

ПРОВЕРКА АЛГОРИТМА ДИСТАНЦИОННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР ПО СПУТНИКОВЫМ ЦИФРОВЫМ ДАНЫМ ВЕГЕТАЦИОННОГО ИНДЕКСА NDVI

С.Д. ВИЛЮНОВ, старший научный сотрудник, ORCID ID: 0000-0002-7373-5951
М.М. ЧЕРНЫШОВ, младший научный сотрудник, ORCID ID: 0009-0002-7520-2486
С.В. ПОТАРАКИН, кандидат сельскохозяйственных наук
М.А. МАРТЫНОВ, научный сотрудник, ORCID ID: 0009-0005-6539-7349
Л.И. ГЛАЗКОВА, младший научный сотрудник, ORCID ID: 0009-0000-1241-3302
Е.В. МИТЮХИНА, младший научный сотрудник, ORCID ID: 0009-0006-9658-9340

ФГБНУ ФНЦ ЗЕРНОБОБОВЫХ И КРУПЯНЫХ КУЛЬТУР, г. ОРЕЛ
E-mail: vniizbk@mail.ru

В статье показаны результаты изучения функционирования элементов алгоритма по обработке цифровых данных оптических индексов получаемых методом дистанционного зондирования (спутники, БПЛА) посевов. Проведено изучение динамики и сопоставление спутниковых данных вегетационного индекса NDVI за три контрастных по погодным условиям, года (2021...2023 гг.) на семеноводческих полях размножения культур селекции ФНЦ ЗБК. Предложен простой метод первичной подготовки спутниковых данных для дальнейшего кластерного анализа с целью группировки обрабатываемого цифрового потока по типу культуры. Предложен способ выявления крайних дат для целевой обработки данных для отсека лишнего массива. На фоне полной идентификации посевов озимой мягкой пшеницы и сои выявлено присутствие 10% ошибок группировки в яровых культурах. Проанализирован момент совмещения цифровых данных, полученных из разных источников, с целью тестирования обработки данных одновременно с цифровым эталоном культуры (сорта).

Ключевые слова: вегетационные индексы, семеноводство, кластерный анализ, алгоритм распознавания культур в посевах, экстраполяция.

Для цитирования: Вилюнов С.Д., Чернышов М.М., Потаракин С.В., Мартынов М.А., Глазкова Л.И., Митюхина Е.В. Проверка алгоритма дистанционной идентификации сельскохозяйственных культур по спутниковым цифровым данным вегетационного индекса NDVI. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2023; 4(48):140-150. DOI: 10.24412/2309-348X-2023-4-140-150

VALIDATION OF THE ALGORITHM FOR REMOTE CROP IDENTIFICATION USING SATELLITE DIGITAL DATA OF VEGETATION INDEX NDVI

**S.D. Vilyunov, M.M. Chernyshov, S.V. Potarakin, M.A. Martynov, L.I. Glazkova,
E.V. Mityukhina**

FSBSI FEDERAL SCIENTIFIC CENTER OF LEGUMES AND GROAT CROPS, OREL

Abstract: *The article shows the results of studying the functioning of the elements of the algorithm for processing digital data of optical indices obtained by remote sensing (satellites, UAVs) of crops. The dynamics and comparison of satellite data of vegetation index NDVI for the three, contrasting weather conditions, years (2021...2023) in seed propagating fields of FSC LGC breeding crops were studied and compared. A simple method for initial preparation of satellite data for further cluster analysis to group the processed digital stream by crop type is presented. The*

method of identification of extreme dates for targeted data processing to cut off the excessive array is proposed. On the background of complete identification of winter soft wheat and soybean crops, the presence of 10% grouping errors in spring crops was revealed. The moment of combining digital data obtained from different sources was analyzed in order to test data processing simultaneously with a digital crop (variety) reference.

Keywords: vegetation indices, seed production, cluster analysis, algorithm for recognizing crops in plantings, extrapolation

Введение

Ключевым моментом семеноводства и реализации сортосмены (сортообновления) является полевое обследование посевов с целью определения сортовой чистоты или типичности растений, засоренности, пораженности болезнями и поврежденности вредителями (апробация). В настоящее время таким контролем занимаются узкоспециализированные специалисты, и без проведения апробации или регистрации посевов (посадок) сельхозкультур, полученные с этих площадей семена признаются несортowymi - несортowymi семена высевать запрещено (Федеральный закон Российской Федерации от 17 декабря 1997 года № 149-ФЗ «О семеноводстве» прекратил своё действие 1 сентября 2023 года и вступил в силу новый Федеральный закон от 30.12.2021 № 454-ФЗ «О семеноводстве»). Но прежде чем оформлять посев как семеноводческий, и соответственно нести экономические затраты - отвечающий за посевы специалист должен самостоятельно убедиться, что посевы именно того сорта и имеют надлежащее состояние.

Семеноводческие посевы зачастую расположены удаленно, подготавливаются и высеваются техническим персоналом, а при непредсказуемом погодном факторе и возможных технологических сбоях - могут возникать организационные ошибки, пересортица и т.п. Соответственно, специалисту семеноводу необходим дистанционный инструмент, выявляющий явные недостатки и несоответствия на посевах, еще до вызова апробаторов. В настоящее время для дистанционного зондирования посевов существует множество спутниковых сервисов удаленного контроля вегетирующих сельскохозяйственных культур. Такие программные комплексы дают различные фотометрические и цифровые характеристики интересующих площадей в виде различных вегетационных индексов. Также существует множество алгоритмов обработки этих данных с целью решения задачи классификации сельскохозяйственных культур [1, 2, 3], но в большинстве случаев – это направлено на необходимость сбора статистических данных и на решение административных задач контроля и управления, и не как не используется в предварительной апробации.

Индексы отражения усиливают контраст между почвой и растительностью, но сводят к минимуму влияние условий освещения. Среди таких индексов – самый известный нормализованный разностный вегетационный индекс (обычно называемый вегетативным индексом) $NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED)$ (normalized difference vegetation index), где NIR – яркость или коэффициент отражения в ближней инфракрасной области спектра (0,7-1,0 мкм); RED – в красной области спектра (0,6-0,7 мкм). Он наиболее популярен и часто используются и впервые описан В. J. Rouse в 1973 году [4]. Индекс предполагает соотношение максимального поглощения солнечной радиации растениями, лежащего в красной области, и максимального отражения клеточных структур листа в инфракрасной области, является простым количественным показателем объема фотосинтетически активной биомассы. Для растительности NDVI принимает положительные значения, и чем больше вегетирующая фитомасса, тем он выше и характеризует плотность растительности, что позволяет оценить всхожесть, рост, развитие и т.п. Индекс малочувствителен к атмосферным и почвенным фонам, кроме случаев со слабой растительностью [5, 6]. Для прогнозирования влияния действующих условий на состояние растений целесообразно использовать метод сравнений текущих значений со средне многолетними. При этом для исключения особенностей конкретного вегетационного периода (опережение либо отставание в развитии) усредненные временные ряды NDVI должны быть подвергнуты выравниванию. Такой подход позволит с

меньшей ошибкой анализировать информацию об отклонениях текущих значений от среднесезонных на сопоставимых стадиях развития [2].

