Изучение отражательных свойств растений картофеля, поражённых фитофторозом, посредством наземных гиперспектральных измерений

А. М. Шпанев [1], Д. В. Русаков [1], В. В. Смук [2], А. В. Хютти [2]

[1] *Агрофизический научно-исследовательский институт*
Санкт-Петербург, 195220, Россия
E-mails: ashpanev@mail.ru, rdv_vgsha@mail.ru
[2] *Всероссийский научно-исследовательский институт защиты растений*
Пушкин, Санкт-Петербург, 196608, Россия
E-mails: vvsmuk@mail.ru, alexanderkhyutti@mail.ru

Фитофтороз считается одним из самых распространённых и особо опасных заболеваний картофеля на Северо-Западе России. Этим обстоятельством определяется важность своевременного выявления заражённости растений и проведения фунгицидных обработок ещё до видимых симптомов поражения листьев. Современные возможности приборной базы предполагают, что решение этой задачи может быть достижимо с помощью гиперспектральной съёмки. Изучение особенностей отражательной способности поражённых и не поражённых фитофторозом растений картофеля проводилось на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института в 2020 и 2022 гг. Объектами гиперспектральных наземных измерений выступали растения восприимчивого (Ланорма) и устойчивого (Синеглазка) сортов картофеля, удобренные ($N_{90}P_{90}K_{90}$) и неудобренные ($N_0P_0K_0$), не поражённые (4-кратная фунгицидная обработка) и поражённые фитофторозом в сильной степени (искусственный инфекционный фон). По результатам исследований определено, что с увеличением развития заболевания отражательная способность растений снижалась, особенно сильно на восприимчивом сорте и при внесении полного минерального удобрения, которые сильнее поражались фитофторозом. На 5-е сутки после искусственного заражения отмечалось достоверное снижение коэффициента спектральной яркости в зелёном диапазоне спектра, на 20-е и 29-е сутки — в ближнем инфракрасном. Использование спектральных индексов, отражающих содержание пигментов в листьях, позволило выявлять изменения в отражательной способности растений картофеля, поражённых фитофторозом. Наиболее перспективными оказались индексы отражения каротиноидов CAR1 (*англ.* Carotenoid Reflectance Index 1) и CAR2 (*англ.* Carotenoid Reflectance Index 2), значения которых достоверно увеличивались под влиянием патогена в абсолютном большинстве проведённых измерений, включая самое раннее, выполненное на 2-е сутки после заражения. Индексы Гительсона и Мерзляка GM1 (*англ.* Gitelson and Merzlyak Index 1) и GM2 (*англ.* Gitelson and Merzlyak Index 2) лучше всего реагировали на заражение растений картофеля фитофторозом на 12-е сутки, а индекс флавонолов FRI (*англ.* Reflection Index of Flavonols), из-за малого количества случаев с достоверными различиями в отражательных свойствах растений, имеющих разную степень поражения фитофторозом, оказался менее надёжным и подходящим для решения поставленной нами задачи.

Ключевые слова: картофель (*Solanum tuberosum* L.), фитофтороз, искусственный инфекционный фон, сортовая устойчивость, минеральные удобрения, наземные гиперспектральные измерения, коэффициент спектральной яркости, спектральные индексы

Одобрена к печати: 16.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-258-271

Введение

Эффективность защитных мероприятий против болезней культурных растений во многом определяется возможностью раннего обнаружения инфекции и источников её происхождения (Соколов и др., 2018). Наибольшие перспективы связаны с использованием дистанционных методов диагностики состояния посевов сельскохозяйственных культур, основанных на возможности детектирования изменений состояния растительности в резуль-

тате регистрации отражённого от них электромагнитного излучения (Исмаилов и др., 2012). Имеющиеся в литературе сведения довольно фрагментарны и противоречивы. Так, по данным одних исследований, изучение и оценка спектральной яркости объекта в конкретных узкополосных спектральных каналах позволяет выделять скрытые аномальные изменения, которые невозможно заметить в посеве без применения специальных методик или приборов (Бекмухамедов, Карабкина, 2013). По другим данным, первые видимые изменения спектральных характеристик исследуемых растительных фонов, которые проявились в виде снижения показателей коэффициента спектральной яркости (КСЯ) в ближнем инфракрасном диапазоне спектра, были отмечены по результатам анализа данных на момент проявления первых признаков болезней (Кремнева и др., 2020). На сегодняшний день изучены спектральные характеристики растений озимой пшеницы, поражённых возбудителем корневой гнили (Гурова и др., 2019), ржавчинными болезнями и жёлтой пятнистостью (Кремнева и др., 2022; Соколов и др., 2018), а также для основных болезней озимого ячменя (Данилов и др., 2018, 2021), церкоспороза сахарной свёклы (Мударисов и др., 2025). Несмотря на продемонстрированные примеры, использование гиперспектральных измерений в решении задач раннего обнаружения заболевания в посеве и оптимизации сроков проведения фунгицидных обработок находится в процессе изучения как в нашей стране, так и за рубежом.

Одна из основных продовольственных и технических культур во многих странах мира — картофель. В странах с развитым картофелеводством (Китай, США, Германия, Нидерланды) её урожайность достигает 23–46 т/га (Деревягина и др., 2020). В России эта культура занимает более 2,1 млн га, а валовой сбор составляет 30,2 млн т. При этом средняя урожайность в стране — около 14–17 т/га, тогда как потенциальная возможность этой культуры позволяет получать урожаи в 30–40 т/га и выше. Для удовлетворения потребностей страны Россия ежегодно импортирует 500 тыс. т картофеля (Чугунов и др., 2016).

Ведущее место по посадочным площадям и валовому сбору картофеля в нашей стране, несмотря на отрицательные тенденции последних лет, по-прежнему занимает Северо-Запад России. Агроклиматические условия региона, такие как умеренная температура воздуха и обильное увлажнение в течение длительного времени, благоприятны для сильного развития многих болезней этой культуры, среди которых наибольшее хозяйственное значение имеет фитофтороз (Белов, Хютти, 2018). Высокая вредоносность заболевания проявляется в виде частых случаев эпифитотийного развития и больших потерь урожая (Шпанев и др., 2021).

Цель настоящей работы — изучение влияния фитофтороза на отражательную способность растений картофеля посредством наземных гиперспектральных измерений в зависимости от уровня минерального питания и устойчивости сорта на Северо-Западе России.

Материалы и методы

Изучение отражательной способности растений картофеля, поражённых фитофторозом, проводилось в 2020 и 2022 гг. в трёхфакторном мелкоделяночном опыте на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института, расположенного в Гатчинском районе Ленинградской области (Шпанев, 2019). Среди изучаемых факторов были следующие:

- сорт (восприимчивый к фитофторозу — Ланорма, устойчивый — Синеглазка);
- уровень минерального питания (низкий — $N_0P_0K_0$, высокий — $N_{90}P_{90}K_{90}$);
- уровень развития фитофтороза (нулевой — интенсивная фунгицидная защита, высокий — искусственный инфекционный фон).

