

ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI ДЛЯ ПРОГНОЗА УРОЖАЙНОСТИ ЯРОВОГО ЯЧМЕНЯ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИИ

М. А. Фесенко, А. М. Шпанев

ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт»,
195220, г. Санкт-Петербург, Гражданский просп., д. 14,
E-mail: ramylek@yandex.ru; ashpanev@mail.ru

Поступила в редакцию 09.02.2023, принята к печати 31.08.2023

В Северо-Западном регионе России в течение пяти лет изучалась возможность использования вегетационного индекса NDVI для прогностических моделей урожайности ярового ячменя. Мониторинг развития посевов проводился еженедельно с помощью ручного датчика урожайности GreenSeeker® компании Trimble. Учеты проводили на постоянных учетных площадках с разными уровнями минерального питания и использования средств защиты растений. Коэффициент корреляции между урожайностью и сухой надземной биомассой ярового ячменя (без учета зерна) при уборке составил 0,87 в среднем за пять лет, индекс урожайности – 0,26. Урожайность варьировала от 2,1 до 4,1 т га⁻¹. Связь урожайности ярового ячменя с вегетационным индексом является значимой начиная с 4-й недели после появления всходов и до конца вегетации. Максимальная теснота связи ($R = 0,57–0,67$) наблюдалась с 5-й по 7-ю неделю вегетации. Построены уравнения регрессии между показателями NDVI в разные сроки исследования и урожайностью ярового ячменя. Прогностическая ценность моделей урожайности ярового ячменя только по величине NDVI невысокая ($R^2 = 0,46$). Установлено, что многолетняя и сезонная динамика NDVI посева ярового ячменя в большей степени определяется метеос условиями года и в меньшей – уровнем агротехнологий. Использование минеральных удобрений приводит к увеличению NDVI на всем протяжении вегетации. Использование гербицидов при равных дозах минеральных удобрений не приводит к достоверным различиям по величине вегетационного индекса. Связь между величиной вегетационного индекса и урожайностью ярового ячменя усиливается с увеличением уровня минерального питания. Качество прогноза может зависеть от сорта ячменя.

Ключевые слова: вегетационный индекс NDVI, ячмень яровой, применение минеральных удобрений, система защиты растений.

USE OF NDVI TO FORECAST THE YIELD OF SPRING BARLEY
IN THE NORTH-WEST REGION OF RUSSIA

M. A. Fesenko, A. M. Shpanev

Agrophysical Research Institute,
14, Grazhdanskiy pr., Saint-Petersburg, 195220,
E-mail: ramylek@yandex.ru; ashpanev@mail.ru

In the North-West of Russia, the possibility of using NDVI for predicting the yield of spring barley has been studied for 5 years. Monitoring was carried out weekly by the Greenseeker handheld crop sensor at the experimental plots with different rates of mineral fertilizer application and different plant-protecting technologies. The long-term and seasonal dynamics of spring barley crop NDVI were affected more by the annual weather conditions and less – by the applied treatments. The correlation coefficient between grain productivity and the total weight of spring barley plants (without grain) was 0.87 on average, the harvest index was 0.26. The yield varied from 2.1 to 4.1 t ha⁻¹. The relationship of the yield of spring barley with the vegetation index was significant, starting from the 4th week from germination and until the end of the growing season. The maximum tightness of the connection ($R = 0.57–0.67$) was recorded from the 5th to the 7th week of vegetation. Regression equations were constructed between the NDVI indicators at different dates and the yield of spring barley. The predictive value of spring barley yield models based only on NDVI is low ($R^2 = 0.46$). The use of mineral fertilizers led to an increase in NDVI. The use of herbicides did not result in any significant differences in the value of the vegetation index. The relationship between the value of the vegetation index and the yield of spring barley increases with an increase in the level of mineral nutrition. The quality of the forecast may depend on the barley variety.

Key words: vegetation index NDVI, spring barley, application of mineral fertilizers, plant protection system.

