

Изменение спектральных характеристик культурных и сорных растений под влиянием минеральных удобрений в агроценозах Северо-Запада России

А. М. Шпанев, В. В. Смук

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

Применение минеральных удобрений — неотъемлемая составляющая эффективного ведения сельскохозяйственного производства во всём мире. В нашей стране особенно актуально улучшение питательного режима культурных растений на низкоплодородных дерново-подзолистых почвах Северо-Западного региона. При этом внесение удобрений способно приводить к изменениям спектральных характеристик культурных и сорных растений, что затрудняет интерпретацию полученных данных дистанционного зондирования Земли с помощью спутников или беспилотных летательных аппаратов в отношении оценки фитосанитарного состояния агроценозов. Изучение особенностей отражательной способности культурных и сорных растений и её изменчивости под влиянием вносимых минеральных удобрений проводилось на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института в 2020 г. Объектами гиперспектральных наземных измерений выступали растения ярового ячменя и картофеля как культур, имеющих широкое распространение на северо-западе России, а также наиболее типичные для агроценозов данных культур виды сорных растений. Статистической обработкой было подтверждено наличие достоверных различий в отражательных свойствах культурных и сорных растений в ближнем инфракрасном диапазоне, а для ярового ячменя — во всём диапазоне проведённых измерений (320–1100 нм). Данные различия чётко обозначились как в начальный период развития растений, так и в середине вегетации. Под влиянием минеральных удобрений наблюдалось увеличение отражательных способностей у растений ярового ячменя и большинства видов сорных растений, в основном за счёт ближнего инфракрасного диапазона. На удобренном варианте спектральная яркость листьев ярового ячменя оказалась выше, чем у сорных растений, тогда как на неудобренном варианте — ниже. Полученные результаты указывают на большие перспективы использования гиперспектральных измерений при оценке засорённости агроценозов, в том числе для обнаружения пространственной неравномерности размещения сорных растений под влиянием минеральных удобрений и дифференцированного применения гербицидов, предусмотренного системой точного земледелия.

Ключевые слова: яровой ячмень (*Hordeum vulgare* L.), картофель (*Solanum tuberosum* L.), сорные растения, минеральные удобрения, наземные гиперспектральные измерения, спектральная характеристика, коэффициент спектральной яркости

Одобрена к печати: 04.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-165-177

Введение

В последние годы в нашей стране обозначился явный интерес к использованию данных дистанционного зондирования Земли применительно к оценке фитосанитарного состояния агроценозов. С учётом всё более широкого распространения технологий точного земледелия можно с уверенностью сказать, что такая тенденция сохранится и в ближайшем будущем. На данный момент наибольшие успехи достигнуты в изучении оптических свойств отдельных видов сорных растений и засорённости посевов посредством съёмки со спутников, беспилотных летательных аппаратов и наземных измерений. При оптической характеристике засорённости агроценозов широкое применение получил индекс NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс). С его помощью определяли засорённость посевов зерновых культур (Письман и др., 2021; Полин и др., 2010; Савин и др., 2017; Шпанев, Петрушин, 2017), паровых полей (Антонов, Сладких, 2009), выяв-

ляли очаги высокой численности амброзии полыннолистной (Архипова и др., 2014) и борщевика Сосновского (Богданов и др., 2020). По данным зарубежных публикаций индекс NDVI успешно использовался для обнаружения сорных растений в посевах сои, кукурузы и подсолнечника (Gerhards, Christensen, 2003; Merotto et al., 2012; Samseemoung et al., 2012). Между тем, известны недостатки и ряд ограничений к применению данного индекса для решения подобного рода задач (Шпанев, Смук, 2021). Лучшей альтернативой данного показателя считается коэффициент спектральной яркости (коэффициент отражения), полученный в результате дистанционных или наземных гиперспектральных измерений (Григорьев, Рыжиков, 2018; Данилов и др., 2020; Качалина и др., 2016; Савин и др., 2020; Goel et al., 2002).

Среди всего множества факторов, способных влиять на оптические свойства культурной и сорной растительности в агроценозах, выделяется такой агротехнический приём, как внесение удобрений (Фесенко, Шпанев, 2019; Zheng et al., 2017). Особенно велико его значение на низкоплодородных дерново-подзолистых почвах Северо-Запада России, где культурные растения испытывают дефицит основных элементов минерального питания. Несмотря на очевидную актуальность данного направления исследований, анализ литературных данных показал слабую изученность изменений в спектральных характеристиках культурных и сорных растений, происходящих под влиянием минеральных удобрений. При этом известно, что улучшение питательного режима растений за счёт внесения удобрений приводит к увеличению ассимиляционной поверхности листьев, содержания в них хлорофилла и каротиноидов, что, в свою очередь, сказывается на оптических свойствах листового аппарата (Канаш и др., 2018; Подушин, Федулов, 2009).

Цель настоящей работы — изучение особенностей отражательной способности культурных и сорных растений и её изменчивости под влиянием вносимых минеральных удобрений в агроценозах на северо-западе России.

Материалы и методы

Изучение отражательной способности культурных и сорных растений проводилось в 2020 г. в опытах с применением минеральных удобрений в агроценозах ярового ячменя и картофеля на экспериментальной базе Меньковского филиала Агрофизического научно-исследовательского института, расположенного в юго-западной части Ленинградской обл. (Шпанев, 2019).

Объектами исследований выступали растения ярового ячменя (*Hordeum vulgare* L.) и картофеля (*Solanum tuberosum* L.) как культур, имеющих широкое распространение на территории Северо-Западного региона, а также наиболее типичные для агроценозов данных культур виды сорных растений. В посеве ярового ячменя к таковым относятся марь белая (*Chenopodium album* L.), фиалка полевая (*Viola arvensis* Murr.), пастушья сумка обыкновенная (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik), пикульник обыкновенный (*Galeopsis tetrahit* L.), редька дикая (*Raphanus raphanistrum* L.), горец развесистый (*Persicaria lapathifolia* (L.) Delarbre), гречишка вьюнковая (*Fallopia convolvulus* (L.) A.Love), из многолетников — осот полевой (*Sonchus arvensis* L.), мята полевая (*Mentha arvensis* L.), полынь обыкновенная (*Atrémisia vulgaris* L.) (Шпанев и др., 2020). В посадках картофеля, размещённых по пласту многолетних трав, состав видов сорных растений с высокой частотой встречаемости и обилием представлен марью белой (*Chenopodium album* L.), пикульником обыкновенным, редькой дикой, горцем развесистым, гречишкой вьюнковой, а также многолетниками — пыреем ползучим (*Elitrigia repens* (L.) Nevski), осотом полевым, чистецом болотным (*Stachys palustris* L.), шавелем малым (*Rumex acetosella* L.), бодяком щетинистым (*Cirsium setosum* (Willd.) Bess.) (Смук, Шпанев, 2016).

Исследования на яровом ячмене были сосредоточены в микрополевым опыте с наличием двух вариантов азотного питания (N_0 и N_{60}), в одном из которых осуществлялось предпосевное внесение аммиачной селитры из расчёта 60 кг д. в./га (д. в. — действующее вещество) или 180 кг/га в физическом весе. Технология возделывания культуры включала общепринятые для региона агротехнические мероприятия: зяблевую вспашку, весеннее боронование, предпосевную культивацию, посев и уборку урожая. Для посева использовались семена высокой

репродукции сорта Суздалец, имеющего допуск к возделыванию на территории Северо-Западного региона. Применение средств защиты растений (гербициды, фунгициды) не осуществлялось по причине их влияния на рост, развитие и спектральные характеристики культурных и сорных растений.

В агроэкологическом стационаре, который представляет собой 7-польный зернотравяно-пропашной севооборот, проводились исследования спектральных характеристик культурных и сорных растений в посадках картофеля. Согласно схеме чередования культур, предшественником картофеля были многолетние травы (тимофеевка луговая плюс клевер красный) второго года пользования, что оказывало определяющее влияние на формирование видового состава сорных растений. Исследования проводились на вариантах опыта с разной степенью удобрённости ($N_0P_0K_0$, $N_{100}P_{75}K_{75}$), формируемой предпосевным внесением азотосодержащей аммиачной селитры из расчёта планируемой урожайности картофеля. Технология возделывания картофеля включала весеннее боронование, вспашку, посадку, двукратное дождевое боронование, две междурядные обработки, окучивание, десикацию, уборку. На посадку использовались клубни высокой репродукции сорта Удача, районированного по Северо-Западному региону.

