, отвечающих требованиям ресурсосберегающего и экологичного земледелия (Лысов, Корнилов, 2020; Шпанев, Смук, 2021; Чичкова и др., 2022). Ключевым элементом при реализации пространственно-дифференцированного подхода при проведении гербицидных обработок является дистанционный мониторинг с использованием мультиспектральных или гиперспектральных камер, по результатам которого составляются цифровые карты засорённости полей (Шпанев и др., 2017). В основе принятия решений лежат отличия в отражательной способности участков посева, засорённых в разной степени. Отечественная библиотека спектральных образов находится в начальной стадии формирования и по большей части состоит из цифровых изображений, свойственных конкретным видам культурных и сорных растений, но не фрагментов посева или посадок сельскохозяйственных культур (Данилов и др., 2020; Савин и др., 2020; Шпанев, Смук, 2022, 2024). В такой ситуации проводимые нами исследования имеют как теоретическую, так и практическую значимость, а также несомненную актуальность.

Цель данной работы — изучение отражательной способности посевов озимой тритикале и яровой пшеницы, засорённых в разной степени, посредством гиперспектральной съёмки с беспилотного летательного аппарата в условиях Северо-Запада России.

Материалы и методы

Изучение возможностей применения гиперспектральной съёмки в оценке засорённости посевов зерновых культур проводилось в период 2022–2023 гг. на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института (Ленинградская область, Гатчинский район), где сосредоточены многолетние исследования в области дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем (Шпанев, 2019). В 2022 г. объектом изучения стала засорённость посевов озимой тритикале (сорт Немчиновский 56), в 2023 г. — яровой пшеницы (сорт Дарья). Схема опыта была общей для обеих культур, она включала три уровня азотного питания (низкий, средний, высокий) и четыре степени засорённости (нулевая, низкая, средняя, высокая). Размер делянки в опыте составлял 2 м^2 ($1,7 \times 1,2\text{ м}$), общее их количество при 4-кратной повторности — 48, размещение — систематическое (рис. 1, см. с. 138).

Аммиачная селитра вносилась в качестве основного удобрения перед посевом яровой пшеницы и в качестве весенней подкормки озимой тритикале ручным разбрасыванием весовой нормы, соответствующей определённому уровню азотного питания (средний — N_{45} , высокий — N_{90}). На делянках с низким уровнем азотного питания зерновых культур (N_0) азотное удобрение не вносилось.



Рис. 1. Опыт по изучению влияния азотного питания и засорённости на отражательную способность посева яровой пшеницы

трёх листьев яровой пшеницы (1 июня) и начала выхода в трубку озимой тритикале (15 мая) удалением определённого количества сорных растений в соответствии с заданной величиной проективного покрытия. Методикой проведения данного опыта подразумевалось использование постоянных учётных площадок $0,1 \text{ м}^2$ при наземном визуальном учёте засорённости делянок. Они устанавливались сразу после формирования уровней засорённости в одном экземпляре на каждой делянке. Внутри постоянной площадки вёлся подсчёт численности сорных растений в отдельности по каждому виду, а также определялось общее проективное покрытие почвы сорняками. Полученные данные аппроксимировались на всю площадь делянки 2 м^2 , которая и выступала в качестве единицы измерения при дистанционной съёмке гиперспектральной камерой.

Гиперспектральные измерения отражательной способности посева проводились в фазы выхода в трубку озимой тритикале (30 мая) и кущения яровой пшеницы (19 июня), когда осуществляется принятие решений о целесообразности применения гербицидов. Съёмка велась с помощью беспилотного летательного аппарата марки DJI Matrice M600 Pro и гиперспектральной камеры Pika L (рис. 2).

Диапазон измерения камеры составляет от 390 до 1031 нм, спектральное разрешение — 3,2 нм, количество спектральных каналов — 185, пространственных каналов — 850, размер пикселя — 5,8 нм. Высота полёта коптера была равна 80 м, на земле размещалось полотно, спектральная характеристика которого использовалась в дальнейшем при вычислении коэффициента спектральной яркости (КСЯ). Расчёт КСЯ для каждой делянки опыта, соответствующей определённому варианту, проводился нами по известной формуле (Кондратьев, Федченко, 1982):

$$p(\lambda) = B(\lambda)/B_0(\lambda),$$

где $p(\lambda)$ — КСЯ, $B(\lambda)$ и $B_0(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости исследуемой поверхности в заданном направлении и рассеивающей поверхности калибровочного полотна соответственно. Попытки обнаружить узкие диапазоны спектров, имеющие более выраженные различия изучаемых в опыте факторов, не увенчались успехом. На этом основании пользовались усреднёнными значениями широких спектральных диапазонов.

Рис. 2. Технические средства дистанционного гиперспектрального мониторинга засорённости делянок в опыте



В качестве спектральных диапазонов при анализе данных использовались следующие интервалы длин волн: BLUE — синий (450–520 нм), GREEN — зелёный (530–610 нм), RED — красный (625–680 нм), NIR (*англ.* near infrared) — ближний инфракрасный (880–1031 нм) (Данилов и др., 2020).

Пространственное размещение делянок в опыте с яровой пшеницей в увеличенном масштабе в видимом изображении, полученное с коптера, можно видеть на *рис. 3*.