ВВЕДЕНИЕ

Регулярный мониторинг сезонных значений вегетационных индексов посевов сельскохозяйственных культур весьма актуален в настоящее время. Спектральные данные используются для мониторинга сельскохозяйственных угодий, оценки площадей посевов полевых культур и их состояния, а также для прогнозирования их урожайности. В качестве основного показателя дистанционного мониторинга состояния посевов чаще всего используют NDVI (Барталев, 2013; Савин, Вриелинг, 2008; Береза и др., 2015).

Наблюдается достаточно тесная корреляция урожайности с NDVI: $r = 0,60$ и более для озимых зерновых культур (Страшная и др., 2021; Сторчак и др., 2018); $r = 0,92$ для яровой пшеницы (Гопп, Савенков, 2019); $r = 0,88$ и более для риса (Скаженник и др., 2021); $r = 0,77$ и выше для кукурузы (Генин, Клебанович, 2018).

Для ярового ячменя в условиях алтайского Приобья корреляционно-регрессионный анализ показал очень тесную достоверную связь урожайности со значениями NDVI в вариантах с внесением азотных удобрений ($r = 0,81$ и более), в варианте без внесения удобрений корреляция умеренная ($r = 0,38$) (Кузикева, 2018).

Приведенные высокие коэффициенты корреляции между урожайностью зерновых культур и индексом NDVI были получены как на основе ДДЗ и длинных временных рядов, так и однолетних экспериментов с использованием БПЛА и ручных измерений.

Цель настоящих исследований – изучить возможность использования NDVI в прогностических моделях урожайности ярового ячменя, а также оценить точность прогноза при разных уровнях минерального питания и различной фитосанитарной ситуации (в первую очередь – засоренности).

Задачи исследования: установить вариабельность многолетней динамики NDVI, наличие и периоды значимой связи вегетационного индекса с урожайностью ярового ячменя, построить уравнения регрессии, показывающие зависимость урожайности ярового ячменя от вегетационного индекса, определить величину зависимости и приемы агротехники на нее влияющие.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в период 2015–2019 гг. на посевах ярового ячменя в севообороте, развернутом во времени и пространстве, – агроэкологическом стационаре Меньковского филиала Агрофизического НИИ (Ленинградская область).

Предшественник культуры – озимая рожь. Почва опыта – дерново-слабоподзолистая супесчаная.

В изучении раннеспелый сорт ярового ячменя Ленинградский (2015–2017 гг.) и среднеспелые сорта Атаман и Московский 86 (2018 и 2019 гг.).

Полевой эксперимент заложен по двухфакторной схеме:

Фактор А – три уровня минерального питания культур, созданных ежегодным (с 1982 г.) предпосевным внесением минеральных удобрений (Иванов и др., 2012): $N_{100}P_{75}K_{75}$, $N_{65}P_{50}K_{50}$, $N_0P_0K_0$.

Фактор В – наличие (СЗР) / отсутствие (БО) защитных мероприятий против всего комплекса вредных организмов. Для защиты растений проводили обработку фунгицидами: протравливание семян – Винцит Форте, КЭ, Клад, КС, Ламадор, КС или Систива; опрыскивание в период вегетации – Альто Супер, КЭ, Зантара КЭ, Прозаро, Солигор КЭ или Титул Дуо, ККР в дозах, рекомендованных производителями. Для борьбы с сорной растительностью ежегодно проводили обработку гербицидами Агритокс, ВК (с нормой расхода 1 л га^{-1}) или Базагран, ВР (2 л га^{-1}), расход рабочей жидкости составлял 300 л га^{-1} .

Приведенная схема эксперимента позволила получить массив сопряженных данных (вегетационные индексы NDVI и показатели урожайности ярового ячменя), сходный с данными, получаемыми при дистанционном зондировании, но при этом с точной привязкой к уровню агротехнологий.