Изучение отражательной способности культурных и сорных растений и её изменчивости под влиянием вносимых минеральных удобрений в агроценозах ярового ячменя и картофеля осуществлялось по средствам наземного спектрометрирования полевым портативным спектрометрическим прибором PSR-1100 (Spectral Evolution). Спектральный диапазон измерений данным прибором составляет 320–1100 нм, спектральное разрешение — 3 нм. Измеряемая прибором величина Radiance — спектральная плотность энергетической яркости (СПЭЯ), единица измерения — $Вт \cdot см^{-2} \cdot ср^{-1} \cdot нм^{-1}$. Расчёт коэффициентов спектральной яркости (КСЯ) проводился нами по формуле (Кондратьев, Федченко, 1982):

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

где $p(\lambda)$ — КСЯ; $B(\lambda)$ — СПЭЯ исследуемой поверхности в заданном направлении; $B_0(\lambda)$ — СПЭЯ идеально рассеивающей поверхности, в качестве которой использовалась калибровочная панель с единичным коэффициентом отражения, освещённой так же, как и исследуемая поверхность. В качестве спектральных диапазонов были выбраны следующие интервалы длин волн (Данилов и др., 2020): Blue (синий, 450–520 нм), Green (зелёный, 530–610 нм), Red (красный, 625–680 нм), RE (красный расширенный, 680–740 нм) и NIR (англ. near infrared, ближний инфракрасный, 880–1100 нм).

Измерения проводили в ясную солнечную погоду при максимальной высоте Солнца, что приходилось на период с 12:00 до 14:00. Измерения отдельных растительных объектов осуществляли 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). Количество замеров каждого вида культурных и сорных растений на каждом варианте опыта составляло не менее 30, что существенно для репрезентативной статистической обработки. Замеры делались на начальных стадиях развития культурных и сорных растений (18 июня), что крайне важно для практического применения полученных данных при реализации пространственно-дифференцированного проведения гербицидной обработки, и в середине вегетации (14 июля). Фенологические фазы культурных растений на момент проведения измерений спектрометром: яровой ячмень — выход в трубку и цветение, картофель — всходы и бутонизация. В агроценозе ярового ячменя у большинства видов сорных растений насчитывалось 4–6 листьев в первую дату измерений и стебление — во вторую; в агроценозе картофеля — всходы и розетка листьев соответственно у малолетников и многолетников (18 июня), фаза стеблевания (14 июля).

Статистическая обработка полученных данных проводилась в программе Statistica 6 и состояла из исключения выбросов, нехарактерных для полученной совокупности гиперспектральных данных, расчёта средней арифметической, дисперсии и стандартного отклонения, которые использовались при оценке достоверности различий спектральных характеристик культурных и сорных растений (Ашмарин и др., 1971).

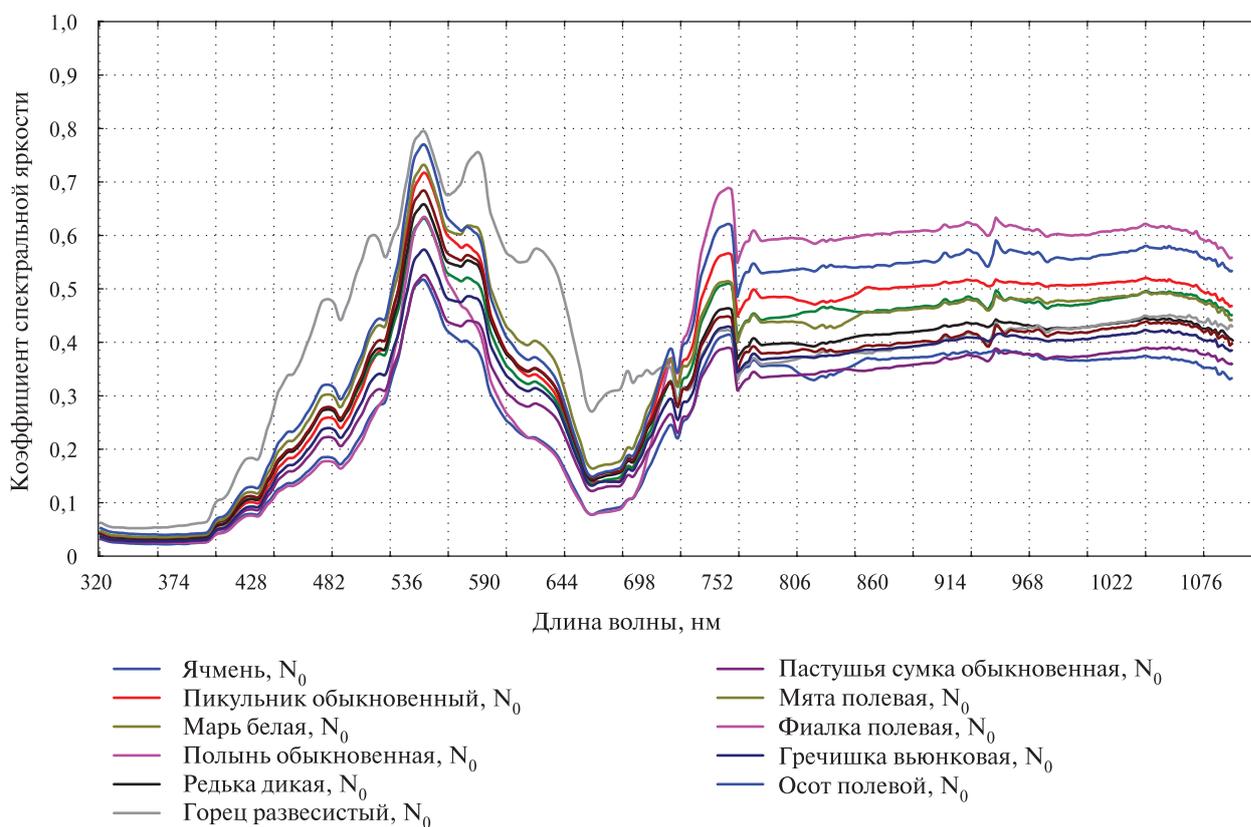
Результаты и обсуждение

По результатам анализа графиков коэффициента спектральной яркости исследуемых объектов в агроценозе ярового ячменя выявлено наличие различий в отражательных свойствах культурных и сорных растений в ближнем инфракрасном диапазоне. Данные различия чётко обозначились в начальный период развития растений, когда проводится оценка засорённости агроценозов и осуществляется принятие решений о целесообразности проведения гербицидных обработок (рис. 1, см. с. 169). При этом для растений ячменя оказались характерны самые низкие значения КСЯ во всём диапазоне проведённых измерений (в среднем 0,27). Следует указать на отсутствие отмеченных различий в спектральных характеристиках растений ярового ячменя и фиалки полевой. К числу трудно различимых между собой видов сорняков могут быть отнесены гречишка вьюнковая, горец развесистый, пастушья сумка, редька дикая, а также марь белая и мята полевая, у которых схожие графики КСЯ и близкие значения КСЯ в NIR. На общем графике хорошо выделяются кривые КСЯ пикульника обыкновенного, осота полевого и полыни обыкновенной.