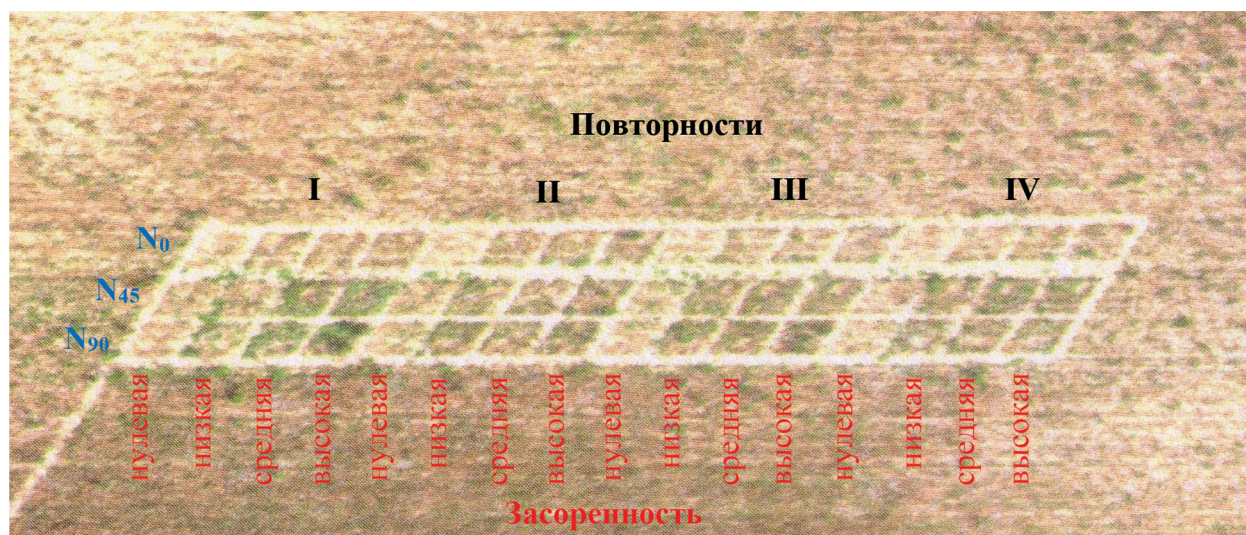


Рис. 3. Пространственное размещение опыта в посеве яровой пшеницы

Обработка данных гиперспектральных измерений заключалась в использовании методов описательной статистики, с помощью которых рассчитывали средние значения и стандартные отклонения коэффициентов отражения, дисперсионного и корреляционного анализа, а также построении спектральных кривых в программе Statistica 11.

Результаты и обсуждение

Посев озимой тритикале, используемый под закладку опыта, характеризовался высокой степенью и малолетним типом засорённости. В фазу выхода в трубку культурных растений на единице площади посева насчитывалось 1011 экз./м² сорных растений при проективном покрытии, равном 31,8 %. Сорная растительность была представлена преимущественно зимующими видами, массовому прорастанию которых способствовала тёплая и продолжительная осень прошлого года. Доминантным видом была фиалка полевая (*Viola arvensis* Murr.), на долю которой приходилось 65,5 % от общей численности сорняков. Среди других видов с заметным обилием можно отметить веронику полевую (*Veronica arvensis* L.), марь белую (*Chenopodium album* L.), пикульники (*Galeopsis tetrahit* L., *Galeopsis bifida* Boenn., *Galeopsis speciosa* Mill.), гречишку выюнковую (*Fallopia convolvulus* (L.) A. Love.) и ромашку непахучую (*Matricaria inodora* L.), густота произрастания которых составляла 64, 63, 46, 41 и 37 экз./м².

Выбранный под закладку опыта посев яровой пшеницы имел сложный корневищно-малолетний тип засорённости. Преобладающим видом являлся осот полевой (*Sonchus arvensis* L.), доля которого в общей численности сорных растений составляла 44,4 %, что соответствовало 288 экз./м². Относительно низкое обилие малолетних видов было обусловлено дефицитом влаги в начальный период роста и развития яровой пшеницы. Такие виды, как фиалка полевая, марь белая, однолетние горошки (*Vicia hirsuta* (L.) S.F. Gray., *Vicia tetrasperma* (L.) Moench.), имели густоту произрастания, равную 114, 83 и 69 экз./м², а торица полевая (*Spergula arvensis* L.), пикульники и гречишка выюнковая — 28, 18 и 17 экз./м².

Всего в фазу кушения пшеницы насчитывалось 650 экз./м² сорных растений, проективное покрытие — 30,6 %.

Фактические значения численности и проективного покрытия сорных растений для каждого варианта опыта, полученные по результатам ручного формирования разных уровней засорённости делянок, представлены в соответствующей таблице (табл. 1). Там же можно видеть, что влияние азотного удобрения сильнее проявлялось на проективном покрытии сорных растений, которое увеличивалось в 1,4–1,6 раза (озимая тритикале) и 1,3–1,9 раза (яровая пшеница), чем на их густоте.

Таблица 1. Засорённость вариантов опыта после ручного удаления сорных растений

Дозы удобрений	Степень засорённости	Озимая тритикале (фаза выхода в трубку)		Яровая пшеница (фаза кушения)	
		Густота сорных растений, экз./м ²	Проективное покрытие, %	Густота сорных растений, экз./м ²	Проективное покрытие, %
N ₀	Нулевая	0	0	0	0
	Низкая	620	5,0	447	9,3
	Средняя	937	16,0	500	16,7
	Высокая	1107	25,0	667	23,3
N ₄₅	Нулевая	0	0	0	0
	Низкая	510	7,3	310	7,7
	Средняя	717	16,7	670	17,0
	Высокая	987	35,0	737	43,3
N ₉₀	Нулевая	0	0	0	0
	Низкая	473	8,3	363	8,0
	Средняя	587	17,0	467	17,3
	Высокая	1117	39,3	680	30,7

Построение спектральных кривых выявило наличие чётких отличий в отражательной способности делянок посева озимой тритикале, различающихся между собой по степени засорённости (рис. 4, см. с. 141). На фоне внесения средних и высоких доз азотных удобрений выявленные спектральные различия просматривались ещё сильнее, что можно связать с действием питательных веществ на рост и развитие сорных растений, это уже было показано на примере увеличения их проективного покрытия.