Измерения индекса NDVI осуществляли еженедельно с помощью ручного датчика урожайности GreenSeeker® компании Trimble на стационарных учетных площадках, установленных на весь период вегетации культуры (Зубков, 1978). В каждом варианте опыта располагали по 12 постоянных площадок площадью $0,1 \text{ м}^2$ ($0,32 \times 0,32 \text{ м}$), ежегодно – 72, за все годы исследования – 360. На них же проводили учет урожайности и основных элементов структуры урожая.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Годы исследований значительно различались по метеорологическим условиям вегетации. Так, сумма активных температур за вегетационный период ярового ячменя изменялась в пределах $1200\text{--}1850^\circ\text{C}$, сумма осадков – $165\text{--}285 \text{ мм}$, ГТК варьировал от 1,0 до 1,8. Погода определяла календарные даты посева, прохождение основных фаз развития культуры, развитие вредителей, болезней и сорных растений, сроки и возможность проведения агротехнических мероприятий. Даты посева варьировали от 25 апреля до 16 мая (115-й и 136-й день от начала года соответственно), всходов – от 12 до 24 мая, созревания – от 8 до 14 августа. Продолжительность периода от посева до созревания в разные годы составляла 85–111 дней, т.е. разница достигала 26-ти дней.

Замеры вегетационного индекса начинали во вторую неделю после появления всходов (фаза кущения ярового ячменя). Далее мониторинг состояния посева проводили еженедельно до начала созревания, т.е. осуществляли от 7 до 9 измерений за сезон. Счет недель измерений – от фазы появления всходов.

Обширный экспериментальный материал позволил получить осредненный сезонный ход NDVI (рис. 1). Максимального значения индекс достигал к 6–7-й неделе после появления всходов. Определение интерквантильного размаха (ИКР) как характеристики разброса распределения величины вегетационного индекса показало значительное варьирование результатов измерений. Разброс изменчивости увеличивался по мере увеличения значений NDVI и, достигнув максимума, снижался.

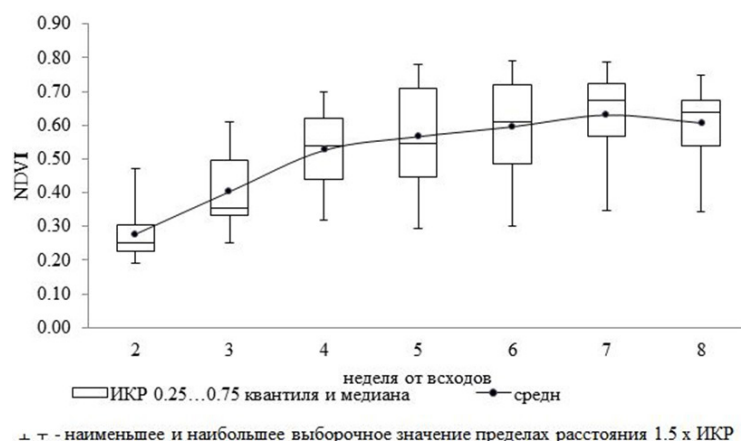


Рис. 1. Сезонный ход NDVI в посеве ячменя, среднее за 2015–2019 гг.

Увеличение разброса к 5–6-й неделе от всходов свидетельствует о появлении значительной неоднородности в выборке и о возможном выделении из нее отдельных групп элементов.

Индекс NDVI является общепризнанным показателем количества фотосинтетически активной биомассы. В подавляющем большинстве случаев биомасса посева и его урожайность тесно связаны. В нашем эксперименте коэффициент корреляции между урожайностью и воздушно-сухой надземной массой растений ярового ячменя (без зерна) при уборке составил 0,87 в среднем за пять лет. Средняя урожайность варьировала от 2,1 до 4,1 т га⁻¹ (рис. 2).

Доля зерна в общей биомассе растений (уборочный индекс) составила 0,26.

Коэффициенты корреляции между величиной вегетационного индекса и урожайностью ярового ячменя были положительными за весь период наблюдений и статистически значимыми начиная с 4-й недели вегетации (табл. 1). Для биомассы ярового ячменя в целом получены более высокие по силе связи значения. Максимальная теснота связи фиксировалась с 5-й по 7-ю неделю. В 2015 и 2019 гг. состояние посевов позволило провести замеры на 9-й неделе вегетации. Значения последнего замера (начало созревания) и максимальная величина индекса были вынесены в отдельные классы.