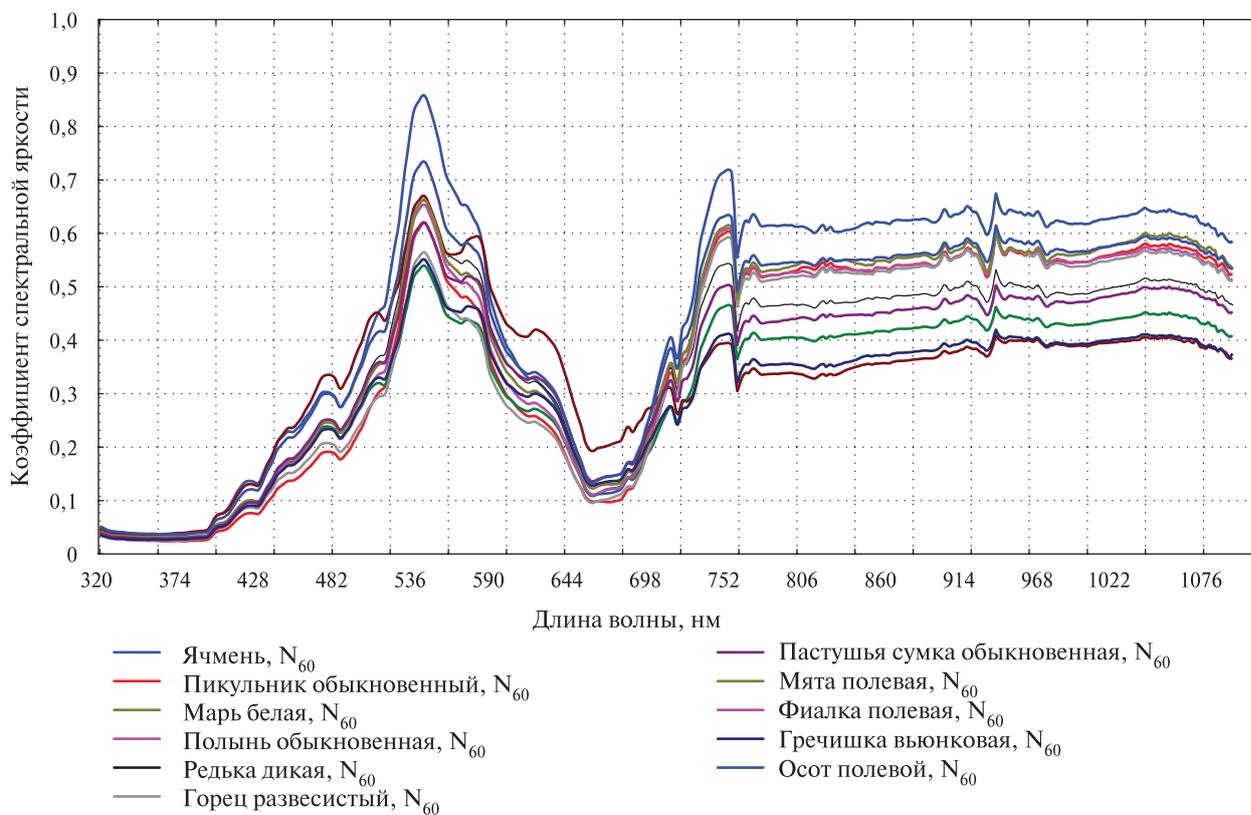
По прошествии месяца оптические свойства растений ярового ячменя и сорняков претерпели изменения, что можно видеть по кривым КСЯ, которые уже не имели выраженной двухвершинности (рис. 2, см. с. 170). Фактические данные измерений на культурных растениях указывают на снижение КСЯ на участках синего (в 2,5 раза) и зелёного (в 3 раза) спектров и на обратную ситуацию для красного расширенного (в 1,3 раза) и ближнего инфракрасного (в 1,2 раза) спектральных каналов. У сорных растений отмечались несколько иные изменения оптических характеристик, а именно снижение КСЯ в синем (в 6,3–9,3 раза), зелёном (в 5,8–7,4 раза), красном (в 3,2–4,0 раза), красном расширенном (в 1,4–1,7 раза) диапазонах спектра, тогда как в ближнем инфракрасном подобного не отмечалось. По-прежнему лучше всего различались растения ярового ячменя и полыни обыкновенной, осота полевого, горца развесистого, гречишки вьюнковой.

Значительные изменения в отражающих способностях ярового ячменя происходили под влиянием азотных удобрений, что свидетельствует о его отзывчивости на улучшение питательного режима. Уже на начальных фазах развития культуры наблюдалось увеличение значений КСЯ во всём измеряемом диапазоне: по усреднённым данным, с 0,27 до 0,45. Схожий результат был получен в работах других исследователей (Ивченко и др., 2019). При этом КСЯ ярового ячменя оказался выше, чем у сорных растений (0,30–0,41), хотя общий вид кривой КСЯ не претерпел изменений. Спектральные характеристики сорных растений не имели столь выраженных изменений, проявление которых ограничивалось увеличением значений КСЯ в ближнем инфракрасном диапазоне (пикульник обыкновенный, гречишка вьюнковая, редька дикая, мята полевая) или уменьшением (марь белая, полынь обыкновенная). По данным измерений, проведённых в середине периода вегетации, на варианте с внесением азотных удобрений фиксировались более высокие значения КСЯ во всём диапазоне спектра и в особенности в ближнем инфракрасном у пикульника обыкновенного (0,48 и 0,64), гречишки вьюнковой (0,38 и 0,49), осота полевого (0,52 и 0,67). Не было выявлено достоверных различий между неудобренными и удобренными вариантами в спектральных характеристиках растений горца развесистого и мари белой (см. рис. 2).

В агроценозе картофеля по отражательным свойствам наиболее различимыми оказались культурные растения и пырей ползучий, относящийся к группе однодольных. Усреднённые значения КСЯ по данным замеров в начале и середине вегетации составили одну и ту же величину 0,39 и 0,19 соответственно у растений картофеля и пырея ползучего. При этом основные различия просматривались в интервале длин волн от 680 до 1100 нм. Выявленные отличия указывают на большие перспективы дистанционного мониторинга по средствам гиперспектральных измерений при оценке засорённости посадок пыреем ползучим не только в период до появления всходов картофеля, что было показано нами ранее (Смук, Шпанев, 2019), но и после появления всходов. С учётом широкого распространения и высокой вредности данного вида сорных растений это имеет большое практическое значение для картофелеводства Северо-Запада России.