Минеральные удобрения вносились в виде азофоски в весовом количестве, равном 2,4 кг/делянка (42 м^2), под вспашку, проводимую перед нарезкой гребней и посадкой. Искусственный инфекционный фон создавался при помощи нанесения на растения картофеля споровой массы местной расы возбудителя *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. Заражение осуществлялось 16 и 27 июля соответственно в 2020 и 2022 гг. в фазу цветения кар-

тофеля в вечернее время в условиях пасмурной погоды, которой предшествовало выпадение осадков. Инфекционная нагрузка состояла из 4 л мицелия (50 тыс. спорангиев/1 мл), разбавленного в дистиллированной воде до 8 л, вносимых на площади 110 м^2. Данный вариант опыта не подвергался обработке фунгицидами.

Интенсивная фунгицидная защита подразумевала под собой 4-кратную обработку вегетирующих растений картофеля ранцевым опрыскивателем SOLO 475 Classic на соответствующих делянках опыта препаратом Ридомил Голд МЦ, водно-диспергируемые гранулы из расчёта 2,5 кг/га (2020), и Акробат МЦ, водно-диспергируемые гранулы в норме 2 кг/га (2022). В 2020 г. первая обработка проводилась в период смыкания рядков (10 июля), последующие — с интервалом в 10–14 дней (21 июля, 3 и 14 августа), в 2022 г. — 13, 27 июля, 9 и 18 августа.

Размер делянки составлял 42 м^2 (4,2×10 м), общая площадь под опытом — 392 м^2 (19,6×20 м). Повторность 4-кратная. Повторностями выступали четыре внутренних рядка на делянке, боковые — защитками (*рис. 1*).

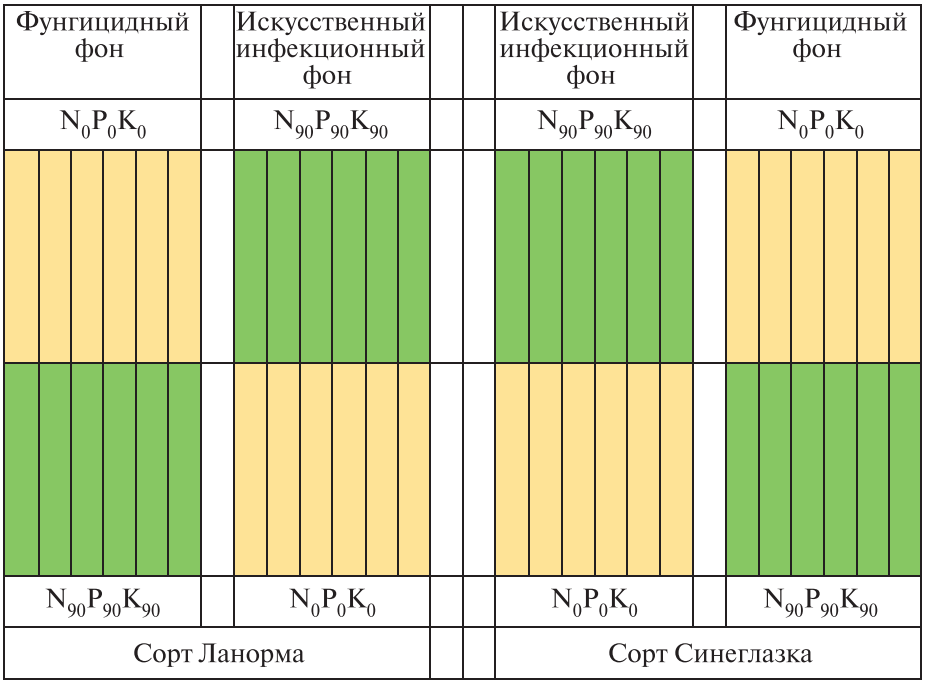

Рис. 1. Пространственное размещение вариантов опыта

В 2020 г. изучение отражательной способности растений картофеля, поражённых и не поражённых фитофторозом, осуществлялось посредством наземного спектрометрирования полевым портативным спектрорадиометром PSR-1100 (Spectral Evolution). Спектральный диапазон измерений составлял 320–1100 нм, спектральное разрешение 3 нм, измеряемая величина — спектральная плотность энергетической яркости, единица измерения — Вт·см$^{-2}$·ср$^{-1}$·нм$^{-1}$. Расчёт КСЯ проводился нами по формуле (Кондратьев, Федченко, 1982):

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

где $p(\lambda)$ — КСЯ; $B(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости исследуемой поверхности в заданном направлении; $B_0(\lambda)$ — спектральная плотность энергетической яркости идеально рассеивающей поверхности с единичным коэффициентом отражения, в качестве которой использовалась калибровочная панель, освещённая так же, как и исследуемая поверхность. В качестве спектральных диапазонов были выбраны следующие интервалы длин волн (Данилов и др., 2020): Blue (450–520 нм), Green (530–610 нм), Red (625–680 нм) и NIR (*англ.* near infrared) (880–1100 нм).

Измерения проводили в ясную солнечную погоду при максимальной высоте Солнца (12–14 ч) на листьях растений картофеля верхнего яруса в перпендикулярном направлении к поверхности земли на высоте ~1 м, так как в этом случае обеспечивается наименьшая степень зеркального отражения для большинства поверхностей (Данилов и др., 2020). На каждом варианте опыта измерения проводились на 40 растениях (по 10 на каждом рядке), тех же самых, на которых систематически определялись степень поражения в баллах (0 — не поражено, 1 — поражено менее 10 % листовой поверхности, 2 — поражено от 10 до 25 %, 3 — 26–50 %, 4 — 51–75 %, 5 — более 75 %) и развитие фитофтороза по соответствующей формуле (Методические..., 2009):

$$R = \sum(ab)/N,$$

где R — развитие болезни (в %); $\sum(ab)$ — сумма произведения числа больных растений a на соответствующий им балл или долю (в %) поражения b; N — общее количество растений в пробе.

Измерения соответствовали 5, 20 и 29-м суткам после заражения (21 июля, 5 и 14 августа).

В 2022 г. при изучении отражательных свойств листовой поверхности картофеля использовался малогабаритный оптоволоконный спектрометр Ocean Optics USB2000 фирмы Ocean Insight (США) с диапазоном измерений от 400 до 900 нм. Замеры осуществлялись 29 июля, 9 и 20 августа или на 2-е, 12-е и 23-и сутки после заражения растений фитофторозом в одно и то же время суток на 20 растениях с каждой делянки. По результатам проведённых измерений рассчитывались спектральные индексы отражения, оценивающие содержание в листьях хлорофилла, антоцианов, флавонолов и каротиноидов (*табл. 1*). В этой работе представлены значения тех индексов, которые достоверно реагировали на искусственное заражение картофеля споровой массой патогена.