Цель исследования – проверить функциональность алгоритма предварительной обработки цифровых спутниковых данных вегетационного индекса NDVI, поступивших за вегетационный период с семеноводческих полей, с целью выявления сортовой спецификации различных сельскохозяйственных культур.

Методика исследований

Исследования проводились на базе ФНЦ зернобобовых и крупяных культур (53.01°с.ш. 36.97°в.д.). Этот центр находится в центральной части Орловской области, примерно в 8 километрах к северо-западу от города Орла. Регион имеет переходный климат от лесной зоны к степной. Климат характеризуется равномерным годовым распределением температур, влажности и осадков. Самый дождливый период (43% годовых осадков) приходится на июнь, июль и август. Дожди в основном ливневые. Самые засушливые месяцы – это май и первая половина июня, когда относительная влажность воздуха падает с 64-66% в апреле до 46-49% в мае. Летом относительная влажность держится на уровне около 50%. В весенние месяцы относительная влажность может падать до 30%, особенно в жаркие дни при ветрах, приносящих засуху. Продолжительность сельскохозяйственного сезона с температурами выше 10°С составляет 139-137 дней. Сумма среднесуточных температур выше 10°С составляет от 2200-2500°С, что намного превышает потребность культур в эффективных температурах. За этот период выпадает, в среднем, от 290 до 310 мм осадков. Годы исследования характеризовались контрастными (различными) метеосостояниями. Погодные условия вегетационного периода 2021 г. были засушливыми (ГТК=0,83), повышенные температуры в июне-июле существенно повлияли на формирование урожая отдельных сортобразцов. Метеосостояния вегетационного периода летом 2022 г. были благоприятными для развития сои и слабо засушливыми (ГТК=1,01), однако осенний период отличался низкими температурами, вследствие чего созревание большинства сортов сои, представленных в опыте, замедлилось, а посевные качества полученных семян снизились. Погодные условия вегетационного периода 2023 г. были засушливыми (ГТК=0,74, в сентябре выпало 0 мм осадков, отмечались лишь следы), но обильные осадки в предшествующий осенне-зимний период способствовали накоплению максимального запаса влаги в почве (табл. 1). Погодные данные получены из открытого источника, – с сайта "Расписание Погоды" (<https://rp5.ru/>), метеостанция 27906 Орёл (аэропорт) расположенная в 10 км от полей ФНЦ ЗБК.

Таблица 1

Среднемесячные температура воздуха и осадки по месяцам (число дней с осадками) за вегетационные периоды 2021...23 гг.

Год	Показатель	Значения показателей по месяцам						
		Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Апр. - Сент.
2021	Температура, °С	6,9	13,9	19,8	22,3	20,5	10,4	15,6
	Осадки, мм (кол.дн.)	46(17)	74(20)	41(14)	51(9)	51(14)	131(16)	394 / 657*
2022	Температура, °С	6,4	11,5	19,0	19,1	21,8	9,9	14,6
	Осадки, мм (кол.дн.)	174(24)	52(16)	52(12)	64(15)	34(13)	111(21)	487 / 874*
2023	Температура, °С	10,3	12,9	17,1	19,2	20,3	15,3	15,9
	Осадки, мм (кол.дн.)	27(10)	17(8)	56(11)	77(18)	45(13)	0(3***)	222 / 460**

Примечание: *) сумма выпавших осадков январь–декабрь. **) Сумма выпавших осадков за январь–октябрь. ***) следы осадков

Исследование проводилось с использованием сервисов дистанционного зондирования (Полевод, OneSoil, Sentinel hub EO Browser). Спутниковые данные получены со спутника Sentinel-2 и имеют разрешение 10 м/пикс. Мониторинг данных осуществлялся с минимальным периодом 3-5 дня при благоприятных метеосостояниях (отсутствие сильной

облачности). Фиксация данных проводилась с конца марта до начала ноября на селекционно-семеноводческих посевах (39 полей, площадь участков от 0,5 до 60 га) различных культур общей площадью 432 га (рис. 1).