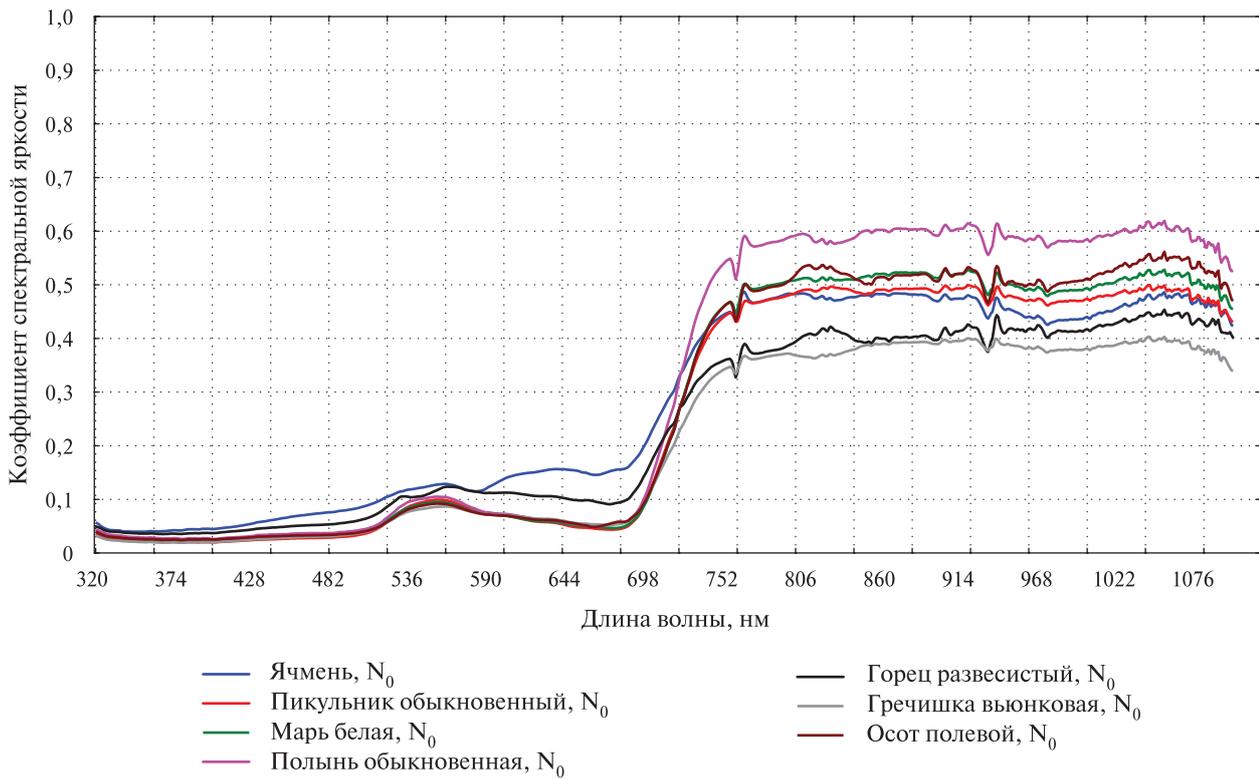


a

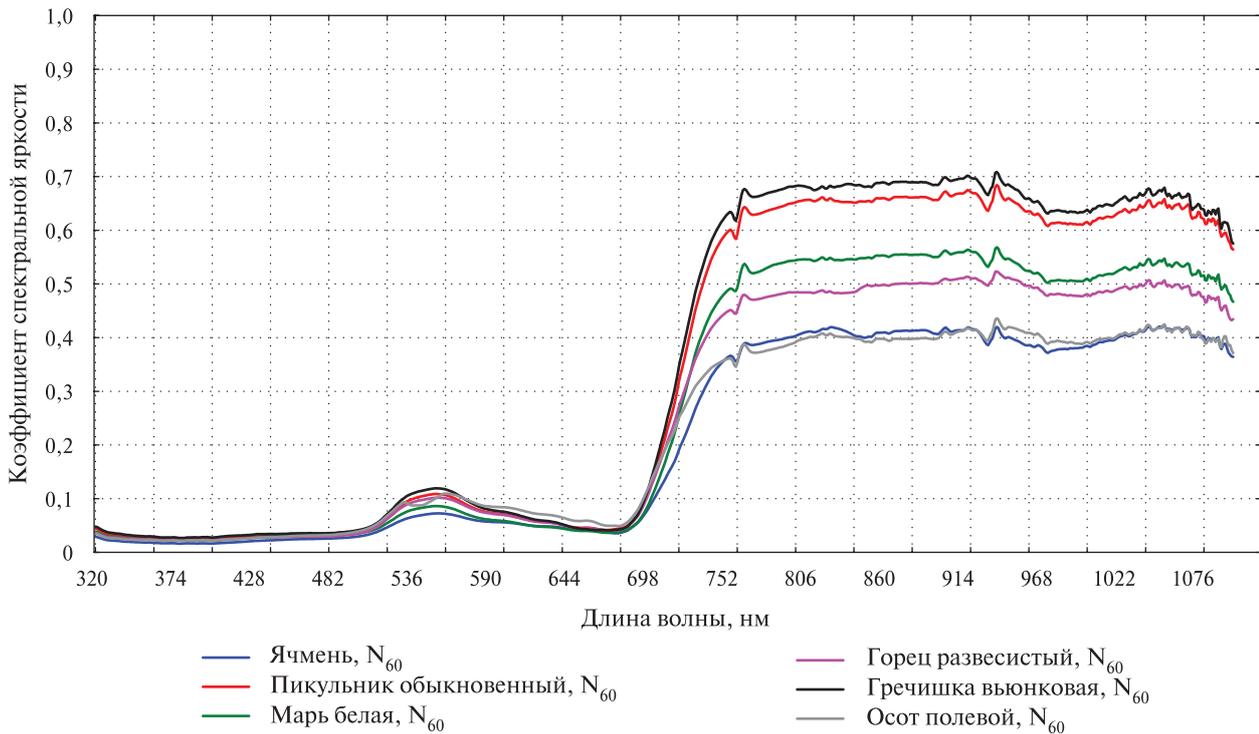


b

Рис. 1. Графики средних значений КСЯ на начальных фазах развития культурных и сорных растений в агроценозе ярового ячменя на удобренном и удобренном варианте опыта