Таблица 1. Спектральные индексы отражения, характеризующие содержание пигментов в листьях картофеля

Индекс	Расчётная формула	Источник
Индекс хлорофилла ChlRI (*англ.* Chlorophyll Reflectance Index)	$(R_{750} - R_{705})/(R_{750} + R_{705} - 2R_{445})$	(Sims, Gamon, 2002)
Фотохимический индекс отражения PRI (*англ.* Photochemical Reflectance Index)	$(R_{570} - R_{531})/(R_{570} + R_{531})$	(Gamon et al., 1992)
Индекс флавонолов FRI (*англ.* Reflection Index of Flavonols)	$((1/R_{410}) - (1/R_{460}))R_{800}$	(Merzlyak et al., 2005)
Структурный индекс интенсивности пигментов SIPI (*англ.* Structural Independent Pigment Index)	$(R_{800} - R_{445})/(R_{800} - R_{680})$	(Peñuelas et al., 1995b)
Индекс отражения антоцианов ARI (*англ.* Anthocyanin Reflectance Index)	$(1/R_{550}) - (1/R_{700})$	(Gitelson et al., 2001)
Индекс старения растений PSRI (*англ.* Plant Senescence Reflectance Index)	$(R_{680} - R_{500})/R_{750}$	(Merzlyak et al., 1999)
Индекс отражения каротиноидов CAR1 (*англ.* Carotenoid Reflectance Index 1)	$(1/R_{510}) - (1/R_{550})$	(Gitelson et al., 2002)
Индекс отражения каротиноидов CAR2 (*англ.* Carotenoid Reflectance Index 2)	$(1/R_{510}) - (1/R_{700})$	(Gitelson et al., 2002)
Индекс соотношения пигментов SRPI (*англ.* Simple Ratio Pigment Index)	R_{430}/R_{680}	(Peñuelas et al., 1995a)
Нормализованный индекс хлорофилла NPCI (*англ.* Normalized Chlorophyll Index)	$(R_{680} - R_{430})/(R_{680} + R_{430})$	(Peñuelas et al., 1994)
Индекс Гительсона и Мерзляка GM1 (*англ.* Gitelson and Merzlyak Index 1)	R_{750}/R_{550}	(Gitelson, Merzlyak, 1996)
Индекс Гительсона и Мерзляка GM2 (*англ.* Gitelson and Merzlyak Index 2)	R_{750}/R_{700}	(Gitelson, Merzlyak, 1996)
Нормализованный индекс феофитинизации NPQI (*англ.* Normalized Chlorophyll Index)	$(R_{415} - R_{435})/(R_{415} + R_{435})$	(Barnes et al., 1992)

Статистическая обработка полученных данных проводилась в программе Statistica 6 и состояла из расчёта средней арифметической, дисперсии и стандартного отклонения, а также *p*-критерия, который использовался при оценке достоверности различий спектральных характеристик поражённых и не поражённых фитофторозом растений картофеля.

Результаты и обсуждение

Погодные условия 2020 и 2022 гг. не были благоприятными для развития фитофтороза из-за недостаточного увлажнения в первой половине вегетации картофеля. В этой ситуации искусственное заражение растений оказалось более чем оправданно, но и оно не гарантировало требуемого сильного поражения культуры фитофторозом.

В 2020 г. первые симптомы поражения фитофторозом были обнаружены только по прошествии 15 сут от даты искусственного заражения, а на 20-е сутки развитие заболевания на устойчивом сорте варьировало в зависимости от фона удобренности от 1,7 до 5,3 %, на восприимчивом — от 6,2 до 6,3 %. За девять последующих дней развитие фитофтороза увеличилось до 29,9–51,7 % и 53,5–62,5 % на сортах Синеглазка и Ланорма соответственно. В 2022 г. заражение делянок опыта проводилось на 11 сут позднее, но видимые следы поражения фитофторозом отмечались уже на 9-е сутки, когда развитие заболевания на разных вариантах опыта составляло от 0,1 до 1,4 %. На 20-е сутки после заражения проявлялись чёткие различия между поражённостью устойчивого и неустойчивого сортов, а также неудобренного и удобренного вариантов (*табл. 2*). Последний из них поражался фитофторозом в 2–4 раза сильнее, а по итоговым показателям развития, определяемым на 26-е сутки, в 1,3–2,2 раза. На устойчивом сорте эти различия оказались более выражены. Итоговое сильное поражение картофеля фитофторозом отмечалось на делянках с искусственным заражением растений как в 2020 г., так и 2022 г.

Таблица 2. Динамика развития фитофтороза на растениях картофеля в опыте

Сорт	Доза удобрений	Вариант опыта	Развитие болезни, %						
			2020 г.				2022 г.		
			21.07	27.07	05.08	14.08	05.08	16.08	24.08
Синеглазка	$N_0P_0K_0$	Фунгицид	0	0	0	0	0	0,7	0
		Фитофтороз			1,7	29,9	0,3	10,0	23,2
	$N_{90}P_{90}K_{90}$	Фунгицид			0	0,1	0	0,6	1,8
		Фитофтороз			5,3	51,7	1,4	39,6	50,2
Ланорма	$N_0P_0K_0$	Фунгицид			0	0,4	0	0,3	0,2
		Фитофтороз			6,2	53,5	0,1	22,1	54,8
	$N_{90}P_{90}K_{90}$	Фунгицид			0	0	0	0,2	0
		Фитофтороз			6,3	62,5	1,1	44,6	71,4

Первое внимание уделялось изменениям, происходящим в инкубационный период развития болезни, когда внешние симптомы поражения отсутствуют на растениях. На 5-е сутки после заражения отражательная способность листьев картофеля на делянках с искусственным инфекционным фоном практически ничем не отличалась от растений, не подвергавшихся воздействию патогена. Спектральные кривые между данными вариантами опыта оказались максимально сближены на разных фонах удобренности и обоих сортах, независимо от степени их устойчивости к фитофторозу (*рис. 2*). Единственные достоверные изменения, которые следует обязательно отметить, это снижение КСЯ в зелёном диапазоне спектра (*табл. 3*).