 Рис. 2. Урожайность ячменя в разные годы изучения, т га⁻¹

Таблица 1. Коэффициенты корреляции между NDVI и продуктивностью ярового ячменя

NDVI, неделя после всходов	NDVI, 2	NDVI, 3	NDVI, 4	NDVI, 5	NDVI, 6	NDVI, 7	NDVI, 8	NDVI, посл.	NDVI, max
Урожайность	0,01*	0,28*	0,51	0,67	0,63	0,57	0,48	0,49	0,53
Фитомасса (с зерном)	0,13*	0,39	0,56	0,68	0,67	0,59	0,48	0,55	0,56

Примечание: * – корреляция статистически незначима.

Вопреки ожиданию, теснота связи урожайности и биомассы с максимальными значениями NDVI оказалась слабее, чем корреляции на 5–7-й неделях вегетации. Данный факт позволяет говорить о возможности прогноза урожайности по NDVI_{«неделя вегетации»} не дожидаясь перелома в сезонном ходе (для определения максимума NDVI), что ускоряет сроки проведения и значительно упрощает сами расчеты. Однако сила связи между показателями средняя (максимальный коэффициент корреляции равен 0,67), что ставит под сомнение высокую точность и, как следствие, правомочность такого прогноза.

На рис. 3 показана связь урожайности ярового ячменя со значениями NDVI в 5-ю неделю вегетации (далее – NDVI-5) по всему массиву измерений (360 пар значений), цветными значками обозначены данные отдельных лет, приведено уравнение линейной зависимости между показателями. Из графика видно,

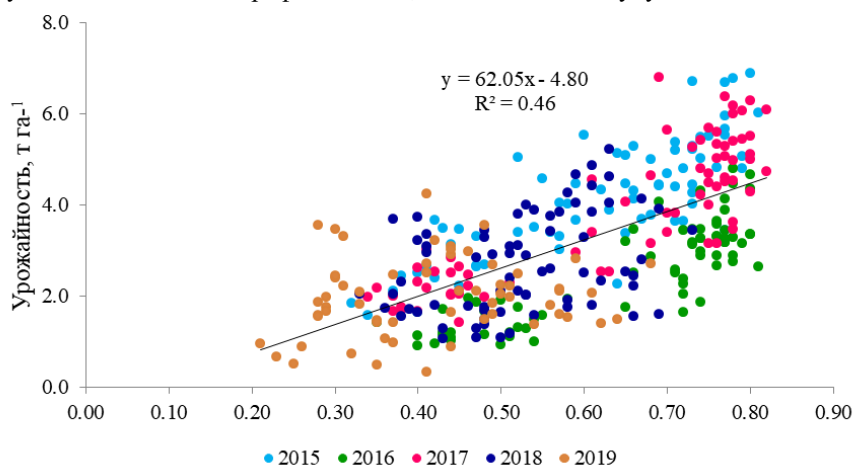


Рис. 3. Зависимость урожайности ярового ячменя от значений NDVI-5 и ее изменчивость по годам

Таблица 2. Зависимость урожайности ячменя от величины индекса NDVI-5 в разные годы.

Год	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
2015	$y = 76,39x - 5,67$	$R^2 = 0.65$
2016	$y = 65,30x - 17,02$	$R^2 = 0.71$
2017	$y = 78,76x - 11,50$	$R^2 = 0.73$
2018	$y = 41,02x + 5.46$	$R^2 = 0.13$
2019	$y = 12,63x + 14.65$	$R^2 = 0.03$

Установить какую-либо закономерность влияния погодных условий и хода вегетации культуры на коэффициент детерминации по имеющимся данным не представилось возможным. Таким образом, точность и правомочность прогноза урожайности исключительно по вегетационному индексу NDVI по-прежнему вызывает сомнения. Данные изучения за три года (2015–2017 гг.) позволили сделать вывод об информативности вегетационного индекса NDVI в 5–7-ю недели для достоверного прогноза урожайности ярового ячменя – коэффициент корреляции между признаками составил 0,86–0,93 (Фесенко, Шпанев, 2021). Снижение точности прогноза в 2018 и 2019 гг., возможно, связано с заменой раннеспелого сорта

что как урожайность, так и вегетационный индекс, а также влияние последнего на величину урожайности имеют существенный разброс и в значительной степени (особенно величина урожайности) определяются условиями вегетации. Коэффициент детерминации, равный 0,46, подтверждает сделанный ранее вывод о невысокой точности прогноза урожайности ячменя по величине NDVI. Аппроксимация данных с помощью других функций (полином 2 и 3 степени, логарифм) не привела к повышению точности прогноза.