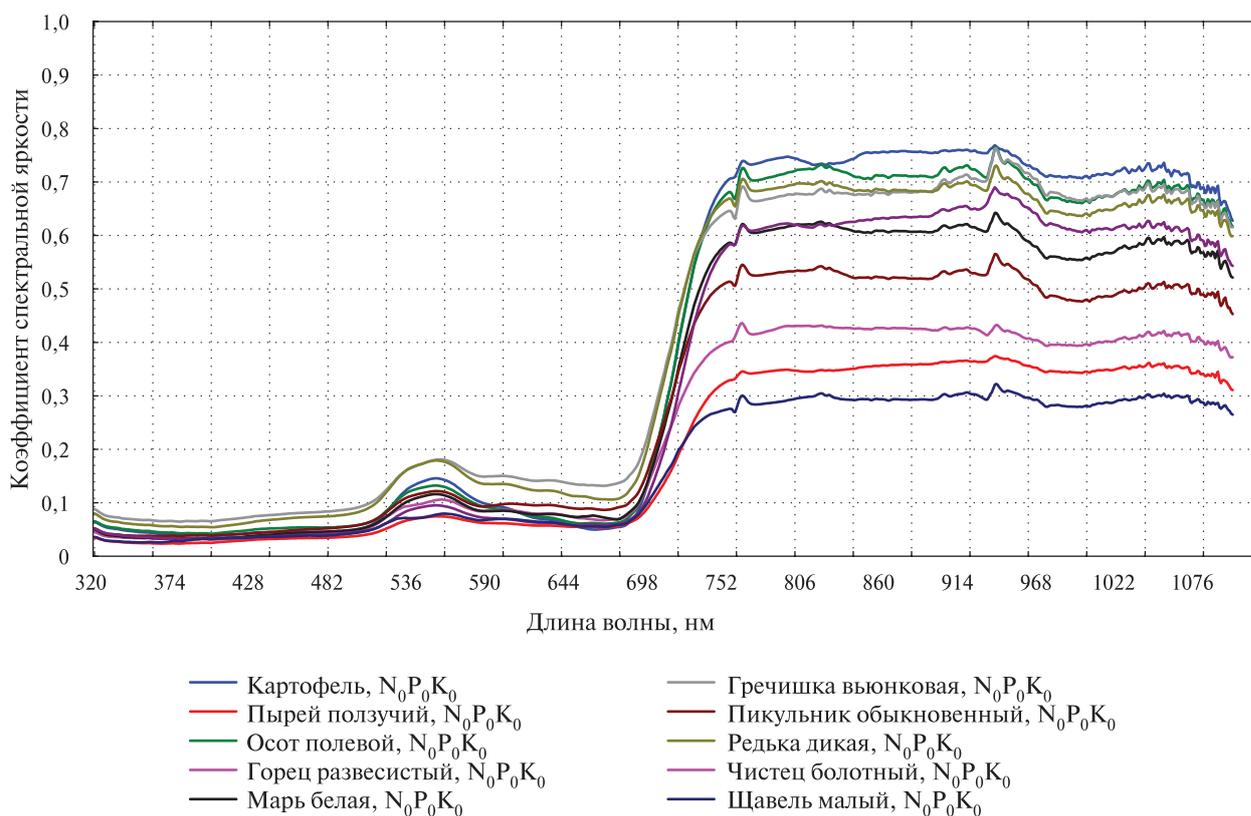


а

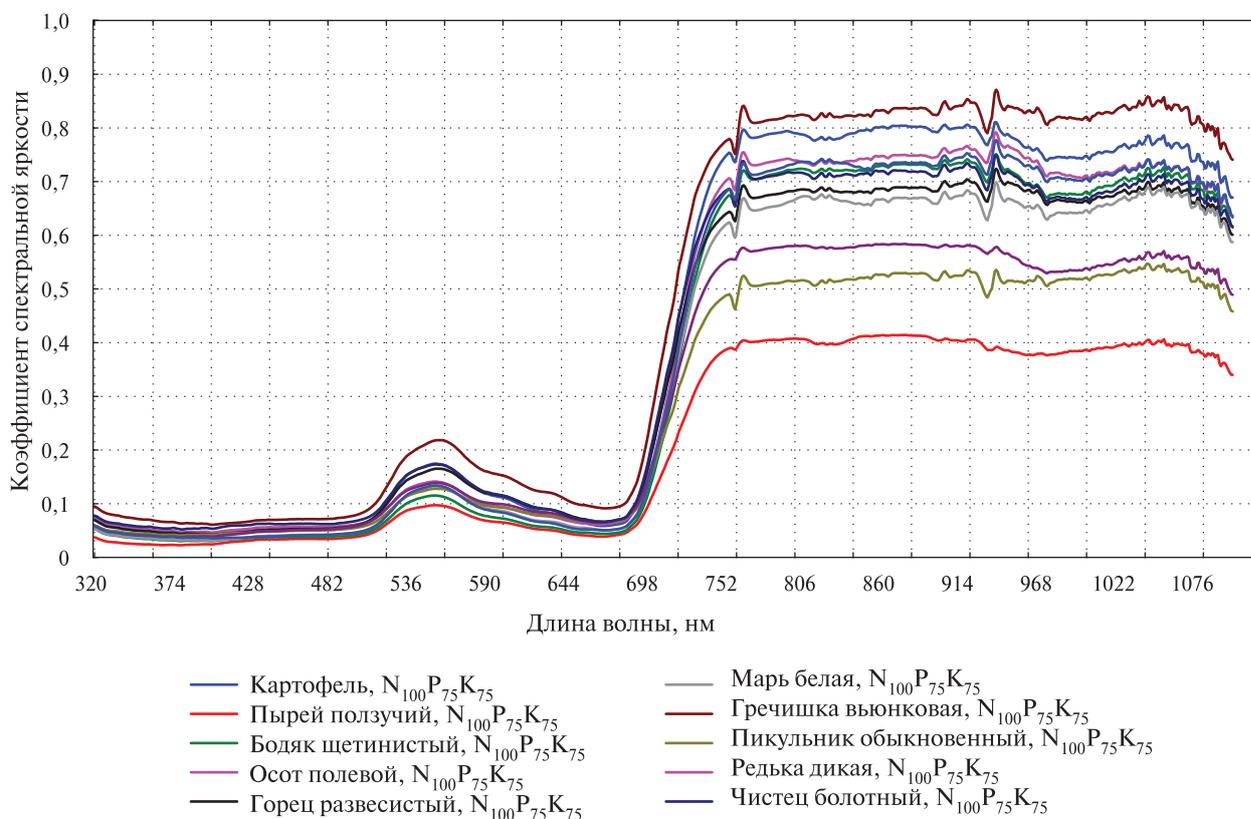


б

Рис. 2. Графики средних значений КСЯ в середине периода вегетации культурных и сорных растений в агроценозе ярового ячменя на неудобренном и удобренном вариантах опыта



а



б

Рис. 3. Графики средних значений КСЯ в середине периода вегетации культурных и сорных растений в агроценозе картофеля на неудобренном и удобренном варианте опыта

Среди произрастающей в посадках картофеля сорной растительности наименьшей отражательной способностью отличались растения щавеля малого, далее по возрастающей: растения пырея ползучего, горца развесистого, пикульника обыкновенного, мари белой, чистеца болотного, редьки дикой, гречишки вьюнковой, осота полевого. Многие из них имели явные отличия друг от друга, проявляющиеся в области ближнего инфракрасного спектра (рис. 3, см. с. 171). При этом листовой аппарат растений картофеля обладал более высокой отражательной способностью, чем сорных растений.

Таблица 1. Спектральные характеристики культурных и сорных растений в агроценозе ярового ячменя в разные фазы развития на неудобренном и удобренном вариантах опыта

Виды растений	Коэффициент спектральной яркости				
	Blue	Green	Red	RE	NIR
	<i>Начальные фазы развития (18 июня)</i>				
Яровой ячмень <i>Hordeum vulgare</i> L.	<u>0,20±0,05</u> 0,33±0,08	<u>0,39±0,09</u> 0,63±0,17	<u>0,13±0,05</u> 0,18±0,07	<u>0,22±0,08</u> 0,35±0,15	<u>0,37±0,01</u> 0,62±0,01
Марь белая <i>Chenopodium album</i> L.	<u>0,29±0,06</u> 0,25±0,05	<u>0,50±0,09</u> 0,42±0,08	<u>0,20±0,07</u> 0,17±0,06	<u>0,29±0,09</u> 0,25±0,09	<u>0,47±0,01</u> 0,43±0,01
Пикульник обыкновенный <i>Galeopsis tetrahit</i> L.	<u>0,28±0,07</u> 0,21±0,06	<u>0,56±0,12</u> 0,46±0,11	<u>0,20±0,07</u> 0,15±0,06	<u>0,32±0,11</u> 0,30±0,13	<u>0,50±0,01</u> 0,55±0,02
Фиалка полевая <i>Viola arvensis</i> Murr.	<u>0,23±0,05</u> 0,25±0,06	<u>0,42±0,07</u> 0,44±0,08	<u>0,18±0,06</u> 0,19±0,06	<u>0,24±0,06</u> 0,25±0,07	<u>0,37±0,01</u> 0,39±0,02
Пастушья сумка обыкновенная <i>Capsella bursa-pastoris</i> (L.) Medik	<u>0,30±0,07</u> 0,35±0,07	<u>0,54±0,10</u> 0,56±0,08	<u>0,22±0,07</u> 0,27±0,08	<u>0,29±0,07</u> 0,29±0,04	<u>0,41±0,02</u> 0,38±0,02
Гречишка вьюнковая <i>Fallopia convolvulus</i> (L.) A.Love	<u>0,25±0,06</u> 0,27±0,06	<u>0,46±0,08</u> 0,49±0,09	<u>0,19±0,06</u> 0,20±0,07	<u>0,26±0,07</u> 0,29±0,09	<u>0,40±0,01</u> 0,47±0,02
Редька дикая <i>Raphanus raphanistrum</i> L.	<u>0,29±0,06</u> 0,27±0,07	<u>0,52±0,09</u> 0,52±0,11	<u>0,21±0,07</u> 0,19±0,07	<u>0,29±0,08</u> 0,30±0,10	<u>0,43±0,01</u> 0,49±0,01
Осот полевой <i>Sonchus arvensis</i> L.	<u>0,33±0,07</u> 0,31±0,07	<u>0,59±0,12</u> 0,56±0,12	<u>0,22±0,08</u> 0,20±0,07	<u>0,34±0,12</u> 0,34±0,13	<u>0,56±0,01</u> 0,59±0,02
Мята полевая <i>Mentha arvensis</i> L.	<u>0,32±0,07</u> 0,22±0,05	<u>0,59±0,10</u> 0,42±0,10	<u>0,24±0,08</u> 0,15±0,05	<u>0,32±0,08</u> 0,29±0,13	<u>0,47±0,02</u> 0,54±0,02
Полынь обыкновенная <i>Atrémisia vulgaris</i> L.	<u>0,20±0,05</u> 0,25±0,06	<u>0,45±0,13</u> 0,49±0,12	<u>0,12±0,05</u> 0,17±0,06	<u>0,32±0,16</u> 0,31±0,13	<u>0,60±0,01</u> 0,55±0,02
	<i>Середина периода вегетации (14 июля)</i>				
Яровой ячмень <i>Hordeum vulgare</i> L.	<u>0,08±0,01</u> 0,03±0,01	<u>0,13±0,01</u> 0,06±0,01	<u>0,15±0,01</u> 0,04±0,004	0,28±0,09 0,15±0,09	0,46±0,02 0,40±0,01
Марь белая <i>Chenopodium album</i> L.	<u>0,04±0,01</u> 0,04±0,01	<u>0,08±0,01</u> 0,07±0,01	<u>0,05±0,004</u> 0,04±0,004	0,20±0,12 0,19±0,13	<u>0,51±0,01</u> 0,54±0,02
Пикульник обыкновенный <i>Galeopsis tetrahit</i> L.	<u>0,03±0,01</u> 0,04±0,01	<u>0,08±0,01</u> 0,09±0,01	0,05±0,004 0,05±0,005	<u>0,20±0,12</u> 0,24±0,16	<u>0,48±0,01</u> 0,64±0,02
Горец развесистый <i>Persicaria lapathifolia</i> (L.) Delarbre	<u>0,06±0,01</u> 0,04±0,01	<u>0,11±0,01</u> 0,09±0,01	<u>0,10±0,005</u> 0,06±0,01	<u>0,21±0,08</u> 0,19±0,10	<u>0,42±0,02</u> 0,40±0,01
Гречишка вьюнковая <i>Fallopia convolvulus</i> (L.) A.Love	<u>0,04±0,01</u> 0,03±0,01	<u>0,08±0,01</u> 0,09±0,01	<u>0,06±0,004</u> 0,05±0,005	<u>0,17±0,09</u> 0,20±0,12	0,38±0,01 0,49±0,01
Осот полевой <i>Sonchus arvensis</i> L.	<u>0,04±0,01</u> 0,04±0,01	<u>0,08±0,01</u> 0,10±0,02	<u>0,06±0,004</u> 0,05±0,01	<u>0,20±0,12</u> 0,25±0,17	<u>0,52±0,02</u> 0,67±0,02