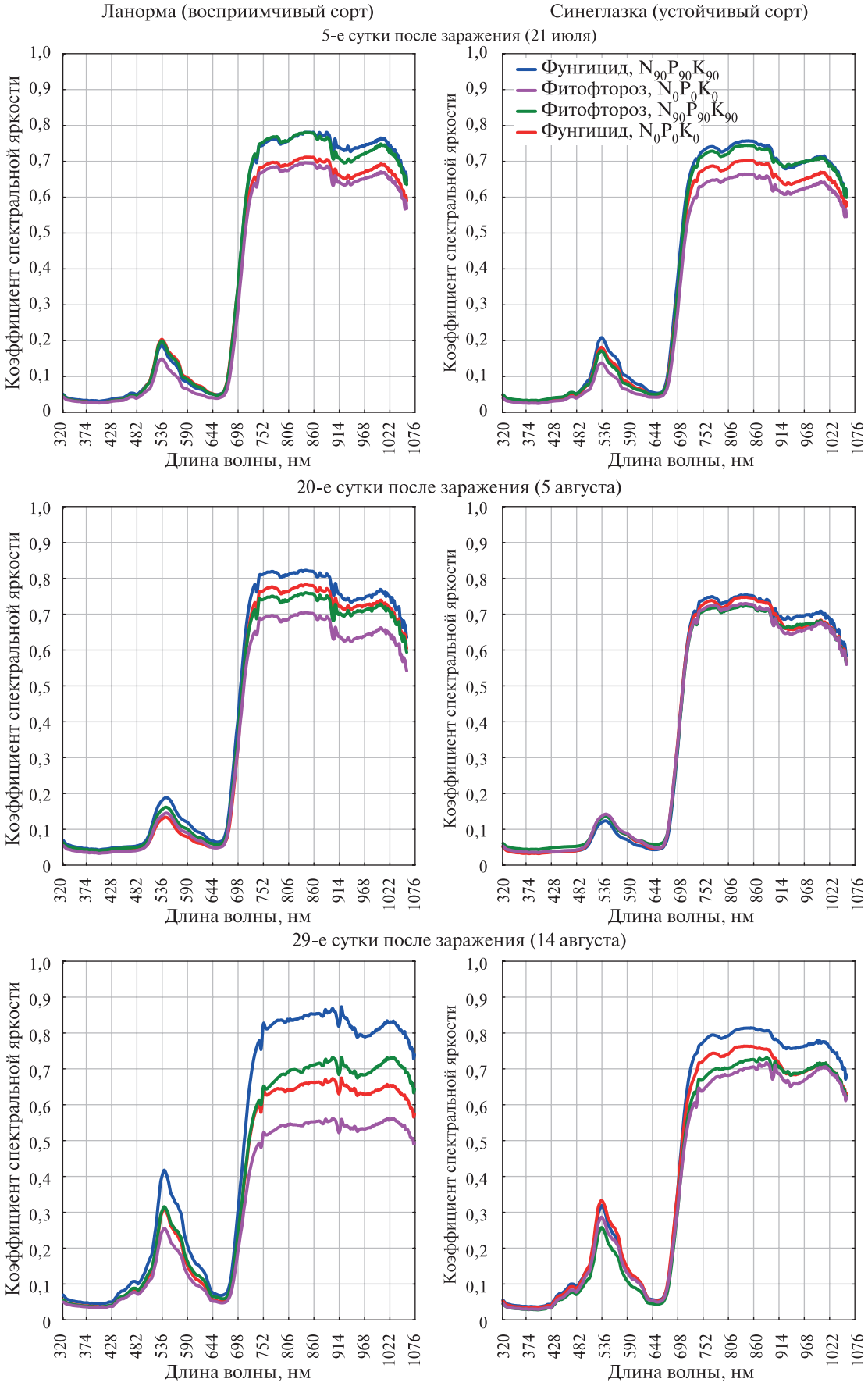

Рис. 2. Графики средних значений КСЯ на вариантах с разным уровнем удобренности и поражённости растений картофеля фитофторозом на Северо-Западе РФ

Таблица 3. Характеристика отражательных свойств растений картофеля на изучаемых вариантах опыта в разные даты измерений (2020)

Доза удобрений	Вариант опыта	Усреднённые значения КСЯ в определённом диапазоне спектра							
		Ланорма				Синеглазка			
		Blue	Green	Red	NIR	Blue	Green	Red	NIR
		5-е сутки после заражения (*21 июля*)							
$N_0P_0K_0$	Фунгицид	0,05±0,02	0,15±0,04	0,06±0,01	0,68±0,03	0,06±0,01	0,13±0,03	0,05±0,01	0,66±0,03
	Фитофтороз	0,05±0,01	0,11±0,03	0,04±0,004	0,66±0,03	0,05±0,01	0,10±0,03	0,05±0,01	0,63±0,02
	p-критерий	0,242	**0,020**	0,060	0,811	0,154	**0,019**	0,133	0,509
$N_{90}P_{90}K_{90}$	Фунгицид	0,06±0,01	0,13±0,04	0,06±0,01	0,75±0,03	0,06±0,02	0,15±0,04	0,06±0,01	0,71±0,03
	Фитофтороз	0,05±0,02	0,14±0,04	0,06±0,01	0,74±0,03	0,06±0,01	0,12±0,03	0,05±0,01	0,71±0,03
	p-критерий	0,227	0,898	0,650	0,097	0,687	**0,031**	0,213	0,855
		20-е сутки после заражения (*5 августа*)							
$N_0P_0K_0$	Фунгицид	0,05±0,01	0,11±0,02	0,05±0,004	0,74±0,04	0,05±0,01	0,11±0,02	0,05±0,01	0,69±0,04
	Фитофтороз	0,05±0,01	0,12±0,02	0,06±0,01	0,66±0,04	0,04±0,01	0,12±0,02	0,06±0,01	0,68±0,04
	p-критерий	0,723	0,480	0,846	**0,049**	0,712	0,780	0,701	0,788
$N_{90}P_{90}K_{90}$	Фунгицид	0,06±0,01	0,15±0,03	0,08±0,01	0,77±0,04	0,04±0,01	0,10±0,02	0,05±0,004	0,71±0,04
	Фитофтороз	0,06±0,01	0,13±0,02	0,07±0,01	0,72±0,03	0,06±0,01	0,11±0,02	0,06±0,004	0,68±0,03
	p-критерий	0,516	0,146	0,274	**0,046**	0,080	0,079	**0,004**	0,447
		29-е сутки после заражения (*14 августа*)							
$N_0P_0K_0$	Фунгицид	0,09±0,02	0,22±0,06	0,06±0,02	0,65±0,02	0,10±0,03	0,25±0,07	0,07±0,02	0,72±0,03
	Фитофтороз	0,08±0,02	0,18±0,05	0,05±0,02	0,55±0,01	0,09±0,02	0,21±0,05	0,07±0,02	0,68±0,02
	p-критерий	0,222	0,064	0,213	**0,017**	0,506	0,300	0,783	0,571
$N_{90}P_{90}K_{90}$	Фунгицид	0,11±0,03	0,30±0,08	0,09±0,03	0,83±0,03	0,11±0,02	0,23±0,06	0,07±0,02	0,78±0,03
	Фитофтороз	0,09±0,03	0,23±0,06	0,07±0,02	0,71±0,02	0,08±0,02	0,18±0,05	0,06±0,02	0,70±0,02
	p-критерий	0,122	0,059	0,223	**0,044**	0,107	0,147	0,160	**0,048**

Примечание: полужирным начертанием выделены достоверные значения при $p \leqslant 0,05$.

По прошествии 20 сут, когда на растениях уже встречались видимые симптомы поражения фитофторозом, отражательная способность растений картофеля на делянках с искусственным заражением оказалась значительно ниже таковой незаражённых делянок, но только на восприимчивом сорте Ланорма. Отмечалось достоверное снижение КСЯ в ближнем инфракрасном диапазоне спектра, равное 0,08 и 0,05 на неудобренном и удобренном вариантах опыта. На растениях устойчивого сорта Синеглазка графики средних значений КСЯ по-прежнему оставались сближены между собой для заражённых и незаражённых делянок.