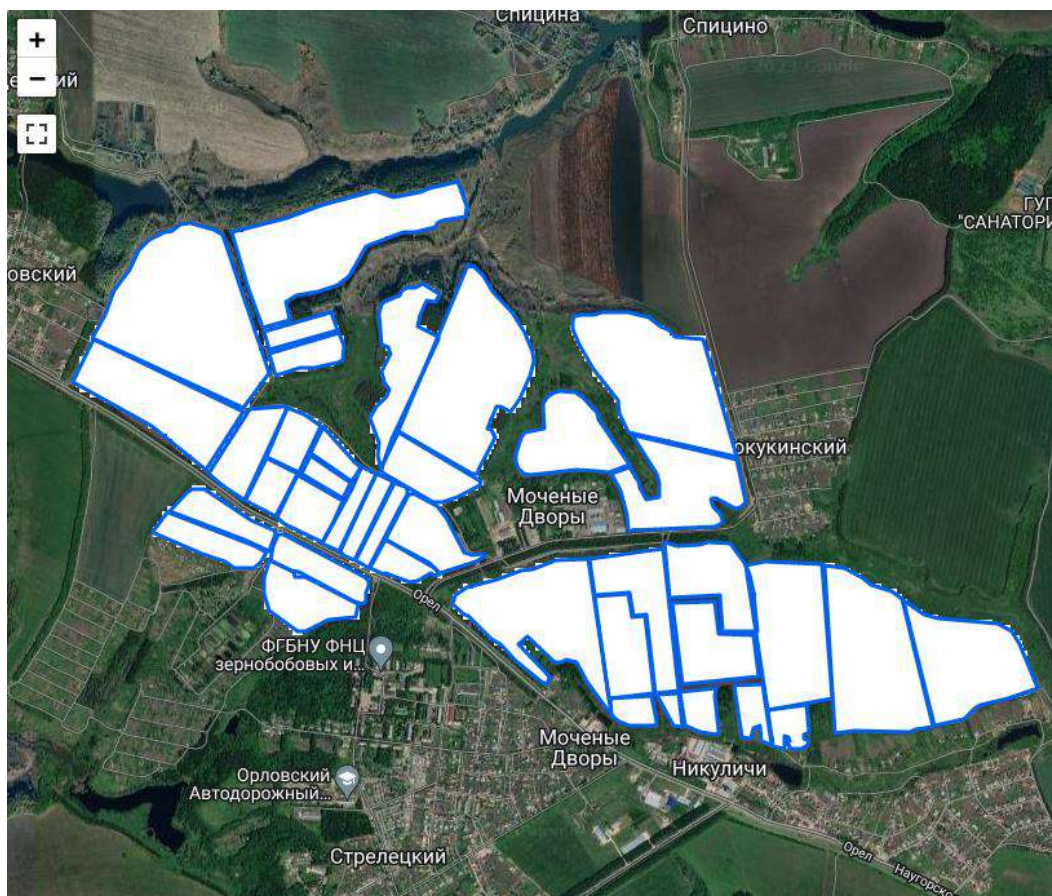


Рис. 1. Пространственное расположение исследуемых полей на территории ФНЦ ЗБК в 2021-2023 гг.

В разные годы на изучаемых полях чередовались семеноводческие посевы сортов следующих культур:

- Озимая мягкая пшеница (Скипетр, Синева, Скипетр 2);
- Яровая мягкая пшеница (Дарья, Гранова)
- Ячмень (Атаман)
- Соя (Осмонь, Ланцетная, Орлея, Мезенка)
- Горох (Эстафета, Родник, Ягуар)
- Гречиха (Даша, Темп)

В обработку также были включены данные по пропашной культуре (картофель) и культуре цикла С4-фотосинтеза (просо). Эталонным цифровым образцом служили данные по вегетационному индексу NDVI за 2022 год, полученных с БПЛА при разрешении ортофотоплана 1,5 см/пикс. Данные с БПЛА, в рамках научного сотрудничества, предоставлены сотрудниками ФГБНУ Федерального научного агроинженерного центра ВИМ. Ими использовался квадрокоптер DJI Matrice 200 v2 с установленной ГНСС L1/L2 антенной, оснащенный модифицированной камерой DJI X4S 20Mp (5472 x 3648) с трехосевым стабилизатором. Полеты осуществлялись с помощью мобильного приложения DJI Pilot. При помощи специального подвеса устанавливалась мультиспектральная камера MicaSense Altum с сенсором освещенности, имеющий встроенный GPS приемник. Использовался мультичастотный GNSS приемник EMLID Reach RS2. Подключение

происходило к базовой станции «OREL» в Орловской области, расположенной на расстоянии менее 20 км [6].

Предварительная обработка данных проведена методом выявления резких отклонений значений с последующей прямой экстраполяцией по соседним значениям в MS Excel. Кластеризация данных осуществлена собственными программными средствами, с определением меры расстояния как «Евклидово расстояние», и по правилу объединения или связи – «Невзвешенный центроидный метод (UPGMC)».

Результаты и обсуждение

Для программного выявления сортовых особенностей на посевах различных сельскохозяйственных культур, на первом этапе необходимо разделять культуры друг от друга. Предполагается, что дальнейшая обработка в выявленной группе соответствующей культуры позволит выявить сортовую специфику и отклонения посева от нормы. В настоящее время принято считать, что это возможно только после накопления объемных данных для обучения искусственного интеллекта. Нами был проведен спутниковый мониторинг по вегетационному индексу NDVI на полях семеноводческих посевов (рис 1) и был получен массив данных (рис. 2) за три года.

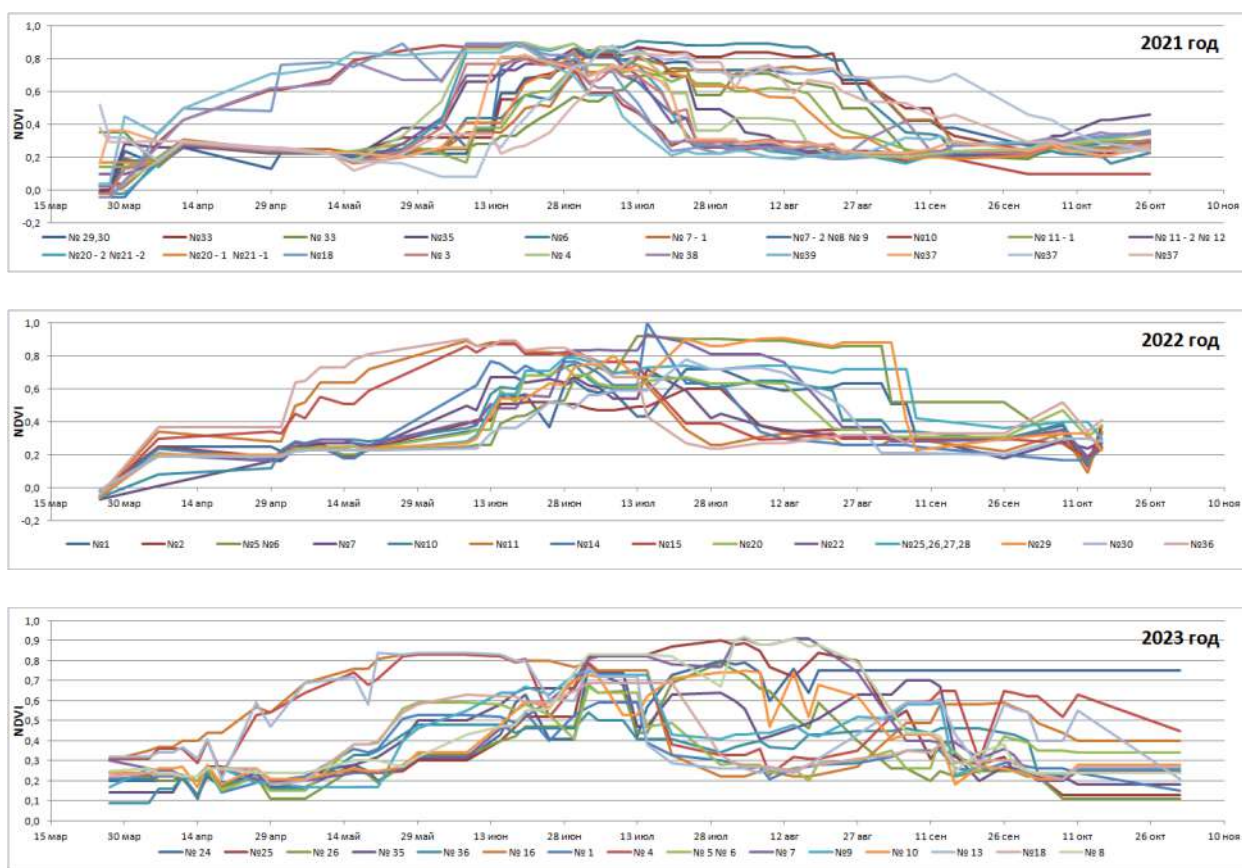


Рис. 2. Визуализация полученных спутниковых данных по вегетационному индексу NDVI на посевах различных культур, 2021...2023 гг.