Уравнения регрессии для тех же признаков, построенные отдельно для каждого года, показали сильную зависимость в 2 года из 5-ти и ее полное отсутствие в такое же количество лет, в один год связь была умеренной (табл. 2). Логарифмирование зависимой переменной с целью минимизации искажений не улучшило качество прогноза.

ячменя Ленинградский на среднеспелые Атаман и Московский 86 соответственно. При этом в полевых учетах и последующих расчетах не было отмечено существенных различий с предшествующими годами ни в фенологическом развитии растений, ни в сезонном ходе NDVI, а также значительного роста урожайности. Гипотеза о лучшем качестве прогноза по более поздним датам замера для таких сортов не получила подтверждения: максимальный коэффициент детерминации составил 0,07.

Данные, приведенные выше, рассматривали посев ярового ячменя в разные годы без учета уровня минерального питания и фитосанитарной ситуации, складывающейся в посеве.

Значимое увеличение вегетационного индекса под влиянием различных доз удобрений отмечали во все годы за весь период вегетации начиная с 3-й недели после всходов. Различия достигали максимума к 5-й неделе вегетации. Это во многом объясняет увеличение разброса изменчивости NDVI к 5-6-й неделе и появление значительной неоднородности в выборке, отмеченные ранее.

При равных дозах минеральных удобрений не выявлено достоверных различий между обработанными гербицидами и вариантами без защиты растений ни по величине общей фитомассы посева (ячмень + сорные растения), ни по зерновой продуктивности ячменя, ни по величине индекса NDVI. Это обусловлено тем, что использование гербицидов приводит к достоверному уменьшению

фитомассы сорных растений при уборке и вместе с тем к увеличению фитомассы ячменя.

Уравнения регрессии, показывающие зависимость урожайности ярового ячменя от NDVI-5, построенные отдельно для каждого уровня минерального питания, показали наличие умеренной или средней связи между показателями (табл. 3). Коэффициент корреляции увеличивался с увеличением уровня минерального питания и на максимуме достигал только 0,62 (против 0,67 для массива данных в целом). Таким образом, выделение из общего массива отдельных блоков, различающихся по уровню минерального питания, не улучшило, а ухудшило качество прогноза урожайности для каждого из них.

Таблица 3. Зависимость урожайности ячменя от величины индекса NDVI-5 при разных уровнях минерального питания

Доза удобрений	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации
Без удобрений	$y = 35,58x + 5,15$	$R^2 = 0,13$
N65P50K50	$y = 44,17x + 6,087$	$R^2 = 0,19$
N100P75K75	$y = 70,85x - 9,24$	$R^2 = 0,39$

ВЫВОДЫ

Связь урожайности ярового ячменя с вегетационным индексом являлась значимой начиная с 4-й недели после появления всходов и до конца вегетации. Максимальная теснота связи зафиксирована с 5-й по 7-ю неделю.

Прогностическая ценность моделей урожайности ярового ячменя по величине NDVI

невысокая ($R^2 = 0,46$). Разделение данных по уровню минерального питания не улучшило качество прогноза.

Полученные данные приводят к выводу о невозможности достоверного прогноза урожайности ярового ячменя в условиях Северо-Запада России только по величине NDVI.