Замеры отражательной способности листьев верхнего яруса картофеля, проводимые на 29-е сутки после инокуляции мицелием возбудителя, выявили ещё большие различия между не поражёнными и поражёнными фитофторозом растениями сорта Ланорма в ближнем инфракрасном диапазоне спектра. Разность значений КСЯ достигла 0,10 на неудобренном фоне и 0,12 — на удобренном, что вполне согласуется с развитием заболевания на этот период *R*, равном 53,5 и 62,5 %. На устойчивом сорте Синеглазка столь явных различий в спектральной характеристике не наблюдалось, статистически значимыми они оказались только на удобренном фоне, растения на котором поражались фитофторозом в 2,2 раза сильнее.

Среди всех выше представленных спектральных индексов, рассчитанных нами на основе измерений в 2022 г., чувствительными к поражению картофеля фитофторозом оказались только некоторые из них. Самыми перспективными следует признать индексы отражения каротиноидов (CAR1 и CAR2), значения которых достоверно увеличивались под влиянием патогена в абсолютном большинстве проведённых измерений, включая самое раннее, выполненное на 2-е сутки после заражения (*табл. 4* и *5*). С его использованием становится возможным ранее обнаружение заболевания, когда внешние признаки на растениях ещё отсутствуют, а значит, и своевременное проведение фунгицидных обработок. На восприимчивом сорте изменение данных индексов имело более выраженный характер, при фунгицидных обработках и опытном варианте соответственно: (CAR1: 0,16–0,20, CAR2: 0,16–0,19), чем на устойчивом (CAR1: 0,02–0,10, CAR2: 0,02–0,09), особенно на фоне внесения полного минерального удобрения. На 12-е сутки после заражения тенденция к повышению данных индексов на делянках с искусственным инфекционным фоном сохранялась, что имело и статистическое подтверждение. Особенно стоит отметить, что индексы CAR1 и CAR2, увеличивались при заражении у Синеглазки в отсутствии минерального питания в 2,4 раза, при применении удобрений в 1,9 раз. На 23-и сутки более высокие значения данных индексов на поражённых растениях обоих сортов наблюдались только на удобренном варианте.

Менее чувствительными оказались индексы Гительсона и Мерзляка (GM1 и GM2), которые лучше всего реагировали на заражение растений картофеля фитофторозом на 12-е сутки. В зависимости от уровня удобренности их увеличение составляло 0,12–0,33 (GM1) и 0,06–0,46 (GM2) на сорте Ланорма, 0,29–1,05 (GM1) и 0,91–1,49 (GM2) на сорте Синеглазка. На неудобренном фоне изменения обоих индексов оказались выражены намного сильней. С учётом всех проведённых измерений указанные индексы теснее были связаны с применением удобрений.

Особого внимания заслуживает индекс флавонолов FRI. Вещества данной группы, являющиеся продуктами вторичного метаболизма, были изучены при различных стрессовых факторах, где их повышение служит индикатором реакции растений на окислительный стресс, повышая их антиоксидантную активность (Васфилова, 2024). По нашим данным заражение растений фитофторозом приводило к увеличению данного индекса на 2-е и 12-е сутки измерений, но не во всех случаях к достоверному, что делает его недостаточно надёжным при использовании в оценке изменений спектральных характеристик под влиянием соответствующего возбудителя. На восприимчивом сорте достоверных изменений индекса фиксировалось значительно больше, чем на устойчивом.

Таблица 4. Фактические значения спектральных индексов, отражающих содержание пигментов в листьях растений картофеля сорта Ланорма, на вариантах разной удобренности и заражённости фитофторозом (2022)

Индекс	Дата измерений	$N_0P_0K_0$			$N_{90}P_{90}K_{90}$		
		Фунгицид	Фитофтороз	*p*	Фунгицид	Фитофтороз	*p*
FRI	2-е сутки	8,36±3,22	14,37±9,15	**0,0090**	10,39±8,58	11,67±7,03	0,693
	12-е сутки	5,39±2,06	23,80±9,55	**0**	8,27±3,76	9,70±5,01	0,397
	23-и сутки	20,61±10,42	12,89±7,23	**0,0170**	10,60±7,01	5,40±2,37	**0,007**
CAR1	2-е сутки	0,22±0,06	0,38±0,17	**0,0002**	0,40±0,10	0,60±0,31	**0,019**
	12-е сутки	0,13±0,02	0,22±0,04	**0**	0,17±0,03	0,23±0,04	**0**
	23-и сутки	0,19±0,03	0,18±0,04	0,2630	0,20±0,04	0,26±0,06	**0,001**
CAR2	2-е сутки	0,20±0,06	0,36±0,17	**0,0003**	0,38±0,10	0,57±0,30	**0,022**
	12-е сутки	0,13±0,02	0,21±0,04	**0**	0,16±0,04	0,22±0,04	**0**
	23-и сутки	0,19±0,03	0,17±0,04	0,3160	0,19±0,04	0,25±0,05	**0,001**
GM1	2-е сутки	3,45±0,39	3,63±0,33	0,1210	4,32±0,24	4,74±0,55	**0,009**
	12-е сутки	2,49±0,10	2,82±0,20	**0**	2,90±0,09	3,02±0,17	**0,018**
	23-и сутки	2,37±0,14	2,43±0,17	0,2300	2,87±0,26	3,02±0,37	0,124
GM2	2-е сутки	4,18±0,52	4,43±0,44	0,0980	5,25±0,42	5,99±0,76	**0,002**
	12-е сутки	2,65±0,17	3,11±0,25	**0**	3,26±0,17	3,32±0,20	0,369
	23-и сутки	2,54±0,16	2,61±0,26	0,3540	3,23±0,32	3,48±0,51	0,067

Примечание: полужирным начертанием выделены достоверные значения при $p \leqslant 0{,}05$.

Таблица 5. Фактические значения спектральных индексов, отражающих содержание пигментов в листьях растений картофеля сорта Синеглазка, на вариантах разной удобренности и заражённости фитофторозом (2022)