Можно отметить, что не обработанные первичные данные трудны к восприятию. Также визуально по рисунку 2 отмечается существенное влияние облачности на спутниковые данные. Отклонения параметров проявляются в виде резких перепадов характеристик по временному ряду, соседние данные разнятся скачкообразно вниз, но в целом общая тенденция в динамике просматривается. Соответственно, подтверждается необходимость в предварительной обработке (сглаживание скачков) данных. Для сглаживания резких отклонений в соседних данных – нами предпринято усреднение резких выбросов пограничными показателями (рис. 3). Читаемость графиков улучшилась и визуальный анализ

рисунка 2 и 3 показывает, что на характеристики поступивших данных оказывает влияние, не только произрастающие на полях культуры, но и отмечаются тенденции группировки временного ряда на периоды (озимые-яровые и др.).

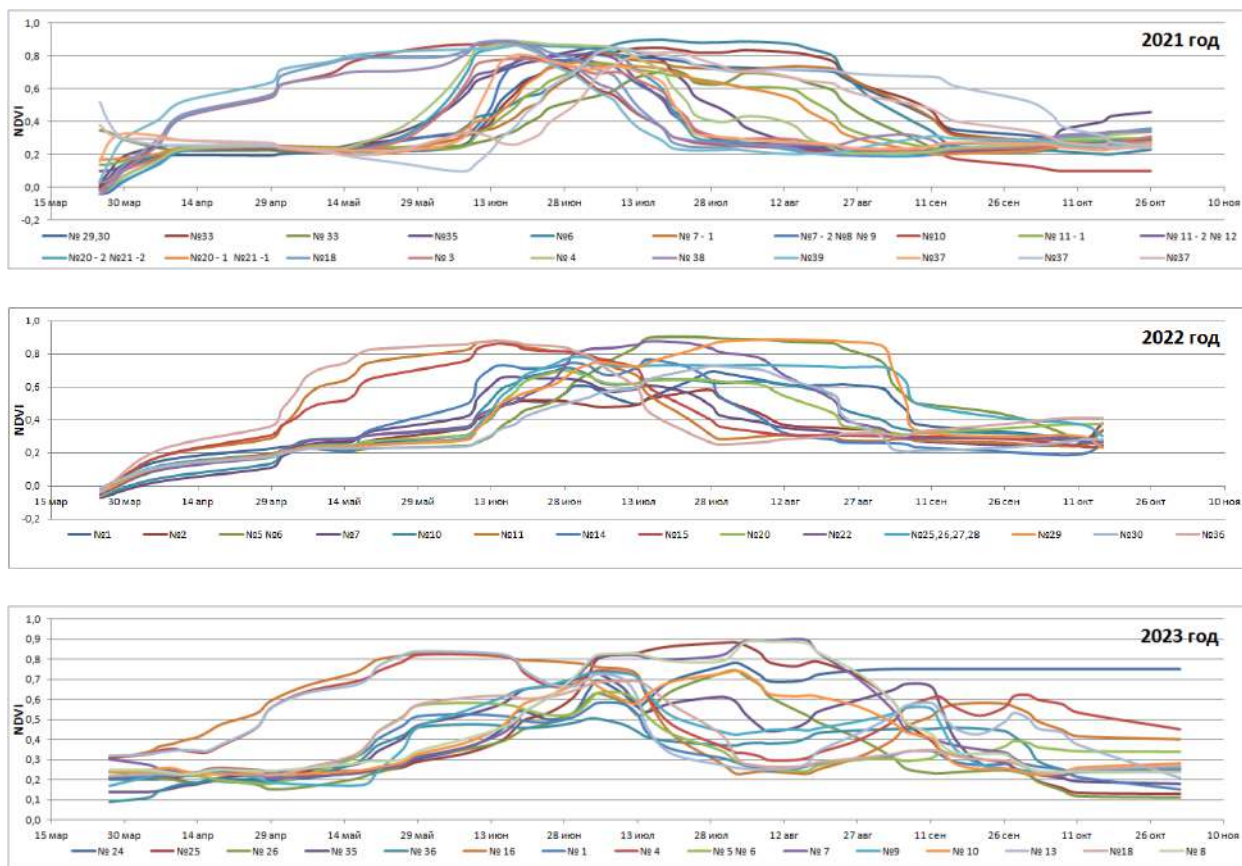


Рис. 3. Визуализация скорректированных спутниковых данных по вегетационному индексу NDVI на посевах различных культур, 2021...2023 гг.

Для выявления такой группировки по временному ряду были проведены кластерные анализы годовых (2021, 2022, 2023 гг.) спутниковых данных по вегетационному индексу NDVI. По результатам кластеризации (рис. 4 – пример группировки за 2021 год) можно выделить, что даты группируются последовательно, и временной ряд делится по сезонным кластерам. Отмечается группировка крайних дат, когда культуры или убраны (осень) или еще не было всходов (весна). Такую закономерность можно применить для идентификации групп озимых от яровых, не только программно анализируя временной период, но и визуалью (рис. 3). В отличие от визуального анализа, кластеризация высветила, что каждый крупный кластер еще минимум делится на две группы: 1) с 30.03 по 16.05 + 26.10.; 2) с 26.05 по 08.07.; 3) с 10.07 по 04.08.; 4) с 09.08 по 18.10. Такая же тенденция прослеживается и по другим годам, где пограничным датам соответствуют: 06.04/29.04.2022, 19.05./08.06.2022, 22.08/24.08.2022, 06.05./16.05.2023, 27.08./03.09.2023 г.