Список литературы

- Барталев С.А., Лупян Е.А. Исследования и разработки ИКИ РАН по развитию методов спутникового мониторинга растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 1. С. 197–214.
- Бережа О.В., Страшная А.И., Лупян Е.А. О возможности прогнозирования урожайности озимой пшеницы в среднем Поволжье на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 1. С. 18–30.
- Генин В.А., Клебанович Н.В. Моделирование урожайности кукурузы и сои по данным дистанционного зондирования Земли // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии. 2018. № 4. С. 100–104.
- Гопп Н.В., Савенков О.А. Связь показателя NDVI и урожайности яровой пшеницы со свойствами пахотного горизонта черноземов глинисто-иллювиальных элювирированных и темно-серых почв // Почвоведение. 2019. № 3. С. 377–386. DOI: 10.1134/S0032180X19030055
- Зубков А.Ф. Методические указания по сбору полевой биологической информации с целью оценки вредоносности комплекса вредных организмов. Л.: ВИЗР, 1978. 18 с.
- Иванов А.И., Фесенко М.А., Вертебный В.Е., Дубовицкая В.И. Результаты и развитие исследований в многолетнем стационарном полевом опыте в семипольном севообороте // Агрофизика. 2012. № 3. С. 50–57.
- Кузикеев Ж.В., Кузикеева А.П. Связь нормализованного индекса вегетации (NDVI) с урожайностью ярового ячменя в условиях алтайского Приобья // Научные исследования для АПК в Сибири и Казахстане. Барнаул, 2018. С. 70–76.
- Савин И.Ю., Вриелинг А. Анализ многолетней динамики растительных ресурсов на территории России по данным NOAA AVHRR // Исследование Земли из космоса. 2008. № 5. С. 74–82.
- Скаженник М.А., Чижиков В.Н., Петрушин А.Ф., Киселев Е.Н., Митрофанов Е.П. Исследование продукционного процесса агрофитоценозов риса в связи с их состоянием // Тенденции развития агрофизики: от актуальных проблем земледелия и растениеводства к технологиям будущего. Материалы III международной научной конференции. 2021. С. 449–454.
- Сторчак И.Г., Шестакова Е.О., Ерошенко Ф.В. Связь урожайности посевов озимой пшеницы с NDVI для отдельных полей // Аграрный вестник Урала. 2018. № 6(173). С. 64–68. DOI: 10.25930/awm3-sw92

- Страшная А.И., Береза О.В., Кланг П.С. Прогнозирование урожайности зерновых культур на основе комплексирования наземных и спутниковых данных в субъектах Южного федерального округа // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2021. № 2 (380). С. 111–137. DOI: 10.37162/2618-9631-2021-2-111-137
- Фесенко М.А., Шпанев А.М. Влияние средств химизации на оптические свойства агроценоза ярового ячменя с подсевом многолетних трав // Вестник Казанского государственного аграрного университета. 2021. Т. 16. № 2(62). С. 55–59. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-55-59