Индекс	Дата измерений	$N_0P_0K_0$			$N_{90}P_{90}K_{90}$		
		Фунгицид	Фитофтороз	*p*	Фунгицид	Фитофтороз	*p*
FRI	2-е сутки	2,38±1,27	3,02±1,17	0,092	3,69±2,32	10,96±8,38	**0,001**
	12-е сутки	6,10±3,16	8,12±6,66	0,233	7,18±4,53	11,33±6,33	0,068
	23-и сутки	4,11±2,65	5,03±2,48	0,308	3,43±2,33	3,65±2,09	0,804
CAR1	2-е сутки	0,15±0,03	0,17±0,03	**0,006**	0,36±0,15	0,46±0,13	**0,025**
	12-е сутки	0,14±0,02	0,34±0,19	**0**	0,33±0,15	0,64±0,35	**0,001**
	23-и сутки	0,25±0,12	0,24±0,09	0,837	0,29±0,08	0,44±0,22	**0,004**
CAR2	2-е сутки	0,14±0,03	0,16±0,03	**0,005**	0,34±0,15	0,43±0,13	**0,037**
	12-е сутки	0,13±0,02	0,32±0,19	**0**	0,32±0,15	0,60±0,34	**0,003**
	23-и сутки	0,24±0,09	0,24±0,11	0,077	0,28±0,08	0,43±0,21	**0,004**
GM1	2-е сутки	3,37±0,27	3,41±0,24	0,634	4,69±0,48	4,73±0,47	0,745
	12-е сутки	2,86±0,17	3,91±0,34	**0**	3,69±0,38	3,98±0,58	**0,039**
	23-и сутки	2,89±0,29	3,11±0,40	0,040	3,47±0,48	3,99±0,46	**0,001**
GM2	2-е сутки	3,83±0,36	3,86±0,34	0,749	5,37±0,59	5,71±0,61	0,067
	12-е сутки	3,07±0,21	4,56±0,44	**0**	4,06±0,39	4,97±0,76	**0**
	23-и сутки	3,17±0,35	3,23±0,49	0,653	3,85±0,60	4,42±0,58	**0,002**

Примечание: полужирным начертанием выделены достоверные значения при $p \leqslant 0{,}05$.

Заключение

По результатам наземной гиперспектральной съёмки определена отражающая способность растений картофеля двух сортов, имеющих разную степень поражения фитофторозом и различающихся по уровню удобренности. С увеличением развития заболевания отражательная способность растений снижалась, особенно сильно на восприимчивом сорте и при внесении полного минерального удобрения, которые сильнее поражались фитофторозом. На 5-е сутки после искусственного заражения отмечалось достоверное снижение КСЯ в зелёном диапазоне спектра, на 20-е и 29-е сутки — в ближнем инфракрасном. Согласно итоговым измерениям КСЯ в последнюю дату, самая высокая отражательная способность наблюдалась у растений картофеля восприимчивого сорта, возделываемого на удобренном фоне и не поражённого фитофторозом, а самая низкая — этого же сорта — в условиях дефицита минерального питания и искусственного заражения патогеном.

Использование спектральных индексов, отражающих содержание пигментов в листьях, позволяет выявлять изменения в отражательной способности растений картофеля, поражённых фитофторозом. Наиболее перспективными показали себя индексы отражения каротиноидов (CAR1 и CAR2), значения которых достоверно увеличивались под влиянием патогена в абсолютном большинстве проведённых измерений, включая самое раннее, выполненное на 2-е сутки после заражения. Индексы Гительсона и Мерзляка (GM1 и GM2) лучше всего реагировали на заражение растений картофеля фитофторозом на 12-е сутки, что подтверждалось соответствующей статистической обработкой. Менее надёжным оказался индекс флавонолов, с помощью которого достоверные различия в отражательных свойствах растений, имеющих разную степень поражения фитофторозом, фиксировались лишь в некоторых случаях.

Продемонстрированные результаты не позволяют на практике осуществлять выявление поражённости растений картофеля фитофторозом, но указывают перспективное направление для решения поставленной задачи. Речь идёт о конкретных значениях (эталонах) спектральных индексов, чувствительных к заражению картофеля фитофторозом, прежде всего на ранних стадиях проявления заболевания, применимых к определённой ситуации на поле, характеризующей устойчивость сорта, минеральное питание и степень поражения данным возбудителем.

Литература

1. *Бекмухамедов Н. Э.*, *Карабкина Н. Н.* Изменение спектральных характеристик растений яровой пшеницы, зараженных грибковыми болезнями // Сельское, лесное и водное хоз-во. 2013. № 10. http://agro.snauka.ru/2013/10/1169.
2. *Белов Д. А.*, *Хютти А. В.* Фитофтороз картофеля и программа его контроля // Картофель и овощи. 2018. № 8. С. 19–21.
3. *Васфилова Е. С.* Значение биологически активных соединений для повышения собственной устойчивости растений к неблагоприятным абиотическим воздействиям // Растительные ресурсы. 2024. Т. 60. № 3. С. 3–20. DOI: 10.31857/S0033994624030013.
4. *Гурова Т. А.*, *Клименко Д. Н.*, *Луговская О. С. и др.* Спектральные характеристики сортов пшеницы при биотическом стрессе // Достижения науки и техники АПК. 2019. Т. 33. № 10. С. 71–75. DOI: 10.24411/0235-2451-2019-11016.
5. *Данилов Р. Ю.*, *Исмаилов В. Я.*, *Третьяков В. А. и др.* Разработка прецизионных технологий фитосанитарного мониторинга агроэкосистем на основе использования данных дистанционного гиперспектрального зондирования Земли // Достижения науки и техники АПК. 2018. Т. 32. № 10. С. 82–86. DOI: 10.24411/0235-2451-2018-11019.
6. *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.
7. *Данилов Р. Ю.*, *Кремнева О. Ю.*, *Пачкин А. А.* Изучение спектральных характеристик растений озимого ячменя, инфицированных возбудителями экономически значимых болезней // Тр. Кубанского гос. аграрного ун-та. 2021. № 93. С. 111–121. DOI: 10.21515/1999-1703-93-111-121.