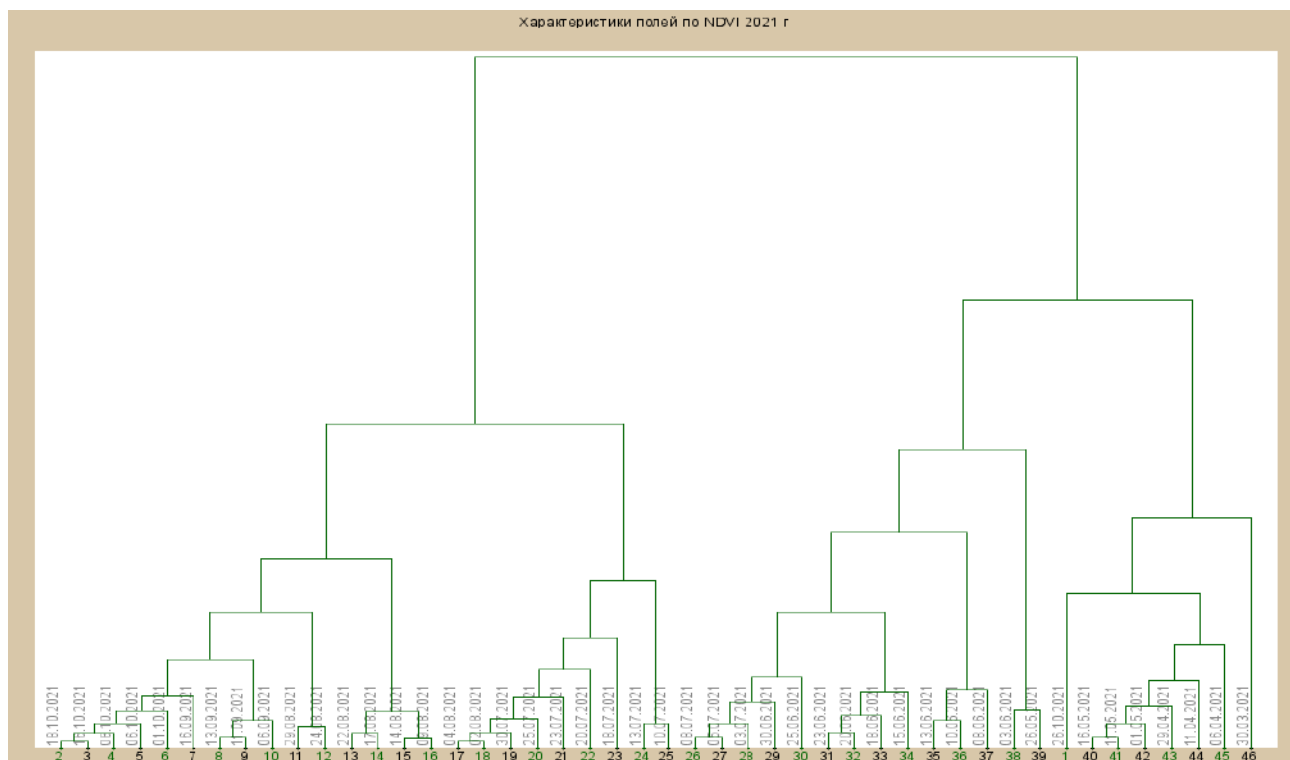


Рис. 4. Дендрограмма временного ряда за 2021 год спутниковых данных по вегетационному индексу NDVI посевов различных культур

Таким образом, начальной датой включения в обработку данных можно считать среднее время возобновления весенней вегетации озимых культур в регионе. Для Орловской области это 12 апреля [7]. Конечной датой можно считать завершение вегетации поздних культур (середина сентября). Промежуточные пограничные даты для отдельных групп культур требуют уточнения по году, но для выявления озимых культур достаточно средней пограничной даты. Возможно, при другом наборе культур, будет другая картина. Соответственно, подход к выявлению внутренних пограничных дат ограничивающий выборку анализируемых данных, требует дальнейшей проверки.

В нашем случае, отбрасывая крайние, выделившиеся в группы (даты временного ряда осень - весна), – проводим кластеризацию показаний вегетационного индекса NDVI за три года по исследуемым полям (рисунки 5, 6, 7). Визуальный анализ дендрограмм динамики вегетационного индекса NDVI на полях различных культур показывает: ошибка группировки полностью отсутствует на озимой пшенице; хорошо группируется соя и гречиха (ошибка 10%); есть проблемы идентификации по другим яровым культурам.

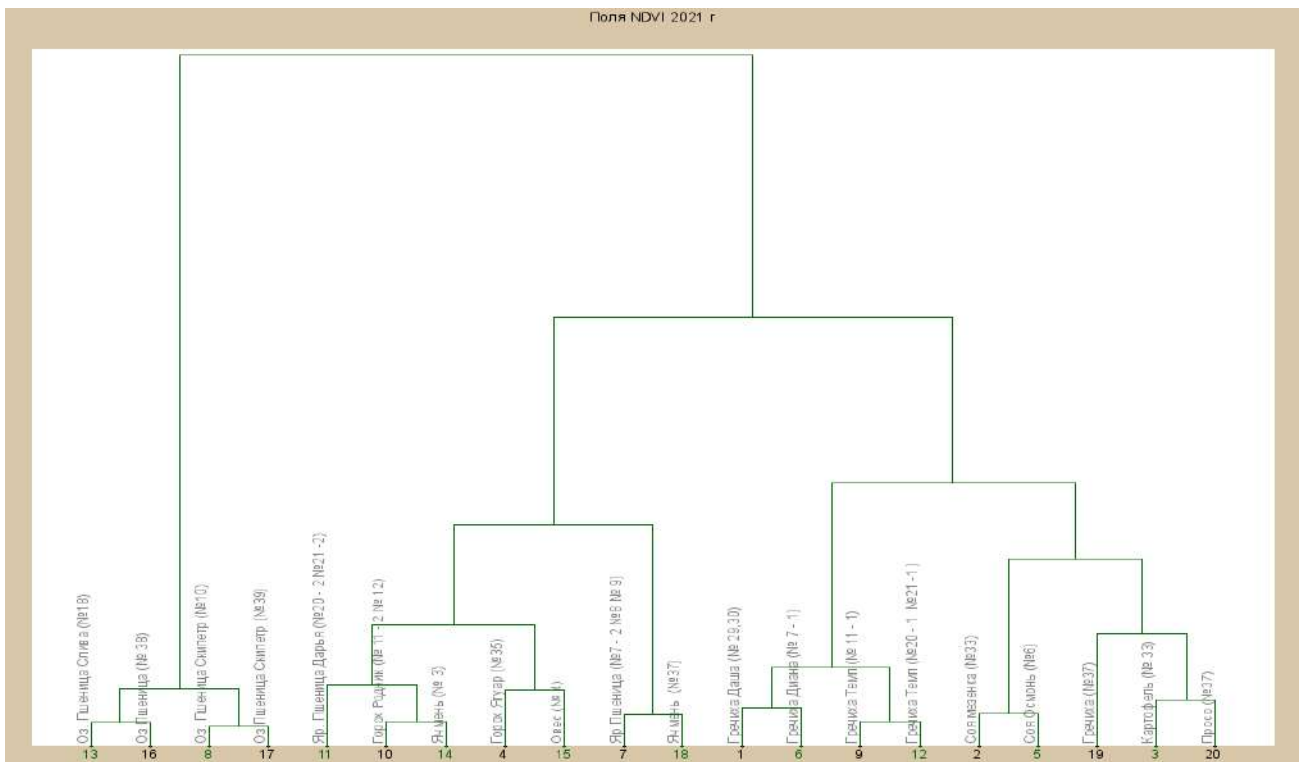


Рис. 5. Дендрограмма посевов различных культур за период 26.05. - 04.08.2021 года по спутниковым данным вегетационного индекса NDVI