Примечание: В числителе — значения на неудобренном варианте, в знаменателе — на удобренном.

Внесение минеральных удобрений не приводило к существенным изменениям в оптических свойствах растений картофеля, что могло быть обусловлено засушливыми погодными условиями в начальный период развития, которые в значительной степени способны снизить коэффициент полезного действия данного агротехнического мероприятия. В то же время спектральные измерения выявили увеличение отражательной способности некоторых видов сорных растений на удобренном варианте по сравнению с неудобренным. Согласно значениям КСЯ в ближнем инфракрасном участке спектра к таковым относятся марь белая (0,66 и 0,59), гречишка вьюнковая (0,83 и 0,69), горец развесистый (0,68 и 0,41), чистец болотный (0,72 и 0,63). Обратные изменения можно отметить для редки дикой, у которой КСЯ под влиянием удобрений снизился в 1,2 раза (0,67 и 0,56).

Таблица 2. Спектральные характеристики культурных и сорных растений в агроценозе картофеля на неудобренном и удобренном вариантах опыта (середина периода вегетации, 14 июля)

Виды растений	КСЯ				
	Blue	Green	Red	RE	NIR
Картофель <i>Solanum tuberosum</i> L.	$0,05 \pm 0,01$ $0,06 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,02$ $0,14 \pm 0,02$	$0,06 \pm 0,01$ $0,07 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,19$ $0,21 \pm 0,21$	$0,73 \pm 0,03$ $0,77 \pm 0,03$
Марь белая <i>Chenopodium album</i> L.	$0,05 \pm 0,01$ $0,05 \pm 0,01$	$0,10 \pm 0,01$ $0,11 \pm 0,02$	$0,07 \pm 0,003$ $0,06 \pm 0,01$	$0,26 \pm 0,16$ $0,27 \pm 0,17$	$0,59 \pm 0,02$ $0,66 \pm 0,02$
Пикульник обыкновенный <i>Galeopsis tetrahit</i> L.	$0,06 \pm 0,01$ $0,06 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,01$ $0,11 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,003$ $0,07 \pm 0,004$	$0,26 \pm 0,13$ $0,24 \pm 0,13$	$0,51 \pm 0,02$ $0,52 \pm 0,01$
Гречишка вьюнковая <i>Fallopia convolvulus</i> (L.) A.Love	$0,09 \pm 0,01$ $0,08 \pm 0,01$	$0,16 \pm 0,01$ $0,18 \pm 0,03$	$0,14 \pm 0,004$ $0,10 \pm 0,01$	$0,35 \pm 0,16$ $0,39 \pm 0,22$	$0,69 \pm 0,02$ $0,83 \pm 0,02$
Редька дикая <i>Raphanus raphanistrum</i> L.	$0,08 \pm 0,01$ $0,06 \pm 0,01$	$0,15 \pm 0,02$ $0,12 \pm 0,02$	$0,11 \pm 0,01$ $0,07 \pm 0,01$	$0,34 \pm 0,18$ $0,26 \pm 0,15$	$0,67 \pm 0,02$ $0,56 \pm 0,02$
Горец развесистый <i>Persicaria lapathifolia</i> (L.) Delarbre	$0,05 \pm 0,01$ $0,06 \pm 0,01$	$0,09 \pm 0,01$ $0,14 \pm 0,02$	$0,07 \pm 0,005$ $0,08 \pm 0,01$	$0,21 \pm 0,10$ $0,31 \pm 0,18$	$0,41 \pm 0,01$ $0,68 \pm 0,02$
Осот полевой <i>Sonchus arvensis</i> L.	$0,06 \pm 0,01$ $0,06 \pm 0,01$	$0,11 \pm 0,02$ $0,12 \pm 0,02$	$0,07 \pm 0,005$ $0,07 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,19$ $0,30 \pm 0,20$	$0,70 \pm 0,03$ $0,73 \pm 0,02$
Пырей ползучий <i>Elytrigia repens</i> (L.) Nevski	$0,04 \pm 0,005$ $0,04 \pm 0,01$	$0,07 \pm 0,005$ $0,08 \pm 0,01$	$0,06 \pm 0,001$ $0,04 \pm 0,005$	$0,15 \pm 0,08$ $0,17 \pm 0,10$	$0,35 \pm 0,01$ $0,39 \pm 0,01$
Чистец болотный <i>Stachys palustris</i> L.	$0,04 \pm 0,01$ $0,05 \pm 0,01$	$0,08 \pm 0,01$ $0,11 \pm 0,02$	$0,06 \pm 0,001$ $0,06 \pm 0,005$	$0,23 \pm 0,15$ $0,28 \pm 0,19$	$0,63 \pm 0,02$ $0,72 \pm 0,02$

Примечание: В числителе — значения на неудобренном варианте, в знаменателе — на удобренном.

Статистическая обработка полученных данных демонстрирует достоверность выявленных различий оптических свойств культурных и сорных растений в агроценозах ярового ячменя и картофеля, а также изменений, происходящих под влиянием минеральных удобрений (табл. 1 и 2).

Заключение

По результатам анализа наземных гиперспектральных измерений были выявлены особенности отражательной способности культурных и сорных растений и её изменчивость под влиянием вносимых минеральных удобрений в агроценозах ярового ячменя и картофеля на северо-западе России. Листовой аппарат растений ярового ячменя характеризовался меньшей отражающей способностью, чем у большинства видов сорных растений, что обусловлено их принадлежностью к разным классам растительности (однодольные и двудольные). По этой же причине в агроценозе картофеля по отражательным свойствам наиболее различимыми

оказались культурные растения и пырей ползучий. Статистической обработкой было подтверждено наличие достоверных различий в отражательных свойствах культурных и сорных растений в ближнем инфракрасном диапазоне, а для ярового ячменя — во всём диапазоне проведённых измерений (320–1100 нм). Данные различия чётко обозначились как в начальный период развития растений, так и в середине вегетации.

Под влиянием минеральных удобрений происходили существенные изменения в отражающих способностях культурных и сорных растений. В основном они проявлялись в увеличении значений коэффициента спектральной яркости в ближнем инфракрасном диапазоне, у ярового ячменя — во всём диапазоне измерений. В начальные фазы развития на удобренном варианте спектральная яркость листьев ярового ячменя оказалась выше, чем у сорных растений, тогда как в середине периода вегетации наблюдалась обратная ситуация.

Полученные результаты указывают на большие перспективы использования гиперспектральных измерений при оценке засорённости агроценозов, в том числе для обнаружения особенностей пространственного размещения сорных растений на полях в зависимости от условий минерального питания и дифференцированного применения гербицидов, предусмотренного системой точного земледелия. Это позволит добиться существенного снижения объёмов применения химических средств защиты растений, агроэкологических рисков загрязнения агроценозов и объектов окружающей среды, а также сельскохозяйственной продукции.