С практической точки зрения важно различать низкую и среднюю степень засорённости, поскольку только вторая из них предполагает проведение гербицидной обработки. Согласно полученным данным достоверные различия в отражательных свойствах делянок с низкой и средней степенью засорённости фиксировались на каждом из трёх уровней азотного питания, но только в ближнем инфракрасном диапазоне спектра, тогда как видимая часть спектра оказалась неинформативна (табл. 2). Заслуживает внимания обнаруженное различие в NIR-диапазоне между средней (КСЯ = 0,70) и высокой (КСЯ = 0,76) засорённостью делянок озимой тритикале на варианте N₉₀, которое является скорее исключением, подразумевающим возможность применения дифференцированной нормы гербицида. В целом можно отметить, что с увеличением засорённости посева озимой тритикале повышалась его отражательная способность. Так, КСЯ в NIR-диапазоне увеличивался с 0,55 (нулевая засорённость) до 0,67 (высокая засорённость), а коэффициент корреляции между данным показателем и проективным покрытием сорных растений на делянках опыта составлял 0,68 ($p \leq 0,05$). Примечательно, что КСЯ в диапазонах видимой части спектра имели отрицательную связь как с густотой, так и проективным покрытием сорных растений (табл. 3). Схожая закономерность просматривалась и на яровой пшенице, на которой все коэффициенты корреляции были статистически значимыми.

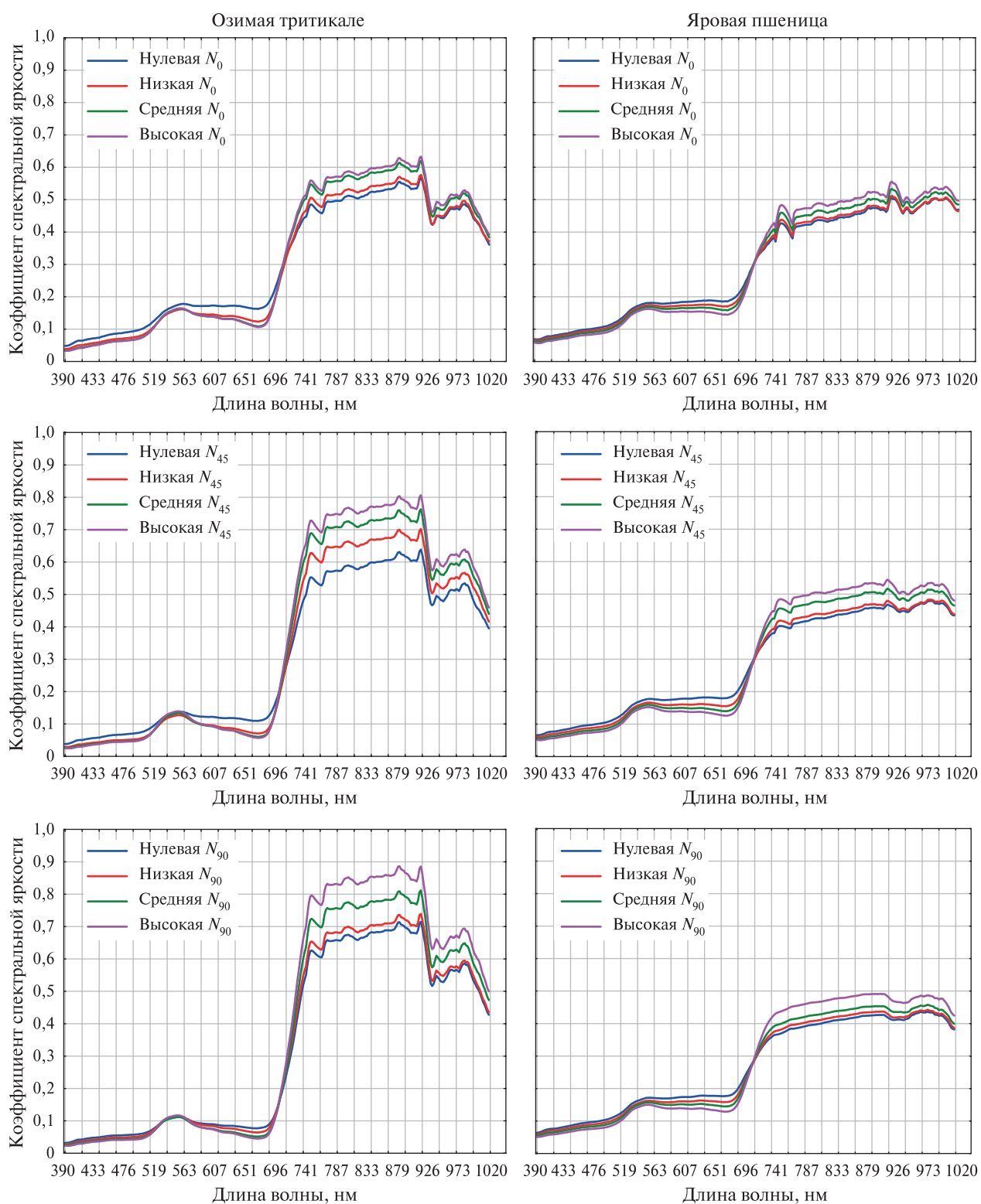


Рис. 4. Графики средних значений КСЯ на вариантах с разным уровнем азотного питания и степени засорённости в фазы выхода в трубку озимой тритикале и кушения яровой пшеницы на Северо-Западе РФ

Таблица 2. Характеристика отражательных свойств посевов озимой тритикале и яровой пшеницы на вариантах с разным уровнем азотного питания и степени засорённости на Северо-Западе РФ