References

- Bartalev S.A., Lupyan Ye.A. Issledovaniya i razrabotki IKI RAN po razvitiyu metodov sputnikovogo monitoringa rastitel'nogo pokrova [Research and development of IKI RAS on the development of methods of satellite monitoring of vegetation cover] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2013, no. 10 (1), pp. 197–214.
- Bereza O.V., Strashnaya A.I., Lupyan Ye.A. O vozmozhnosti prognozirovaniya urozhaynosti ozimoy pshenitsy v srednem Povolzh'ye na osnove kompleksirovaniya nazemnykh i sputnikovykh dannykh [On the possibility of forecasting the yield of winter wheat in the Middle Volga region based on the integration of ground and satellite data] // *Sovremennyye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]*, 2015, no. 12(1), pp. 18–30.
- Genin V.A., Klebanovich N.V. Modelirovaniye urozhaynosti kukuruzy i soi po dannym distantsionnogo zondirovaniya Zemli [Modeling of corn and soybean yields according to Earth remote sensing data] // *Vestnik Belorusskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii [Bulletin of the Belarusian State Agricultural Academy]*, 2018, no. 4, pp. 100–104.
- Gopp N.V., Savenkov O.A. Svyaz' pokazatelya NDVI i urozhaynosti yarovoy pshenitsy so svoystvami pakhotnogo gorizonta chernozemov glinisto-illyuvial'nykh elyuvirovannykh i temno-serykh pochv [The relationship of the NDVI index and the yield of spring wheat with the properties of the arable horizon of chernozems of clay-illuvial eluvial and dark gray soils] // *Pochvovedeniye [Soil Science]*, 2019, no. 3, pp. 377–386. (In Russ.). DOI: 10.1134/S0032180X19030055
- Zubkov A.F. Metodicheskiye ukazaniya po sboru polevoy biotsenologicheskoy informatsii s tsel'yu otsenki vrednosnosti kompleksa vrednykh organizmov [Methodological guidelines for collecting field biocenological information in order to assess the harmfulness of a complex of harmful organisms]. Leningrad: VIZR, 1978, 18 p.
- Ivanov A.I., Fesenko M.A., Vertebnyy V.Ye., Dubovitskaya V.I. Rezul'taty i razvitiye issledovaniy v mnogoletnem statsionarnom polevom opyte v semipol'nom sevooborote [Results and development of research in long-term stationary field experience in semipolar crop rotation] // *Agrofizika [Agrophysics]*, 2012, no. 3, pp. 50–57.
- Kuzikeyev Zh.V., Kuzikeyeva A.P. Svyaz' normalizovannogo indeksa vegetatsii (NDVI) s urozhaynost'yu yarovogo yachmenya v usloviyakh altayskogo Priob'ya [The relationship of the normalized vegetation index (NDVI) with the yield of spring barley in the conditions of the Altai Ob region] // *Nauchnyye issledovaniya dlya APK v Sibiri i Kazakhstane [Scientific research for agriculture in Siberia and Kazakhstan]*, Barnaul, 2018, pp. 70–76.
- Savin I.Yu., Vriyeling A. Analiz mnogoletney dinamiki rastitel'nykh resursov na territorii Rossii po dannym NOAA AVHRR [Analysis of long-term dynamics of plant resources in Russia according to NOAA AVHRR data] // *Issledovaniye Zemli iz kosmosa [Exploration of the Earth from space]*, 2008, no. 5, pp. 74–82.
- Skazhennik M.A., Chizhikov V.N., Petrushin A.F., Kiselev Ye.N., Mitrofanov Ye.P. Issledovaniye produktsionnogo protsessa agrofitotsenozov risa v svyazi s ikh sostoyaniyem [Investigation of the production process of rice agrophytocenoses in connection with their condition] // *Tendentsii razvitiya agrofiziki: ot aktual'nykh problem zemledeliya i rasteniyevodstva k tekhnologiyam budushchego. Materialy III mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii [Trends in the development of agrophysics: from current problems of agriculture and crop production to technologies of the future. Materials of the III International Scientific Conference]*, 2021, pp. 449–454.
- Storchak I.G., Shestakova Ye.O., Yeroshenko F.V. Svyaz' urozhaynosti posevov ozimoy pshenitsy s NDVI dlya otidel'nykh poley [The relationship of winter wheat crop yields with NDVI for individual fields] // *Agrarnyy vestnik Urala [Agrarian bulletin of the Urals]*, 2018, no. 6(173), pp. 64–68.
- Strashnaya A.I., Bereza O.V., Klang P.S. Prognozirovaniye urozhaynosti zernovykh kul'tur na osnove kompleksirovaniya nazemnykh i sputnikovykh dannykh v sub'yektakh Yuzhnogo federal'nogo okruga [Forecasting the yield of grain crops based on the integration of ground and satellite data in the subjects of the Southern Federal District] // *Gidrometeorologicheskiye issledovaniya i prognozy [Hydrometeorological studies and forecasts]*, 2021, no. 2 (380), pp. 111–137. DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2021-2-111-137>
- Fesenko M.A., Shpanev A.M. Vliyaniye sredstv khimizatsii na opticheskiye svoystva agrotsenozov yarovogo yachmenya s podsevom mnogoletnikh trav [The influence of chemicalization agents on the optical properties of the agrocenosis of spring barley with the sowing of perennial grasses] // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta [Bulletin of the Kazan State Agrarian University]*, 2021, vol. 16, no. 2(62), pp. 55–59. DOI: 10.12737/2073-0462-2021-55-59