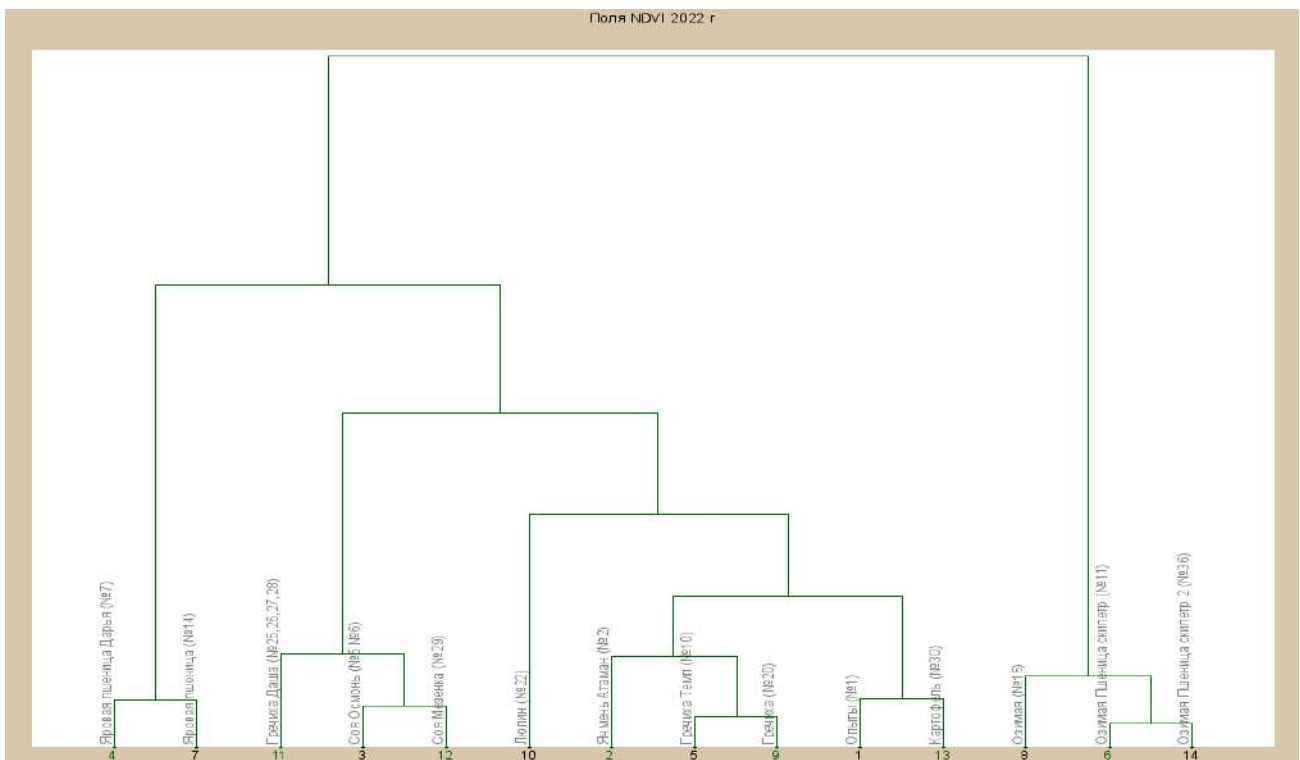


Рис. 6. Дендрограмма посевов различных культур за период 19.05. - 24.08.2022 года по спутниковым данным вегетационного индекса NDVI

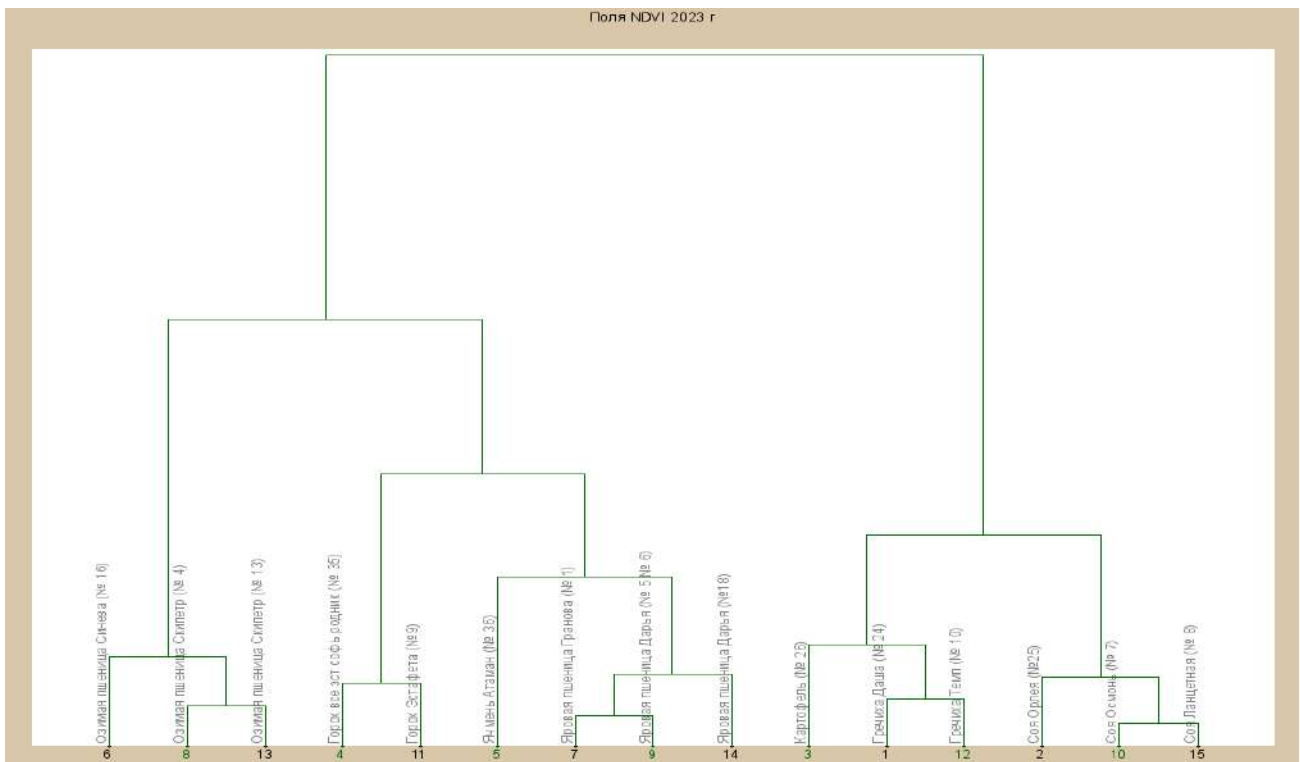


Рис. 7. Дендрограмма посевов различных культур за период 16.05. - 27.08.2023 года по спутниковым данным вегетационного индекса NDVI