Доза удобрений	Степень засорённости	Усреднённые значения КСЯ							
		Озимая тритикале (фаза выхода в трубку)				Яровая пшеница (фаза кущения)			
		BLUE	GREEN	RED	NIR	BLUE	GREEN	RED	NIR
N ₀	Нулевая	0,100	0,170	0,170	0,490	0,110	0,180	0,190	0,470
	Низкая	0,080	0,150	0,130	0,500	0,100	0,170	0,170	0,470
	Средняя	0,070	0,150	0,120	0,540	0,100	0,160	0,160	0,490
	Высокая	0,070	0,150	0,120	0,550	0,090	0,160	0,150	0,510
	НСР ₀₅	0,007	0,007	0,007	0,011	0,010	0,009	0,015	0,010
N ₄₅	Нулевая	0,070	0,130	0,110	0,550	0,110	0,170	0,180	0,450
	Низкая	0,060	0,110	0,080	0,610	0,100	0,160	0,160	0,460
	Средняя	0,050	0,110	0,070	0,660	0,090	0,150	0,150	0,490
	Высокая	0,050	0,120	0,070	0,690	0,080	0,140	0,130	0,520
	НСР ₀₅	0,006	0,008	0,013	0,035	0,009	0,009	0,012	0,016
N ₉₀	Нулевая	0,060	0,100	0,080	0,620	0,110	0,170	0,180	0,420
	Низкая	0,050	0,100	0,070	0,640	0,100	0,160	0,160	0,430
	Средняя	0,051	0,090	0,060	0,700	0,090	0,150	0,150	0,440
	Высокая	0,050	0,100	0,050	0,760	0,080	0,140	0,130	0,480
	НСР ₀₅	0,007	0,009	0,007	0,028	0,010	0,011	0,017	0,050
Средняя по дозе удобрений (А)	N ₀	0,080	0,160	0,140	0,520	0,100	0,170	0,170	0,490
	N ₄₅	0,060	0,110	0,080	0,630	0,100	0,160	0,160	0,480
	N ₉₀	0,050	0,100	0,070	0,680	0,100	0,160	0,160	0,440
Средняя по степени засорённости (В)	Нулевая	0,080	0,130	0,120	0,550	0,110	0,170	0,180	0,450
	Низкая	0,060	0,120	0,090	0,580	0,100	0,160	0,160	0,450
	Средняя	0,060	0,120	0,080	0,630	0,090	0,150	0,150	0,470
	Высокая	0,060	0,123	0,080	0,670	0,080	0,150	0,140	0,500
НСР ₀₅ (А)		0,004	0,004	0,006	0,018	0,005	0,006	0,018	0,047
НСР ₀₅ (В)		0,004	0,005	0,007	0,019	0,005	0,005	0,007	0,018
НСР ₀₅ (АВ)		0,005	0,007	0,008	0,024	0,010	0,011	0,034	0,089

Примечание: Полужирным начертанием выделены достоверные значения при $p \leq 0,05$.

Также можно отметить очень тесную обратную корреляцию между КСЯ видимого спектра и ближнего инфракрасного, прямую корреляцию между КСЯ синего, зелёного и красного диапазонов спектра (табл. 4).

Схожим эффектом обладали азотные удобрения, увеличивающие надземную массу культурных и сорных растений. Подкормка растений озимой тритикале аммиачной селитрой приводила к увеличению КСЯ в NIR-диапазоне (в 1,2–1,3 раза) и одновременному уменьшению КСЯ в синем (в 1,3–1,6 раза), зелёном (в 1,4–1,6 раза) и красном (в 1,7–2,0 раза) диапазонах спектра. На яровой пшенице такого выраженного эффекта от внесения азотных удобрений, как на озимой тритикале, не просматривалось, поскольку оценка отражательных свойств посева проводилась в фазу кущения, да ещё на фоне острого дефицита влаги. Значения КСЯ в NIR-диапазоне снижались с 0,49 до 0,48 и 0,44 соответственно на вариантах нулевой, средней и высокой удобренности (табл. 2). Изменения отражательных свойств посева яровой пшеницы под влиянием засорённости также были менее выражены, чем на

озимой тритикале в фазу выхода в трубку, что можно видеть по сближенному нахождению спектральных кривых и не всегда достоверно различимым значениям КСЯ в NIR-диапазоне (см. рис. 4, табл. 2). Это указывает на определённые трудности в оценке засорённости посевов яровых зерновых культур, традиционно проводимой в фазу кушения, с помощью дистанционной съёмки гиперспектральной камерой, по крайней мере, в засушливых условиях, не способствующих активному росту и развитию культурной и сорной растительности.

Таблица 3. Коэффициенты корреляции КСЯ разных диапазонов спектра с засорённостью посевов озимой тритикале и яровой пшеницы

КСЯ диапазонов	Озимая тритикале (фаза выхода в трубку)		Яровая пшеница (фаза кушения)	
	Густота сорных растений, экз./м ²	Проективное покрытие, %	Густота сорных растений, экз./м ²	Проективное покрытие, %
BLUE	–0,43	–0,54	–0,67	–0,64
GREEN	–0,09	–0,26	–0,65	–0,60
RED	–0,37	–0,50	–0,68	–0,65
NIR	0,46	0,68	0,59	0,63

Примечание: Полужирным начертанием выделены достоверные значения при $p \leq 0,05$.

Таблица 4. Значения коэффициентов корреляции между КСЯ разных диапазонов спектра

КСЯ диапазонов	Озимая тритикале (фаза выхода в трубку)			Яровая пшеница (фаза кушения)		
	GREEN	RED	NIR	GREEN	RED	NIR
BLUE	0,92	0,99	–0,90	0,98	0,99	–0,53
GREEN		0,95	–0,83		0,99	–0,39
RED			–0,91			–0,51

Примечание: Полужирным начертанием выделены достоверные значения при $p \leq 0,05$.

