

## Методика создания региональных эталонов динамики развития полевых культур на примере Республики Крым

**Е. А. Дунаева**✉, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела цифрового мониторинга и моделирования агроэкосистем

**М. В. Колодяжный**, младший научный сотрудник отдела цифрового мониторинга и моделирования агроэкосистем

**В. Ф. Попович**, старший научный сотрудник отдела цифрового мониторинга и моделирования агроэкосистем

**В. В. Попович**, научный сотрудник отдела цифрового мониторинга и моделирования агроэкосистем

ФГБУН «НИИСХ Крыма»

295043, Республика Крым, г. Симферополь, ул. Киевская, д.150

✉dunaeva\_e@niishk.site

**Резюме.** В статье представлены результаты построения эталонов и норм для сельскохозяйственных культур в Республике Крым, приведен пошаговый алгоритм их создания. Создание эталонов и норм способствует более точной идентификации озимых культур, которые являются ключевыми для регионов с аридным климатом за счет своей способности эффективно использовать осенне-зимние осадки для формирования урожая, что делает их незаменимыми для обеспечения продовольственной безопасности и устойчивого сельского хозяйства в условиях засушливого климата. Кроме того, эталоны динамики развития полевых культур являются специфичными для каждого региона из-за различий агрометеорологических условий, для оптимизации агротехнических мероприятий необходимо их адаптация для Республики Крым. Цель исследования – уточнение методологии создания эталонов динамики развития полевых культур и её апробация на примере Республики Крым. В работе использована уникальная научная установка (УНУ) «BS ИКИ-Мониторинг» в-Источником данных были спутниковые данные Sentinel-2A, Landsat 7/9, Terra/Aqua. Последующую обработку проводили в ПО QGIS 3.30 и веб-сервисе Vega-Science. Результаты исследования показали, что при анализе озимых культур коэффициент корреляции урожайности и NDVI<sub>max</sub> колеблется от средней до очень высокой (0,54...0,90), следовательно, эта методика может быть применима на практике. В то время, как при анализе яровых культур уровень связи варьируется от низкого до среднего, что свидетельствует о необходимости корректировки методологии. Результаты исследования показали, что при использовании алгоритмов глобальных систем мониторинга для повышения их точности решения задач идентификации типов культур и идентификации их состояния необходимо учитывать региональные особенности территорий.

**Ключевые слова:** географические информационные системы, дистанционное зондирование Земли, метеорологические наблюдения, статистические данные, урожайность.

**Для цитирования:** Методика создания региональных эталонов динамики развития полевых культур на примере Республики Крым / Е.А. Дунаева, М. В. Колодяжный, В. Ф. Попович и др. // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2025. №2 (70). С. 14-24. doi:10.18286/1816-4501-2025-2-14-24

## Methodology for creating regional dynamics standards for field crop development using the example of the republic of Crimea

**E. A. Dunaeva**✉, **M. V. Kolodyazhny**, **V. F. Popovich**, **V. V. Popovich**

Federal State Budgetary Institution "Research Institute of Agriculture of Crimea"

295043, Republic of Crimea, Simferopol, Kyiv St., 150

✉dunaeva\_e@niishk.site

**Abstract.** The article presents the results of constructing standards and norms for agricultural crops in the Republic of Crimea, and provides a step-by-step algorithm for their creation. The creation of standards and norms contributes to a more accurate identification of winter crops, which are key for regions with an arid climate due to their ability to effectively use autumn-winter precipitation to form a crop, which makes them indispensable for ensuring food security and sustainable agriculture in arid climates. In addition, the standards for the dynamics of field crop development are specific to each region due to differences in agrometeorological conditions; to improve agrotechnical measures, they must be adapted for the Republic of Crimea. The purpose of the study is to clarify the methodology for creating standards for the

dynamics of field crop development and to test it using the example of the Republic of Crimea. The work uses a unique scientific installation (USI) «BS IKI-Monitoring». The data source was satellite data Sentinel-2A, Landsat 7/9, Terra/Aqua. Subsequent processing was carried out in QGIS 3.30 software and the Vega-Science web service. The results of the study showed that when analyzing winter crops, the correlation coefficient of yield and NDVImax ranges from medium to very high (0.54...0.90), therefore, this technique can be applied in practice. When analyzing spring crops, the correlation level varies from low to medium, which indicates the need to adjust the methodology. The results of the study showed that in case of using algorithms of global monitoring systems to improve their accuracy in solving problems of identifying crop types and identifying their condition, it is necessary to take into account the regional characteristics of the territories.

**Keywords:** geographic information systems, remote sensing of the Earth, meteorological observations, statistical data, crop yield.

**For citation:** Methodology for creating regional dynamics standards for field crop development using the example of the republic of Crimea / E. A. Dunaeva, M. V. Kolodyazhny, V. F. Popovich, et al. // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2025;2(70): 14-24 doi:10.18286/1816-4501-2025-2-14-24

#### Работа выполнена в рамках Государственного задания Министерства науки и высшего образования № 122101300031-4.

##### Введение

Эталоны динамики развития полевых культур могут являться основой для решения таких задач, как идентификация и мониторинг сельскохозяйственных культур, прогнозирование урожайности. Посредством эталонов и норм можно отслеживать отклонения в развитии растений от среднелетнего показателя, что поможет в принятии управленческих решений.