Литература

1. Антонов В. Н., Сладких Л. А. Мониторинг состояния посевов и прогнозирование урожайности яровой пшеницы по данным ДЗЗ // Геоматика. 2009. № 4. С. 50–53.
2. Архипова О. Е., Качалина Н. А., Тютюнов Ю. В., Ковалев О. В. Оценка засоренности антропогенных фитоценозов на основе данных дистанционного зондирования Земли (на примере амброзии полынолистной) // Исслед. Земли из космоса. 2014. № 6. С. 15–26. DOI: 10.7868/S0205961414050017.
3. Ашмарин И. П., Васильев Н. Н., Амбросов В. А. Быстрые методы статистической обработки и планирование экспериментов. Л.: ЛГУ, 1971. 78 с.
4. Богданов В. Л., Осипов А. Г., Гарманов В. В. Методика мониторинга засорения земель борщевиком Сосновского по данным дистанционного зондирования // Изв. Санкт-Петербургского гос. аграр. ун-та. 2020. № 59. С. 69–74. DOI: 10.24411/2078-1318-2020-12069.
5. Григорьев А. Н., Рыжиков Д. М. Общая методика и результаты спектрометрического исследования отражательных свойств борщевика Сосновского в диапазоне 320–1100 нм в интересах дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 1. С. 183–192. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-183-192.
6. Данилов Р. Ю., Кремнева О. Ю., Исмаилов В. Я., Третьяков В. А., Ризванов А. А., Кривошеин В. В., Пачкин А. А. 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. Ивченко В. К., Демьяненко Т. Н., Шевырнов А. П., Ботвич И. Ю., Емельянов Д. В., Ларько А. А. Оценка агротехнических факторов возделывания ячменя по ресурсосберегающим технологиям с помощью наземной спектрометрии // Вестн. Красноярского гос. аграрного ун-та. 2019. № 5. С. 86–93.
8. Канааш Е. В., Литвинович А. В., Ковлева А. О., Осипов Ю. А., Сальников Э. Продуктивность и оптические характеристики трех сортов пшеницы (*Triticum aestivum* L.) при известковании и внесении азотных удобрений // Сельскохозяйственная биология. 2018. Т. 53. № 1. С. 61–71. DOI: 10.15389/agrobiology.2018.1.61rus.
9. Качалина Н. А., Архипова О. Е., Гречищев А. В. Оценка засоренности агрофитоценозов Ростовской области с использованием гиперспектральных данных дистанционного зондирования Земли // Информатика и космос. 2016. № 1. С. 131–136.
10. Кондратьев К. Я., Федченко П. П. Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л.: Гидрометеиздат, 1982. 216 с.
11. Письман Т. И., Ерунова М. Г., Ботвич И. Ю., Емельянов Д. В., Кононова Н. А., Бобровский А. В., Крючков А. А., Шпедт А. А., Шевырнов А. П. Информативность спектральных вегетационных индексов для оценки засоренности посевов сельскохозяйственных культур по наземным и спутниковым данным // Исслед. Земли из космоса. 2021. № 3. С. 55–66. DOI: 10.31857/S0205961421030076.

12. Подушин Ю. В., Федулов Ю. П. Влияние агротехнических факторов на содержание хлорофилла в листьях озимой пшеницы сорта Нота // Тр. Кубанского гос. аграр. ун-та. 2009. № 16. С. 83–88.
13. Полин В. Д., Березовский Е. В., Ларина Н. В. Использование оптических датчиков “GREENSEEKER” при применении гербицида // Докл. ТСХА. 2010. Вып. 282. Ч. 1. С. 310–313.
14. Савин И. Ю., Докукин П. А., Вернюк Ю. И., Жоголев А. В. О влиянии засоренности на NDVI посевов ярового ячменя, определяемый по спутниковым данным MODIS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 3. С. 185–195. DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-185-195.
15. Савин И. Ю., Шишконокова Е. А., Прудникова Е. Ю., Виндекер Г. В., Грубина П. Г., Шарычев Д. В., Щепотьев В. Н., Вернюк Ю. И., Жоголев А. В. О влиянии засоренности посевов озимой пшеницы на их спектральную отражательную способность // Сельскохозяйственная биология. 2020. Т. 55. № 1. С. 53–65. DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.53rus.
16. Смук В. В., Шпанев А. М. Засоренность посадок картофеля, размещенных по пласту многолетних трав в Ленинградской области // Вестн. защиты растений. 2016. № 2(88). С. 38–42.
17. Смук В. В., Шпанев А. М. Дистанционный мониторинг засоренности посадок картофеля в периоды до и после появления всходов // Агрофизика. 2019. № 4. С. 46–53. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.04.07.
18. Фесенко М. А., Шпанев А. М. Фотометрическая экспресс-диагностика минерального питания и фитосанитарного состояния посевов зерновых культур // Агрофизика. 2019. № 2. С. 54–63. DOI: 10.25695/AGRPH.2019.02.08.
19. 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.
20. Шпанев А. М., Петрушин А. Ф. Методологические основы изучения оптических характеристик фитосанитарного состояния посевов // Агрофизика. 2017. № 4. С. 48–57.
21. 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.
22. Шпанев А. М., Лаптев А. Б., Гончаров Н. Р., Воронаев В. В. Интегрированная защита ячменя ярового на Северо-Западе России // Защита и карантин растений. 2020. № 6. С. 30–36.
23. Gerhards R., Christensen S. Real-time weed identification, decision making and path spraying in corn, sugarbeet, winter wheat and winter barley // Weed Research. 2003. V. 43. No. 6. P. 385–392.
24. Goel P. K., Prasher S. O., Patel R. M., Smith D. L., Ditommaso A. Use of airborne multi-spectral imagery for weed detection in field crops // Trans. ASAE. 2002. V. 45. No. 2. P. 443–449.
25. Merotto A. Jr., Bredemeier C., Vidal R. A., Goulart I. C. G. R., Bortoli E. D., Anderson N. L. Reflectance indices as a diagnostic tool for weed control performed by multipurpose equipment in precision agriculture // Planta Daninha. 2012. V. 30. No. 2. P. 437–447. DOI: 10.1590/S0100-83582012000200024.
26. Samseemoung G., Soni P., Jayasuriya H. P. W., Salokhe V. M. Application of low altitude remote sensing (LARS) platform for monitoring crop growth and weed infestation in a soybean plantation // Precision Agriculture. 2012. V. 13. Iss. 6. P. 611–627. DOI: 10.1007/s11119-012-9271-8.
27. Zheng H. B., Chen C., Fu Z. Q., Huang H. Research on canopy spectral characteristics of late rice populations with organic manure and chemical fertilizers // 17th National Symp. Theory and Technology of Rice Quality and High Yield Sponsored by the Crop Science Society of China in 2017. 17–20 Aug. 2017, Anhui, China. 2017. P. 6–13.

Changes in the spectral characteristics of cultivated and weed plants under the influence of mineral fertilizers in agrocenoses of the North-West of Russia

A. M. Shpanev, V. V. Smuk

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

The use of mineral fertilizers is an essential part of effective agricultural production throughout the world. In our country, it is especially important to improve the nutrition regime of cultivated plants on low-fertile sod-podzolic soils of the North-West region. At the same time, the application of fertilizers

can lead to changes in the spectral characteristics of cultivated and weed plants, which makes it difficult to interpret the data obtained from remote sensing of the Earth using satellites or unmanned aerial vehicles in relation to assessing the phytosanitary state of agrocenoses. The study of the characteristics of the reflectivity of cultivated plants and weeds and its variability under the influence of applied mineral fertilizers was carried out on the experimental basis of the Menkovsky branch of the Agrophysical Research Institute in 2020. The objects of hyperspectral ground measurements were spring barley and potato plants, as crops that are widely distributed in the North-West of Russia, as well as the most typical weed species for agrocenoses of these crops. Statistical processing confirmed the presence of significant differences in the reflective properties of cultivated and weed plants in the near infrared range, and for spring barley – in the entire range of measurements (320–1100 nm). These differences were clearly identified both in the initial period of plant development and in the middle of the growing season. Under the influence of mineral fertilizers, an increase in the reflectivity of spring barley plants and most types of weeds was observed, mainly due to the near infrared range. Within the fertilized variant, the spectral brightness of spring barley leaves turned out to be higher than on weeds, while on the unfertilized variant it was lower. The results obtained indicate good prospects for the use of hyperspectral measurements in assessing weed growth in agrocenoses, including the spatially uneven distribution of weeds under the influence of mineral fertilizers, and the differentiated use of herbicides provided for by the precision farming system.