Для практического применения полученных результатов более востребованными представляются не усреднённые значения КСЯ в NIR-спектре, а диапазон, соответствующий определённой степени засорённости и уровню азотного питания. Диапазон состоит из минимального и максимального значений, полученных за счёт имеющихся в опыте повторностей (табл. 5).

Детальный анализ полученных результатов позволил увидеть близкое сходство в отражательной способности посева озимой тритикале некоторых из вариантов опыта. Например, одинаковую отражательную способность имели неудобренные делянки с высокой засорённостью и делянки с внесением дозы N_{45} и нулевой засорённостью, а также ещё несколько вариантов с разным сочетанием уровня азотного питания и степени засорённости посева (рис. 5, см. с. 145). Это свидетельствует о том, что задача по оценке засорённости посевов с помощью гиперспектральной съёмки может успешно решаться только при всех прочих выровненных условиях, в том числе константного режима азотного или в целом минерального питания в пространстве всего поля. Это достижимо с помощью дифференцированного внесения удобрений, проводимого с учётом фактического наличия питательных веществ на каждом участке поля, предусмотренного точной системой земледелия. Тоже можно отметить и в отношении определения потребности культурных растений в основных элементах питания, которое возможно в отсутствии искажающего влияния на отражательную способность посева сорных растений, проще всего достижимого с помощью качественной, при необходимости пространственно-дифференцированной обработки гербицидами. Тем самым заложенный нами двухфакторный эксперимент наглядно показал, что обе эти задачи не могут успешно решаться одновременно.

Таблица 5. Диапазон значений КСЯ ближнего инфракрасного участка спектра на вариантах с разным уровнем азотного питания и степени засорённости посевов озимой тритикале и яровой пшеницы на Северо-Западе РФ

Доза удобрений	Степень засорённости	КСЯ NIR-диапазона			
		Озимая тритикале (фаза выхода в трубку)		Яровая пшеница (фаза кушения)	
		Мин.	Макс.	Мин.	Макс.
N ₀	Нулевая	0,49	0,50	0,46	0,48
	Низкая	0,49	0,51	0,46	0,49
	Средняя	0,52	0,55	0,48	0,51
	Высокая	0,54	0,57	0,49	0,53
N ₄₅	Нулевая	0,53	0,57	0,43	0,47
	Низкая	0,60	0,62	0,45	0,47
	Средняя	0,63	0,68	0,48	0,52
	Высокая	0,63	0,76	0,51	0,54
N ₉₀	Нулевая	0,58	0,65	0,41	0,44
	Низкая	0,64	0,67	0,41	0,44
	Средняя	0,69	0,71	0,42	0,48
	Высокая	0,74	0,78	0,46	0,50
Средняя по дозе удобрений	N ₀	0,51	0,53	0,47	0,50
	N ₄₅	0,60	0,66	0,47	0,49
	N ₉₀	0,67	0,69	0,43	0,46
Средняя по степени засорённости	Нулевая	0,53	0,57	0,44	0,46
	Низкая	0,58	0,59	0,44	0,46
	Средняя	0,61	0,65	0,46	0,49
	Высокая	0,65	0,70	0,49	0,52

Заключение

По результатам гиперспектральной съёмки с беспилотного летательного аппарата определена отражательная способность посевов озимой тритикале и яровой пшеницы, имеющих разный уровень азотного питания и различающиеся степени засорённости. С увеличением засорённости посева его отражательная способность повышалась, особенно сильно на фоне внесения азотных удобрений, способствующих росту надземной массы сорных растений. В фазу выхода в трубку озимой тритикале изменения в отражательной способности посева под влиянием сорных растений были более выражены, чем в фазу кушения яровой пшеницы в условиях острого дефицита влаги.

Достоверные различия в отражательных свойствах участков с разной степенью засорённости фиксировались только в ближнем инфракрасном диапазоне спектра, тогда как видимая часть спектра оказалась неинформативна. Выявлены статистически значимые положительные коэффициенты корреляции между засорённостью посевов изучаемых зерновых культур и значениями КСЯ в NIR-диапазоне, отрицательные коэффициенты корреляции между КСЯ в диапазонах видимой части спектра с густотой и проективным покрытием сорных растений.

Получены диапазоны значений КСЯ в ближнем инфракрасном участке спектра для каждой степени засорённости и уровня азотного питания озимой тритикале и яровой пшеницы, в том числе для средней и высокой засорённости, в отношении которых целесообразно проведение гербицидной обработки.