Для оценки состояния и развития сельскохозяйственных культур используется такой показатель, как NDVI (нормализованный разностный вегетационный индекс), характеризующий количество биомассы растений. Высокие значения NDVI указывают на здоровую и плотную растительность, в то время как низкие значения могут свидетельствовать о стрессовых условиях, таких как засуха или недостаток питательных веществ. Диапазон варьирования NDVI теоретически лежит в границах от -1,0 до +1,0, при этом отрицательные значения индекса относятся к водным объектам или территории, закрытой облачностью, значения немного выше нуля характеризуют оголенную почву, значения в диапазоне 0,2 и выше обычно являются признаком наличия растительности, а при значениях выше 0,6 – характеризуют зеленую, хорошо развитую растительность.

Зачастую встречается понятие «норма динамики развития полевых культур» – многолетнее среднее значение динамики индекса NDVI для заданной территории. В последние несколько лет в РФ для оценки состояния посевов как на локальном, так и на региональных уровнях получила активное использование методология анализа отклонений индекса NDVI от нормы [1-3]. Данная информация позволяет не только использовать ее для текущего мониторинга, но с учетом региональных особенностей и для оценки урожайности [4].

Одним из современных подходов к идентификации / оценке состояния (уровня развития) произрастающей сельскохозяйственной культуры является методология создания «эталонов»,

характеризующих цифровые параметры осредненной многолетней динамики развития растительности, и оценка величины отклонения анализируемого параметра от «эталона» (или многолетней нормы). В данном исследовании под термином «эталон развития сельскохозяйственной культуры» понимается среднее значение динамики индекса NDVI для периода не менее 10 лет с максимальным уровнем связи индекса с урожайностью, осредненное для заданной территории. В текущем исследовании эталон рассчитывали для периода 2014-2024 гг. (с максимальным NDVI как для озимой пшеницы, так и для озимого ячменя).

Наличие эталона сезонной динамики значений NDVI для сельскохозяйственной культуры позволяет проводить анализ отклонений развития культуры в текущем сезоне от многолетней нормы не только на отдельных полях, но и на территориях целых регионов. Данный подход к анализу развития растительности активно используется в сервисе Vega Института космических исследований РАН [5, 6, 7].

При разработке норм / эталонов динамики развития сельскохозяйственных культур должна обязательно учитываться специфика агроклиматических условий региона. Учитывая, что индекс NDVI является косвенным расчетным параметром, рассчитываемым по спутниковым (или другим) данным, но имеющим высокую степень связи с уровнем развития фотосинтетически активной биомассы растений, дополнительными параметрами, позволяющими учесть и/или прогнозировать динамику развития культур, является комплекс агроклиматических и агрогидрологических показателей, которые характеризуют изменение энергетического и водного баланса в среде атмосфера-почва-растение, напрямую влияющих на рост растения.

В процессе анализа особое внимание уделяется разновременному исследованию площади пахотных земель, а также точной идентификации озимых культур, которые являются ключевыми для регионов с аридным климатом за счет своей

#### 4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки)

способности эффективно использовать осенне-зимние осадки для формирования урожая, что делает их незаменимыми для обеспечения продовольственной безопасности и устойчивого сельского хозяйства в условиях засушливого климата.

Для повышения точности и актуальности данных осуществляется дешифрирование многолетних насаждений и неиспользуемых земель, результаты обработки которых затем используются для исключения их из границ пахотных земель и последующей классификации озимых культур, что позволяет более точно оценивать аграрный потенциал региона и прогнозировать урожайность. В результате проведения данного анализа можно выявить основные тенденции в изменении биопродуктивности, а также разработать рекомендации по оптимизации использования сельскохозяйственных земель.

В настоящее время активно используются такие источники данных, как ERA5–Land, FLDAS, GLDAS и другие. Также доступ к разновременным данным имеется посредством сервисов Vega-Science и Vega-PRO (ЦКП "ИКИ-Мониторинг" и УНУ «BS ИКИ-Мониторинг»).

Цель исследования – уточнение методологии создания эталонов динамики развития полевых культур и её апробация на примере Республики Крым.

##### Материалы и методы

Эталон динамики развития полевых культур является результатом усреднения многолетних спутниковых наблюдений за растительностью в том или ином регионе. Они позволяют проводить

анализ отклонений развития растений в текущем сезоне от многолетней нормы не только на отдельных полях, но и на территориях целых регионов.

Процедура создания эталонов происходит с использованием косвенных индексов, получаемых по результатам обработки материалов спутниковой съемки, в текущее время базируется на классификации посевов с выделением соответствующих классов (например, озимые, яровые).