8. *Деревягина М. К.*, *Васильева С. В.*, *Зейрук В. Н.*, *Белов Г. Л.* Препараты, содержащие коллоидное серебро, против ризоктониоза, альтернариоза и фитофтороза картофеля // Изв. ТСХА. 2020. № 4. С. 54–66. DOI: 10.26897/0021-342X-2020-4-54-66.
9. *Исмаилов Э. Я.*, *Надыкта В. Д.*, *Исмаилов В. Я.*, *Костенько И. А.*, *Швец А. А.* Гиперспектральные исследования поражения сельскохозяйственных культур фитопатогенами // Космонавтика и ракетостроение. 2012. № 3 (68). С. 98–103.
10. *Кондратьев К. Я.*, *Федченко П. П.* Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Гидрометеоиздат, 1982. 216 с.
11. *Кремнева О. Ю.*, *Тутубалина О. В.*, *Середа И. И. и др.* Исследования изменения спектральных характеристик сортов озимой пшеницы в зависимости от степени инфицирования возбудителями болезней // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 149–161. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-149-161.
12. *Кремнева О. Ю.*, *Данилов Р. Ю.*, *Тутубалина О. В.*, *Середа И. И.* Изменения спектральных характеристик озимой пшеницы в зависимости от степени развития желтой пятнистости листьев // Материалы 9-й Международ. науч. конф. «Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли». Красноярск: СФУ, 2022. С. 242–246.
13. Методические указания по регистрационным испытаниям фунгицидов в сельском хозяйстве. СПб.: ВИЗР, 2009. 378 с.
14. *Мударисов С. Г.*, *Мифтахов И. Р.*, *Фархутдинов И. М.* Использование беспилотных технологий и методов машинного обучения для детекции болезней сахарной свёклы // АПК России. 2025. Т. 32. № 5. С. 674–684. DOI: 10.55934/2587-8824-2025-32-4-674-684.
15. *Соколов Ю. Г.*, *Садковский В. Т.*, *Кремнева О. Ю. и др.* Разработка технологии обнаружения очагов ржавчинных болезней пшеницы // Международ. научно-исследоват. журн. 2018. № 12-2 (78). С. 29–33. DOI: 10.23670/IRJ.2018.78.12.042.
16. *Чугунов В. С.*, *Шатилова О. Н.*, *Ускова Л. Б.*, *Анисимов Б. В.* Импорт картофеля в России в 2014–2015 годах // Картофель и овощи. 2016. № 5. С. 33–35.
17. *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.
18. *Шпанев А. М.*, *Фесенко М. А.*, *Смук В. В.* Эффективность применения минеральных удобрений и интегрированной системы защиты растений в полевом севообороте на Северо-Западе РФ // Агрохимия. 2021. № 1. С. 12–22. DOI: 10.31857/S0002188121010099.
19. *Barnes J. D.*, *Balaguer L.*, *Manrique E. et al.* A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophyll *a* and *b* in lichens and higher plants // Environmental and Experimental Botany. 1992. V. 32 (2). P. 85–100. DOI: 10.1016/0098-8472(92)90034-Y.
20. *Gamon J. A.*, *Peñuelas J.*, *Field C. B.* A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency // Remote Sensing of Environment. 1992. V. 41 (1). P. 35–44. DOI: 10.1016/0034-4257(92)90059-S.
21. *Gitelson A. A.*, *Merzlyak M. N.* Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing // J. Plant Physiology. 1996. V. 148(3–4). P. 494–500. DOI: 10.1016/S0176-1617(96)80284-7.
22. *Gitelson A. A.*, *Merzlyak M.N.*, *Chivkunova O. B.* Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leave // Photochemistry and Photobiology. 2001. V. 74 (1). P. 38–45. DOI: 10.1562/0031-8655(2001)074<0038:OPANEO>2.0.CO;2.
23. *Gitelson A. A.*, *Zur Y.*, *Chivkunova O. B.*, *Merzlyak M. N.* Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy // Photochemistry and Photobiology. 2002. V. 75 (3). P. 272–281. DOI: 10.1562/0031-8655(2002)0750272ACCIPL2.0.CO2.
24. *Merzlyak M. N.*, *Gitelson A. A.*, *Chivkunova O. B.*, *Rakitin V. Y.* Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening // Physiologia Plantarum. 1999. V. 106. P. 135–141. DOI: 10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x.
25. *Merzlyak M. N.*, *Solovchenko A. E.*, *Smagin A. I.*, *Gitelson A. A.* Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and techniques for non-destructive assessment // J. Plant Physiology. 2005. V. 162 (2). P. 151–160. DOI: 10.1016/j.jplph.2004.07.002.
26. *Peñuelas J.*, *Gamon J. A.*, *Freeden A. L. et al.* Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves // Remote Sensing of Environment. 1994. V. 48 (2). P. 135–146. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90136-8.
27. *Peñuelas J.*, *Baret F.*, *Filella I.* (1995a) Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll *a* ratio from leaf spectral reflectance // Photosynthetica. 1995. V. 31 (2). P. 221–230.
28. *Peñuelas J.*, *Filella I.*, *Lloret P. et al.* (1995b) Reflectance assessment of mite effects on apple trees // Intern. J. Remote Sensing. 1995. V. 16 (14). P. 2727–2733. DOI: 10.1080/01431169508954588.

29. *Sims D. A.*, *Gamon J. A.* Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages // Remote Sensing of Environment. 2002. V. 81(2–3). P. 337–354. DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.

Study of reflective properties of potato plants affected by late blight using ground-based hyperspectral measurements

A. M. Shpanev [1], D. V. Rusakov [1], V. V. Smuk [2], A. V. Khyutti [2]

[1] *Agrophysical Research Institute*, *Saint Petersburg 195220*, *Russia*
E-mails: ashpanev@mail.ru, *rdv_vgsha@mail.ru*
[2] *All-Russian Institute of Plant Protection*, *Pushkin*, *Saint Petersburg 196608*, *Russia*
E-mails: vvsmuk@mail.ru, *alexanderkhyutti@mail.ru*

Late blight is one of the most widespread and particularly dangerous potato diseases in northwestern Russia. This circumstance determines the importance of timely detection of plant infestation and fungicide treatments even before visible symptoms of leaf damage appear. Current instrumentation capabilities suggest that this problem can be solved using hyperspectral imaging. A study of the reflectivity characteristics of potato plants affected and unaffected by late blight was conducted at the experimental base of the Menkovskiy branch of the Agrophysical Research Institute in 2020 and 2022. The objects of hyperspectral ground-based measurements were plants of susceptible (Lanorma) and resistant (Sineglazka) potato varieties, fertilized ($N_{90}P_{90}K_{90}$) and unfertilized ($N_0P_0K_0$), unaffected (4-fold fungicide treatment) and heavily affected by late blight (artificial infection background). The study revealed that as the disease progressed, plant reflectance decreased, particularly in susceptible varieties and those treated with complete mineral fertilizer, which were more severely affected by late blight. A significant decrease in the spectral radiance coefficient was observed in the green spectrum on the 5th day after artificial infection, and in the near infrared range on the 20th and 29th days. Using spectral indices reflecting pigment content in leaves allowed us to identify changes in the reflectance of potato plants affected by late blight. The most promising were the carotenoid reflectance indices CAR1 (Carotenoid Reflectance Index 1) and CAR2 (Carotenoid Reflectance Index 2) whose values significantly increased under the influence of the pathogen in the vast majority of measurements, including the earliest, conducted on the second day after infection. The Gitelson and Merzlyak indices GM1 (Gitelson and Merzlyak Index 1) and GM2 (Gitelson and Merzlyak Index 2) responded best to the infection of potato plants with late blight on the 12th day, and the flavonol index FRI (Reflection Index of Flavonols), due to the small number of cases with reliable differences in the reflective properties of plants with different degrees of damage by late blight, turned out to be less reliable and suitable for solving our problem.

Keywords: potato (*Solanum tuberosum* L.), late blight, artificial infectious background, varietal resistance, mineral fertilizers, ground-based hyperspectral measurements, spectral radiance coefficient, spectral indices

Accepted: 16.06.2026
DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-4-258-271

References

1. Bekmukhamedov N. E., Karabkina N. N., Changes in the spectral characteristics of spring wheat plants infected with fungal diseases, *Sel'skoe*, *lesnoe i vodnoe khozyaistvo*, 2013, No. 10 (in Russian), http://agro.snauka.ru/2013/10/1169.
2. Belov D. A., Khyutti A. V., Potato late blight and its control program, *Kartofel' i ovoshchi*, 2018, No. 8, pp. 19–21 (in Russian).