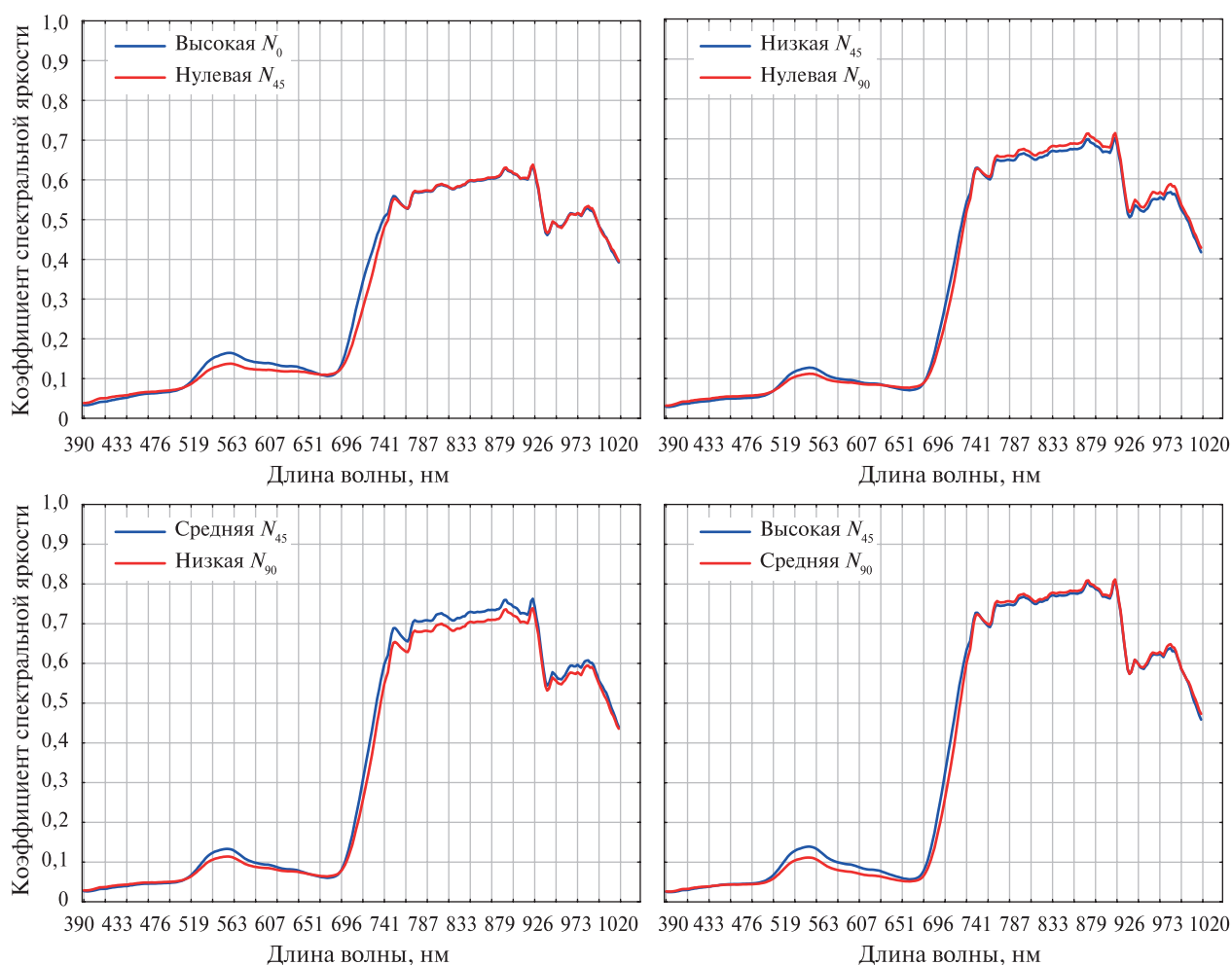


Рис. 5. Схожие графики средних значений КСЯ на вариантах с разным уровнем азотного питания и степени засорённости посева озимой тритикале

Для качественной оценки засорённости посевов посредством гиперспектральной съёмки с беспилотного летательного аппарата требуется максимально выровненное состояние посева культурных растений и отсутствие искажающего влияния иных факторов, способных сказываться на отражательных свойствах растительного покрова. Гиперспектральная съёмка посевов с целью принятия решений о проведении гербицидной обработки и подкормки азотными удобрениями должна проводиться в разные сроки, чтобы избежать ошибок в интерпретации полученных оптических характеристик посевов зерновых культур.

Литература

1. Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Исмаилов В. Я. и др. Общая методика и результаты наземных гиперспектральных исследований сезонного изменения отражательных свойств посевов сельскохозяйственных культур и отдельных видов сорных растений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 113–127. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127.
2. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 216 с.
3. Лысов А. К., Корнилов Т. В. Разработка дистанционных методов съема информации о засоренности посевов сорной растительностью для систем точного земледелия // Техн. обеспечение сельского хоз-ва. 2020. № 1 (2). С. 128–134.
4. Назранов Х. М., Хуцинова М. М. Оценка пространственной неоднородности уровня плодородия и засоренности в пределах поля // Изв. Горского гос. аграрного ун-та. 2018. Т. 55. № 2. С. 41–45.