Годы исследования (2021...2023 гг.) были очень контрастные по погодно-климатическим условиям, – поэтому для проверки работы алгоритма и выявления специфики развития культуры, на характеристиках индексов отражения нами проведена экстраполяция фактических значений индекса NDVI за разные годы на соответствующие общие даты. Оптимальным временным рядом по пограничным датам (рис. 4) был выбран период от начала возобновления вегетации озимых культур до начала созревания позднеспелых культур (с 15 апреля до 9 сентября), с шагом 1 неделя. Для примера на рисунке 8 приведены совмещенные экстраполированные характеристики NDVI озимой мягкой пшеницы сортов Скипетр и Синева, а также сои сорта Осмонь за три года. Также на рисунке 8 добавлены, как цифровой эталон, показания индекса полученного на этих сортах с конкурсного испытания (малые делянки 4...7 кв.м) с БПЛА. Кластеризация всего массива экстраполированных данных представлена на рисунке 9.

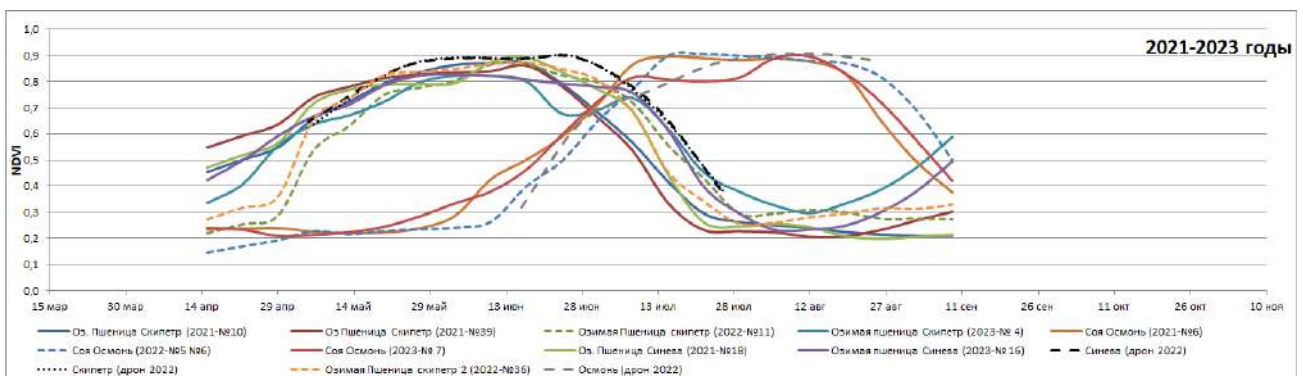


Рис. 8. Визуализация экстраполированных на общую дату, спутниковых данных по вегетационному индексу NDVI на полях размножения озимой мягкой пшеницы сорта Скипетр, Синева и сои Осмонь, ФГБНУ ФНЦ ЗБК

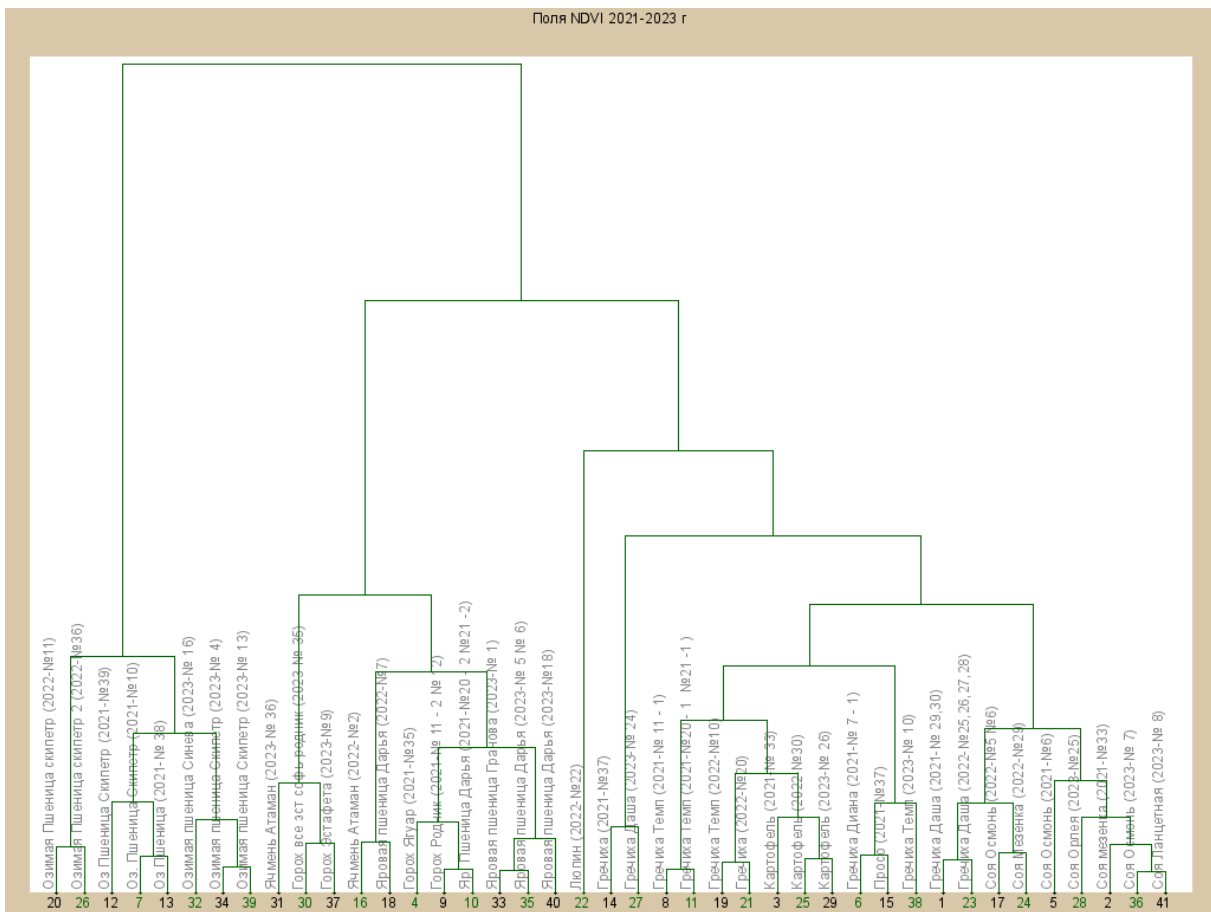


Рис. 9. Дендрограмма экстраполированных на общую дату, спутниковых данных по вегетационному индексу NDVI на посевах различных культур по спутниковым данным, 2021...2022 гг.