3. Vasfilova Ye. S., The importance of biologically active compounds for increasing plant resistance to adverse abiotic influences, *Rastitel'nye resursy*, 2024, V. 60, No. 3, pp. 3–20 (in Russian), DOI: 10.31857/S0033994624030013.
4. Gurova T. A., Klimenko D. N., Lugovskaya O. S. et al., Spectral characteristics of wheat varieties under biotic stress, *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2019, V. 33, No. 10, pp. 71–75 (in Russian), DOI: 10.24411/0235-2451-2019-11016.
5. Danilov R. Yu., Ismailov V. Ya., Tret'yakov V. A. et al., Development of precision technologies for phytosanitary monitoring of agroecosystems based on the use of remote hyperspectral sensing data of the Earth, *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2018, V. 32, No. 10, pp. 82–86 (in Russian), DOI: 10.24411/0235-2451-2018-11019.
6. 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 distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 1, pp. 113–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127.
7. Danilov R. Yu., Kremneva O. Yu., Pachkin A. A., Study of spectral characteristics of winter barley plants infected with pathogens of economically significant diseases, *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2021, No. 93, pp. 111–121 (in Russian), DOI: 10.21515/1999-1703-93-111-121.
8. Derevyagina M. K., Vasil'yeva S. V., Zeyruk V. N., Belov G. L., Colloidal silver-containing preparations against rhizoctonia, alternaria, and late blight of potatoes, *Izvestiya Timiryazevskoi sel'skokhozyaistvennoi akademii*, 2020, No. 4, pp. 54–66 (in Russian), DOI: 10.26897/0021-342X-2020-4-54-66.
9. Ismailov E. Ya., Nadykta V. D., Ismailov V. Ya., Kosten'ko I. A., Shvets A. A., Hyperspectral studies of damage to agricultural crops by phytopathogens, *Kosmonavtika i raketostroenie*, 2012, No. 3 (68), pp. 98–103 (in Russian).
10. Kondrat'yev K. Ya., Fedchenko P. P., *Spektral'naya otrazhatel'naya sposobnost' i raspoznavanie rastitel'nosti* (Spectral reflectivity and vegetation recognition), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1982, 216 p. (in Russian).
11. Kremneva O. Yu., Tutubalina O. V., Sereda I. I. et al., Studies of changes in the spectral characteristics of winter wheat varieties depending on the degree of infection with pathogens, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 3, pp. 149–161 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-149-161.
12. Kremneva O. Yu., Danilov R. Yu., Tutubalina O. V., Sereda I. I., Changes in the spectral characteristics of winter wheat depending on the degree of development of yellow leaf spot, *Materialy 9-i Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Regional'nye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli"* (Proc. 9th Intern. Scientific Conf. "Regional Problems of Remote Sensing of the Earth"), Krasnoyarsk: SFU, 2022, pp. 242–246 (in Russian).
13. *Metodicheskie ukazaniya po registratsionnym ispytaniyam fungitsidov v sel'skom khozyaistve* (Guidelines for registration tests of fungicides in agriculture), Saint Petersburg: Vserossiiskii nauchno-issledovatel'skii institut zashchity rastenii, 2009, 378 p. (in Russian).
14. Mudarisov S. G., Miftakhov I. R., Farkhutdinov I. M., Use of unmanned technologies and machine learning methods for detection of sugar beet diseases, *Agropromyshlennyi kompleks Rossii*, 2025, V. 32, No. 5, pp. 674–684 (in Russian), DOI: 10.55934/2587-8824-2025-32-4-674-684.
15. Sokolov Yu. G., Sadkovskiy V. T., Kremneva O. Yu. et al., Development of technology for detecting foci of rust diseases of wheat, *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2018, No. 12-2 (78), pp. 29–33 (in Russian), DOI: 10.23670/IRJ.2018.78.12.042.
16. Chugunov V. S., Shatilova O. N., Uskova L. B., Anisimov B. V., Potato imports in Russia in 2014–2015, *Kartofel' i ovoshchi*, 2016, No. 5, pp. 33–35 (in Russian).
17. 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.
18. Shpanev A. M., Fesenko M. A., Smuk V. V., Efficiency of using mineral fertilizers and an integrated plant protection system in field crop rotation in the North-West of the Russian Federation, *Agrokhimiya*, 2021, No. 1, pp. 12–22 (in Russian), DOI: 10.31857/S0002188121010099.
19. Barnes J. D., Balaguer L., Manrique E. et al., A reappraisal of the use of DMSO for the extraction and determination of chlorophyll *a* and *b* in lichens and higher plants, *Environmental and Experimental Botany*, 1992, V. 32 (2), pp. 85–100, DOI: 10.1016/0098-8472(92)90034-Y.
20. Gamon J. A., Peñuelas J., Field C. B., A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency, *Remote Sensing of Environment*, 1992, V. 41 (1), pp. 35–44, DOI: 10.1016/0034-4257(92)90059-S.
21. Gitelson A. A., Merzlyak M. N., Signature analysis of leaf reflectance spectra: Algorithm development for remote sensing, *J. Plant Physiology*, 1996, V. 148(3–4), pp. 494–500, DOI: 10.1016/S0176-1617(96)80284-7.

22. Gitelson A. A., Merzlyak M. N., Chivkunova O. B., Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leave, *Photochemistry and Photobiology*, 2001, V. 74 (1), pp. 38–45, DOI: 10.1562/0031-8655(2001)074<0038:OPANEO>2.0.CO;2.
23. Gitelson A. A., Zur Y., Chivkunova O. B., Merzlyak M. N., Assessing carotenoid content in plant leaves with reflectance spectroscopy, *Photochemistry and Photobiology*, 2002, V. 75(3), pp. 272–281, DOI: 10.1562/0031-8655(2002)0750272ACCIPL2.0.CO2.
24. Merzlyak M. N., Gitelson A. A., Chivkunova O. B., Rakitin V. Y., Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening, *Physiologia Plantarum*, 1999, V. 106, pp. 135–141, DOI: 10.1034/j.1399-3054.1999.106119.x.
25. Merzlyak M. N., Solovchenko A. E., Smagin A. I., Gitelson A. A., Apple flavonols during fruit adaptation to solar radiation: spectral features and techniques for non-destructive assessment, *J. Plant Physiology*, 2005, V. 162 (2), pp. 151–160, DOI: 10.1016/j.jplph.2004.07.002.
26. Peñuelas J., Gamon J., Freeden A. et al., Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water limited sunflower leaves, *Remote Sensing of Environment*, 1994, V. 48 (2), pp. 135–146, DOI: 10.1016/0034-4257(94)90136-8.
27. Peñuelas J., Baret F., Filella I. (1995a), Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll *a* ratio from leaf spectral reflectance, *Photosynthetica*, 1995, V. 31 (2), pp. 221–230.
28. Peñuelas J., Filella I., Lloret P. et al. (1995b), Reflectance assessment of mite effects on apple trees, *Intern. J. Remote Sensing*, 1995, V. 16 (14), pp. 2727–2733, DOI: 10.1080/01431169508954588.
29. Sims D. A., Gamon J. A., Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages, *Remote Sensing of Environment*, 2002, V. 81(2–3), pp. 337–354, DOI: 10.1016/S0034-4257(02)00010-X.