5. Павлюшин В. А., Долженко В. И., Шпанев А. М., Лаптев А. Б., Гончаров Н. Р., Лысов А. К., Кунгурцева О. В., Гришечкина Л. Д., Буркова Л. А., Голубев А. С., Яковлев А. А., Бабич Н. В., Силаев А. И., Хилевский В. А., Лунева Н. Н., Гагкаева Т. Ю., Вилкова Н. А., Нефедова Л. И., Сухорученко Г. И., Гультияева Е. И., Михайлова Л. А., Баранова О. А., Ульяненко Л. Н., Беспалова Л. А., Аблова И. Б., Филоненко В. А. Интегрированная защита озимой пшеницы // Защита и карантин растений. 2015. № 5. С. 38–71.
6. Савин И. Ю., Шишконокова Е. А., Прудникова Е. Ю. и др. О влиянии засоренности посевов озимой пшеницы на их спектральную отражательную способность // С.-х. биология. 2020. Т. 55. № 1. С. 53–65. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.53rus.
7. Самсонова В. П., Кондрашкина М. Ю., Зоткина А. В. Пространственная структура засоренности единичного угодья // Вестн. защиты растений. 2014. № 3. С. 11–17.
8. Чичкова Е. Ф., Грядунов Д. А., Зайцев В. В. и др. Оценка фитосанитарного состояния полей самарского полигона по данным эшелонированного мониторинга // Исслед. Земли из космоса. 2022. № 5. С. 74–86. DOI: 10.31857/S0205961422050062.
9. Шпаар Д., Сорока С. В., Вартенберг Г. Возможности снижения расхода гербицидов в экологически обоснованном земледелии // Информац. бюл. ВПРС МОББ. 2002. № 33. С. 179–190.
10. Шпанев А. М. Влияние азотных удобрений на фитосанитарное состояние и потери урожая яровой пшеницы от вредных организмов в Северо-Западном регионе // Агрохимия. 2016. № 9. С. 62–69.
11. Шпанев А. М. Вредоносность сорных растений в посевах пшеницы озимой на Северо-Западе России // Вестн. защиты растений. 2018. № 2 (96). С. 42–46.
12. Шпанев А. М. Экспериментальная база для дистанционного зондирования фитосанитарного состояния агроэкосистем на Северо-Западе РФ // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 61–68. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
13. Шпанев А. М. Влияние минеральных удобрений на пространственное размещение сорных растений в посевах ярового ячменя // Плодородие. 2022. № 2 (125). С. 8–12. DOI: 10.25680/S19948603.2022.125.02.
14. Шпанев А. М. Вредоносность сорных растений в агроценозе овса с подсевом многолетних трав на Северо-Западе РФ // Вестн. российской с.-х. науки. 2024. № 3. С. 16–20. DOI: 10.31857/10.31857/S2500208224030031.
15. Шпанев А. М., Смук В. В. Пространственное размещение сорных растений в посадках картофеля // Земледелие. 2019. № 2. С. 42–45. DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10212.
16. Шпанев А. М., Смук В. В. Применение гербицидов на основе спектральных измерений // Земледелие. 2021. № 1. С. 37–40. DOI: 10.24411/0044-3913-2021-10109.
17. Шпанев А. М., Смук В. В. Изменение спектральных характеристик культурных и сорных растений под влиянием минеральных удобрений в агроценозах Северо-Запада России // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 3. С. 165–177. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-165-177.
18. Шпанев А. М., Смук В. В. Отражательные свойства листовой поверхности люпина узколистного и сорных растений в условиях Северо-Запада России // Агрофизика. 2024. № 1. С. 35–40. DOI: 10.25695/AGRPH.2024.01.05.
19. Шпанев А. М., Лекомцев П. В., Петрушин А. Ф., Смук В. В. Методика фитосанитарного мониторинга агроландшафтов с использованием физико-технической базы точного земледелия. СПб.: ФГБНУ АФИ, 2017. 32 с.
20. Шпанев А. М., Смук В. В., Петрушин А. Ф. Влияние микрорельефа поля на пространственное размещение сорных растений // Агрофизика. 2020. № 4. С. 20–26. DOI: 10.25695/AGRPH.2020.04.04.
21. Gerhards R., Sökefeld M., Timmermann C., Krohmann P., Kühbauch W. Precision weed control — more than just saving herbicides // Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Sonderheft. 2000. V. 17. P. 179–186.
22. Izquierdo J., Blanco-Moreno J. M., Chamorro L. et al. Spatial distribution of weed diversity within a cereal field // Agronomy for Sustainable Development. 2009. V. 29. P. 491–496. DOI: 10.1051/agro/2009009.
23. Lettner J., Hank K., Wagner P. Ökonomische Potenziale der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung // Berichte über Landwirtschaft. 2001. V. 79. No. 1. P. 107–139.

Application of hyperspectral imaging from an unmanned aerial vehicle to assess weed infestation of grain crops

A. M. Shpanev¹, A. F. Petrushin²

¹ Agrophysical Research Institute, Saint Petersburg 195220, Russia
E-mail: ashpanev@mail.ru

² Saint Petersburg State University, Saint Petersburg 199034, Russia
E-mail: alfiks@mail.ru

Weed vegetation is one of the most significant factors limiting productivity potential of grain crops in the North-West Region of the Russian Federation. Modern trends in monitoring weed infestation of agrocenoses include the use of unmanned aerial vehicles and hyperspectral imaging with coordinate reference to the terrain. The study of the reflectivity of winter triticale and spring wheat crops depending on the degree of weed infestation and the level of nitrogen nutrition was carried out in 2022–2023 at the experimental base of Menkovsky Branch of Agrophysical Research Institute using hyperspectral imaging from an unmanned aerial vehicle. The experimental design included three levels of nitrogen nutrition (low, medium, high) and four degrees of crop weed infestation (zero, weak, medium, strong). According to the research results, it was determined that with an increase in crop weed infestation its reflectivity grew, especially strongly against the background of application of nitrogen fertilizers, which promoted growth of the aboveground mass of weeds. During the winter triticale booting phase, changes in the reflectivity of the crop under the influence of weeds were more pronounced than during the tillering phase of spring wheat under conditions of acute moisture deficit. Reliable differences in the reflectivity of plots with different degrees of weed infestation were recorded only in the near-infrared (NIR) range of the spectrum. Average values of the spectral reflectance coefficient (SRC) within this spectrum region increased from 0.49 to 0.76 and from 0.42 to 0.52, respectively, in winter triticale and spring wheat crops. The revealed patterns were confirmed in the form of statistically significant positive correlation coefficients between the SRC in the NIR range, the number of weeds (0.46 and 0.59) and their projective cover (0.68 and 0.63). The ranges of SRC values in the NIR spectrum for each degree of weed infestation and level of nitrogen nutrition of winter triticale and spring wheat were obtained, including for medium and high weed infestations, for which herbicide treatment is advisable.

Keywords: winter triticale, *Triticosecale Wittm.* Ex A. Camus, spring wheat, *Triticum aestivum* L., weeds, nitrogen fertilizers, unmanned aerial vehicles, hyperspectral measurements, reflectance, spectral radiance coefficient