Визуальный анализ рисунка 8 и 9 полностью подтверждает соответствие межгодовой динамики по данным вегетационного индекса NDVI различных культур, полученных со спутника (10 м/пикс). Экстраполированные спутниковые данные с больших посевов (0,5...60 га), полностью соответствуют независимым данным с малых площадей (4...7 кв.м.) полученных на высоком разрешении (1,5 см/пикс) с помощью БПЛА. Таким образом – возможно применение цифрового эталона культуры, взятого с малой площади в селекционном посеве для идентификации принадлежности кластера. В тоже время, можно отметить, что применение в анализе только NDVI не позволяет вычленить сортовые специфики, т.е. адекватно определить возделываемый сорт. Хотя это выделяется высоким разрешением на малых площадях различными вегетационными индексами [5]. Также можно выделить, что анализ экстраполированных данных лучше группирует типы культур, чем анализ по данным прошедшим обычное усреднения (рис. 5, 6, 7).

Выводы:

1. Предварительное выравнивание и аппроксимация спутниковых данных ортофотоплана вегетационного индекса NDVI, низкого разрешения (10 м/пикс) – дает адекватные характеристики вегетационной динамики культуры, аналогично полученным с БПЛА (70 метров) высокого разрешения (1,5 см/пикс). Это позволяет провести уверенную (ошибка от 0...10%) кластеризацию посевов по культурам и включать в обработку цифровой эталон этих культур для идентификации.

2. Для сортовой дифференциации внутри группы одной культуры – одного показателя NDVI недостаточно. Требуется изучение других показателей и оптимизация подготовки первичных данных.

Работа выполнена по теме государственного задания № FGZZ-2022-0011 «Мониторинг селекционно-семеноводческих посевов с использованием цифровых технологий с целью повышения продуктивности новых сортов»

Литература

1. Денисов П. В., Трошко К. А., Лупян Е. А., Толпин В. А. Возможности и опыт использования информационной системы Вега-PRO для мониторинга сельскохозяйственных земель // Вычисл. технологии. – 2022. – Т. 27. – № 3. – С. 66-83. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.006.
2. Родимцев С.А., Павловская Н.Е., Вершинин С.В., Зелюкин В.И., Горькова И.В. Моделирование условий вегетации с использованием отклонений текущих значений NDVI от среднееголетних показателей. // Сельскохозяйственная биология. – 2022; – 3(57). – С. 591-603. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.3.591rus.
3. Бочкарева Е.А., Христодуло Е.А., Биглова А.Д., Грехова Ю.С. Интерполирование временных рядов NDVI сезонного развития растительности сельскохозяйственных земель. //Международный научно-исследовательский журнал, - 2017, - 1(67).- 34-38. DOI: 10.23670/IRJ.2018.67.107.
4. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA, 1973, SP-351, vol.1, pp.309-317.
5. Вилюнов С.Д., Зотиков В.И., Сидоренко В.С., Старикова Ж.В., Мальцев А.А. Применение вегетационных индексов в селекции озимой мягкой пшеницы. // Зернобобовые и крупяные культуры. – 2022. – № 3 (43). – С.73-83. DOI: 10.24412/2309-348X-2022-3-73-83
6. Артюшин А.А., Курбанов Р.К., Марченко Л.А., Захарова О.М. Выбор типоразмерного ряда беспилотных летательных аппаратов и полезной нагрузки для мониторинга сельскохозяйственных полей // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2019. – № 4 (37). – С. 36-43.
7. Kurbanov R., Zakharova N., Sidorenko V., Vilyunov S. (2022). The Use of Vegetation Indices in Comparison to Traditional Methods for Assessing Overwintering of Grain Crops in the Breeding Process. In: Hu, Z., Wang, B., Petoukhov, S., He, M. (eds) Advances in Artificial Systems for Power Engineering II. AIPE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 119. Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-030-97064-2_6

References

1. Denisov P. V., Troshko K. A., Lupyan E. A., Tolpin V. A. Possibilities and experience of using Vega-PRO information system for agricultural land monitoring // *Vychisl. tekhnologii*. 2022. Vol. 27. № 3. Pp. 66-83. DOI: 10.25743/ICT.2022.27.3.006.
2. Rodimtsev S.A., Pavlovskaya N.E., Vershinin S.V., Zelyukin V.I., Gor'kova I.V. Modeling of vegetation conditions using deviations of current NDVI values from mean annual values. *Sel'skokhozyaistvennaya biologiya*. 2022; 3(57): 591-603. DOI: 10.15389/agrobiology.2022.3.591rus.
3. Bochkareva E.A., Khristodulo E.A., Biglova A.D., Grekhova Yu.S. Interpolation of NDVI time series of seasonal vegetation development in agricultural lands. *Mezhdunarodnyi nauchno-issledovatel'skii zhurnal*, 2017, 1(67): 34-38 DOI: 10.23670/IRJ.2018.67.107.
4. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., and Deering, D.W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA, 1973, SP-351, vol.1, pp.309-317.
5. Vilyunov S.D., Zotikov V.I., Sidorenko V.S., Starikova Zh.V., Mal'tsev A.A. Application of vegetation indices in breeding winter soft wheat. // *Zernobobovye i krupyanye kul'tury*. - 2022. - № 3(43). - S.73-83 .DOI: 10.24412/2309-348X-2022-3-73-83
6. Artyushin A.A., Kurbanov R.K., Marchenko L.A., Zakharova O.M. Selection of the size range of unmanned aerial vehicles and effective load for monitoring agricultural fields // *Elektrotekhnologii i elektrooborudovanie v APK*. - 2019. - № 4(37). - Pp. 36-43.
7. Kurbanov R., Zakharova N., Sidorenko V., Vilyunov S. (2022). The Use of Vegetation Indices in Comparison to Traditional Methods for Assessing Overwintering of Grain Crops in the Breeding Process. In: Hu, Z., Wang, B., Petoukhov, S., He, M. (eds) Advances in Artificial Systems for Power Engineering II. AIPE 2021. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 119. Springer, Cham. DOI 10.1007/978-3-030-97064-2_6