Keywords: spring barley (*Hordeum vulgare* L.), potato (*Solanum tuberosum* L.), weeds, mineral fertilizers, ground-based hyperspectral measurements, spectral characteristic, spectral brightness factor

Accepted: 04.05.2022

DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-3-165-177

References

1. Antonov V. N., Sladkikh L. A., Crop monitoring and spring wheat yields forecasting basing on remote sensing data, *Geomatika*, 2009, No. 4, pp. 50–53 (in Russian).
2. Arkhipova O. E., Kachalina N. A., Tyutyunov Yu. V., Kovalev O. V., Weediness Assessment of Anthropogenic Phytocenoses on the Basis of Satellite Remote Sensing Data (A Case Example of Common Ragweed), *Issledovaniya Zemli iz kosmosa*, 2014, No. 6, pp. 15–26 (in Russian), DOI: 10.7868/S0205961414050017.
3. Ashmarin I. P., Vasiliev N. N., Ambrosov V. A., *Bystrye metody statisticheskoi obrabotki i planirovanie eksperimentov* (Fast methods of statistical processing and planning of experiments), Leningrad: Leningradskii gosudarstvennyi universitet, 1971, 78 p. (in Russian).
4. Bogdanov V. L., Osipov A. G., Garmanov V. V., Methodology for monitoring of lands contamination by Sosnovsky's hogweed according to remote sounding data, *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2020, No. 59, pp. 69–74 (in Russian), DOI: 10.24411/2078-1318-2020-12069.
5. Grigoriev A. N., Ryzhikov D. M., General methodology and results of spectroradiometric research of reflective properties of the Heracleum Sosnowskyi in the range 320–1100 nm for Earth remote sensing, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, Vol. 15, No. 1, pp. 183–192 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-1-183-192.
6. Danilov R. Yu., Kremneva O. Yu., Ismailov V. Ya., Tretyakov V. A., Rizvanov A. A., Krivoshein V. V., Pachkin A. A., General methodology and results of ground-based hyperspectral studies of seasonal changes in the reflective properties of agricultural crops and certain types of weeds, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 1, pp. 113–127 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-113-127.
7. Ivchenko V. K., Demyanenko T. N., Shevyrnogov A. P., Botvich I. Yu., Emelyanov D. V., Larko A. A., The assessment of agrotechnical factors of barley cultivation on resource-saving technologies by means of land spectrometry, *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019, No. 5, pp. 86–93 (in Russian).
8. Kanash E. V., Litvinovich A. V., Kovleva A. O., Osipov Yu. A., Salnikov E., Grain productivity and optical characteristics in three wheat (*Triticum aestivum* L.) varieties under liming and nitrogen fertilizers, *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2018, Vol. 53, No. 1, pp. 61–71 (in Russian), DOI: 10.15389/agrobiology.2018.1.61rus.
9. Kachalina N. A., Arkhipova O. E., Grechishchev A. V., Weediness assessment of anthropogenic phytocenoses in Rostov region using hyperspectral remote sensing data, *Informatsiya i kosmos*, 2016, No. 1, pp. 131–136 (in Russian).
10. Kondratiev 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. Pisman T. I., Erunova M. G., Botvich I. Yu., Emelyanov D. V., Kononova N. A., Bobrovsky A. V., Kryuchkov A. A., Shpedt A. A., Shevyrnogov A. P., Informative value of spectral vegetation indices for assessment of weediness of agricultural crops according to ground-based and satellite data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2021, No. 3, pp. 55–66 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961421030076.
12. Podushin Yu. V., Fedulov Yu. P., Influence of agrotechnical factors on the content of chlorophyll in the leaves of winter wheat variety Nota, *Trudy Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2009, No. 16, pp. 83–88 (in Russian).
13. Polin V. D., Berezovsky E. V., Larina N. V., The use of optical sensors “GREENSEEKER” when using a herbicide, *Reports of the Timiryazev Agricultural Academy*, 2010, Issue 282, Part 1, pp. 310–313 (in Russian).
14. Savin I. Yu., Dokukin P. A., Vernyuk Yu. I., Zhogolev A. V., On the impact of weediness on NDVI of spring barley crops, determined from MODIS satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 3, pp. 185–195 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-3-185-195.
15. Savin I. Yu., Shishkonakova E. A., Prudnikova E. Yu., Vindeker G. V., Grubina P. G., Sharychev D. V., Schepotiev V. N., Vernyuk Yu. I., Zhogolev A. V., About effect of weeds on spectral reflectance properties of winter wheat canopy, *Sel'skokhozyaystvennaya biologiya*, 2020, Vol. 55, No. 1, pp. 53–65 (in Russian), DOI: 10.15389/agrobiology.2020.1.53rus.
16. Smuk V. V., Shpanev A. M., Weediness of potato crops placed after perennial grasses in leningrad region, *Vestnik zashchity rastenii*, 2016, No. 2(88), pp. 38–42 (in Russian).
17. Smuk V. V., Shpanev A. M., Remote monitoring of weed infestation before and after potato emergence, *Agrofizika*, 2019, No. 4, pp. 46–53 (in Russian), DOI: 10.25695/AGRPH.2019.04.07.
18. Fesenko M. A., Shpanev A. M., Photometric express diagnostics of mineral nutrition and phytosanitary conditions of grain crops, *Agrofizika*, 2019, No. 2, pp. 54–63 (in Russian), DOI: 10.25695/AGRPH.2019.02.08.
19. Shpanev A. M., Experimental base for remote sensing of the phytosanitary state of agroecosystems in the North-West of the Russian Federation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 61–68 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-61-68.
20. Shpanev A. M., Petrushin A. F., Methodological basis for studying spectral characteristics of the phytosanitary crops state, *Agrofizika*, 2017, No. 4, pp. 48–57 (in Russian).
21. Shpanev A. M., Smuk V. V., Application of herbicides based on spectral measurements, *Zemledelie*, 2021, No. 1, pp. 37–40 (in Russian), DOI: 10.24411/0044-3913-2021-10109.
22. Shpanev A. M., Laptiev A. B., Goncharov N. R., Voropaev V. V., Integrated protection of spring barley in the North-West of Russia, *Zashchita i karantin rastenii*, 2020, No. 6, pp. 30–36 (in Russian).
23. Gerhards R., Christensen S., Real-time weed identification, decision making and path spraying in corn, sugarbeet, winter wheat and winter barley, *Weed Research*, 2003, Vol. 43, No. 6, pp. 385–392.
24. Goel P. K., Prasher S. O., Patel R. M., Smith D. L., Ditommaso A., Use of airborne multi-spectral imagery for weed detection in field crops, *Trans. ASAE*, 2002, Vol. 45, No. 2, pp. 443–449.
25. Merotto A. Jr., Bredemeier C., Vidal R. A., Goulart I. C. G. R., Bortoli E. D., Anderson N. L., Reflectance indices as a diagnostic tool for weed control performed by multipurpose equipment in precision agriculture, *Planta Daninha*, 2012, Vol. 30, No. 2, pp. 437–447, DOI: 10.1590/S0100-83582012000200024.
26. Samseemoung G., Soni P., Jayasuriya H. P. W., Salokhe V. M., Application of low altitude remote sensing (LARS) platform for monitoring crop growth and weed infestation in a soybean plantation, *Precision Agriculture*, 2012, Vol. 13, Issue 6, pp. 611–627, DOI: 10.1007/s11119-012-9271-8.
27. Zheng H. B., Chen C., Fu Z. Q., Huang H., Research on canopy spectral characteristics of late rice populations with organic manure and chemical fertilizers, *17th National Symp. Theory and Technology of Rice Quality and High Yield Sponsored by the Crop Science Society of China in 2017*, 17–20 Aug. 2017, Anhui, China, 2017, pp. 6–13.