Accepted: 17.03.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-136-148

References

1. Danilov R. Yu., Kremneva O. Yu., Ismailov V. Ya. et al., General methods and results of ground hyperspectral studies of seasonal changes in the reflective properties of crops and certain types of weeds, *Sovremennye problemy dstantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 1, pp. 113–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127.
2. Kondratyev K. Ya., Fedchenko P. P., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' i raspoznavanie rastitel'nosti* (Spectral reflectivity and recognition of vegetation), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982, 216 p. (in Russian).
3. Lysov A. K., Kornilov T. V., Development of remote methods for collecting information on weed contracting of crops for precision farming systems, *Tekhnicheskoe obespechenie sel'skogo khozyaistva*, 2020, No. 1 (2), pp. 128–134 (in Russian).
4. Nazranov Kh. M., Khutsinova M. M., Estimation of spatial heterogeneity in fertility and weediness within the field, *Izvestiya Gorskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2018, V. 55, No. 2, pp. 41–45 (in Russian).
5. Pavlyushin V. A., Dolzhenko V. I., Shpanev A. M., Laptiev A. B., Goncharov N. R., Lysov A. K., Kungurtseva O. V., Grishechkina L. D., Burkova L. A., Golubev A. S., Yakovlev A. A., Babich N. V., Silaev A. I., Khilevskiy V. A., Luneva N. N., Gagkaeva T. Yu., Vilkova N. A., Nefedova L. I., Sukhoruchenko G. I., Gulyaeva E. I., Mikhailova L. A., Baranova O. A., Ul'yanenko L. N., Bepalova L. A., Ablova I. B., Filonenko V. A., Integrated protection of winter wheat, *Zashchita i karantin rasteniy*, 2015, No. 5, pp. 38–71 (in Russian).

6. Savin I. Yu., Shishkonakova E. A., Prudnikova E. Yu. et al., About effect of weeds on spectral reflectance properties of winter wheat canopy, *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*, 2020, V. 55, No. 1, pp. 53–65 (in Russian), DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.53rus.
7. Samsonova V. P., Kondrashkina M. Yu., Zotkina A. V., Spatial structure of weed infestation of a single land plot, *Vestnik zashchity rastenii*, 2014, No. 3, pp. 11–17 (in Russian).
8. Chichkova E. F., Gryadunov D. A., Zaitsev V. V. et al., Assessment of the phytosanitary condition of the fields of the samara test site according to tiered monitoring data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2022, No. 5, pp. 74–86 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961422050062.
9. Shpaar D., Soroka S. V., Vartenberg G., Possibilities of reducing herbicide consumption in environmentally sound agriculture, *Informatsionnyi byulleten' Vostochnopalearkticheskoi sektsii Mezhdunarodnoi organizatsii po biologicheskoi bor'be s vrednymi zhivotnymi i rasteniyami*, 2002, No. 33, pp. 179–190 (in Russian).
10. Shpanev A. M., The influence of nitrogen fertilizers on phytosanitary condition and yield losses of spring wheat from pests in the North-West region, *Agrokhiimiya*, 2016, No. 9, pp. 62–69 (in Russian).
11. Shpanev A. M., Harmfulness of weeds in winter wheat crops in the North-West of Russia, *Vestnik zashchity rasteniy*, 2018, No. 2 (96), pp. 42–46 (in Russian).
12. Shpanev A. M., Experimental basis for remote sensing of phytosanitary condition of agroecosystems in the North-West of the Russian Federation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, V. 16, No. 3, pp. 61–68 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
13. Shpanev A. M., Effect of mineral fertilizers on the spatial distribution of weeds in spring barley crops, *Plodorodie*, 2022, No. 2 (125), pp. 8–12 (in Russian), DOI: 10.25680/S19948603.2022.125.02.
14. Shpanev A. M., The harmfulness of weeds in oat agroecosystem with underseeding of perennial grasses in the North-West of the Russian Federation, *Vestnik Rossiyskoi sel'skokhozyaystvennoi nauki*, 2024, No. 3, pp. 16–20 (in Russian), DOI: 10.31857/10.31857/S2500208224030031.
15. Shpanev A. M., Smuk V. V., Spatial distribution of weeds in potato plantings, *Zemledeliye*, 2019, No. 2, pp. 42–45 (in Russian), DOI: 10.24411/0044-3913-2019-10212.
16. Shpanev A. M., Smuk V. V., Application of herbicides based on spectral measurements, *Zemledeliye*, 2021, No. 1, pp. 37–40 (in Russian), DOI: 10.24411/0044-3913-2021-10109.
17. Shpanev A. M., Smuk V. V., Changes in the spectral characteristics of cultivated and weed plants under the influence of mineral fertilizers in agroecosystems of the North-West of Russia, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, V. 19, No. 3, pp. 165–177 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-165-177.
18. Shpanev A. M., Smuk V. V., Narrow-leaved lupin and weeds leaf surface reflective properties in conditions of North-Western Russia, *Agrofizika*, 2024, No. 1, pp. 35–40 (in Russian), DOI: 10.25695/AGRPH.2024.01.05.
19. Shpanev A. M., Lekomtsev P. V., Petrushin A. F., Smuk V. V., *Metodika fitosanitarnogo monitoringa agrolandshaftov s ispol'zovaniem fiziko-tekhnicheskoi bazy tochnogo zemledeliya* (Methodology of phytosanitary monitoring of agricultural landscapes using the physical and technical base of precision farming), Saint Petersburg: FGBNU AFI, 2017, 32 p. (in Russian).
20. Shpanev A. M., Smuk V. V., Petrushin A. F., Influence of field microrelief on spatial distribution of weeds, *Agrofizika*, 2020, No. 4, pp. 20–26 (in Russian), DOI: 10.25695/AGRPH.2020.04.04.
21. Gerhards R., Sökefeld M., Timmermann C., Krohmann P., Kühbauch W., Precision weed control — more than just saving herbicides, *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Sonderheft*, 2000, V. 17, pp. 179–186.
22. Izquierdo J., Blanco-Moreno J. M., Chamorro L. et al., Spatial distribution of weed diversity within a cereal field, *Agronomy for Sustainable Development*, 2009, V. 29, pp. 491–496, DOI: 10.1051/agro/2009009.
23. Lettner J., Hank K., Wagner P., Ökonomische Potenziale der teilflächenspezifischen Unkrautbekämpfung, *Berichte über Landwirtschaft*, 2001, V. 79, No. 1, pp. 107–139.