Исходные материалы для проведения исследования:

- контуры сельскохозяйственных полей в векторном формате;
- космические снимки среднего (250 м) пространственного разрешения спутника TERRA (спектрофотометр MODIS);
- космические снимки высокого и среднего пространственного разрешения спутников Landsat 4, 5, 7, 8, 9;
- космические снимки высокого пространственного разрешения (10 м) спутника Sentinel-2A/B;
- разновременные композитные снимки высокого пространственного разрешения (10 м) за три месяца в естественном синтезе и по каналу NDVI за период 2001–2024 гг., полученные с помощью указанных выше космических снимков.

Процедура создания норм и эталонов динамики NDVI для полевых культур может быть представлена в виде алгоритма, он является укрупненным и может изменяться в зависимости от внешних условий (рис. 1).



Рис. 1. Укрупненная блок-схема алгоритма создания норм и эталонов динамики развития полевых культур

Ход исследования является не линейным, так как различные этапы могут меняться местами. К примеру, исключение неподходящих участков может быть на любом этапе при их обнаружении во время построения композитного снимка, создания выборки, анализа данных и т.д. Также важным является анализ отклонений динамики развития культур от нормы (аномалий). Методика состоит из следующих основных этапов.

На первоначальном этапе проводится анализ хода графика NDVI за текущий год для зерновых культур на конкретных полях и сравнивается со среднемноголетними данными (нормой для территорий). Далее определяется степень отклонения параметра и ее значения. Ранжируются поля по отклонениям от среднемноголетних данных со следующей градацией (выше, на уровне, ниже или хорошее, нормальное, удовлетворительное состояние). Проводится расчет площадей полей по состоянию вегетации.

На следующем этапе проводится анализ динамики отклонений от нормы (аномалий) по данным разновременных мультиспектральных сцен ДЗЗ. Анализ данных проводится совместно с метеорологическими параметрами.

На четвертом этапе осуществляется расчет уравнений уровня связи отклонений или абсолютных значений параметров с урожайностью культур.

При проведении исследования учитывались следующие государственные стандарты - ГОСТ Р 59082-2020 при создании картографического материала на основе данных ДЗЗ, а также ГОСТ Р 70026-2022 и ГОСТ Р 59829 при проведении классификации и формировании эталонов на их основе.

## Результаты

Первым этапом при разработке норм и эталонов динамики развития полевых культур является создание выборки полей для каждого года по различным типам культур. Для более точных результатов важно, чтобы точки были распределены равномерно по территории района, так как агрометеорологические условия могут существенно меняться в его границах. Размер выборки в среднем составлял 30...40 полей, что является достаточным для определения среднегодовой нормы.

При построении норм и эталонов динамики развития полевых культур количество точек в выборке по Крыму превысило 10000 с учётом того, что поля могут повторяться в разные годы. Отбор и обработка данных проводились инструментами сервиса Vega-Science и табличного процессора MS Excel. При этом строился график NDVI для каждого поля с одинаковым типом использования (озимые, яровые, паровые) в исследуемом году.

При анализе данных необходимо обращать внимание на ход каждого графика NDVI – при точном определении поля с культурами одного типа будут иметь место схожие темпы развития в течение сезона – для озимых культур с 10 по 31 неделю (рис. 2). Допускается варьирование NDVI у разных полей в рамках 0,3...0,4, так как различные культуры имеют различную биомассу и темпы её прироста, что влияет на ход индекса NDVI.

Также стоит учитывать, что из-за высокой облачности в зимнее время года могут отсутствовать данные за определенный период, что при расчёте значений может привести к ошибке, такие графики необходимо исключать из выборки для получения более точных показателей.

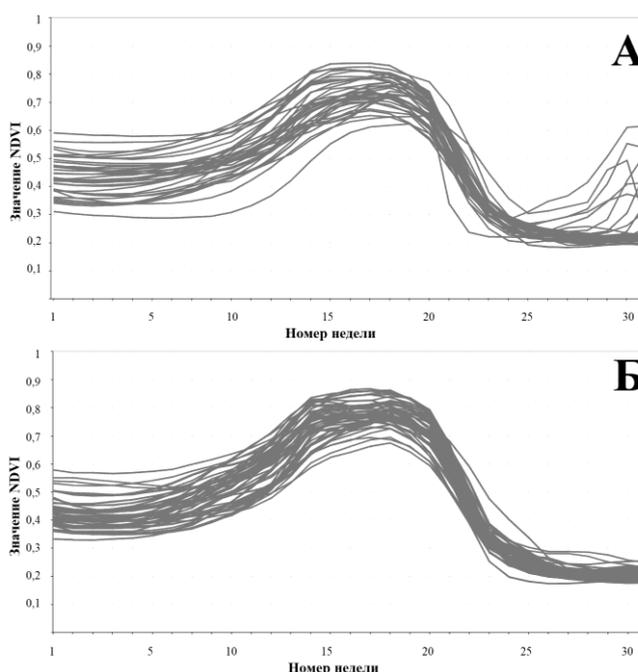
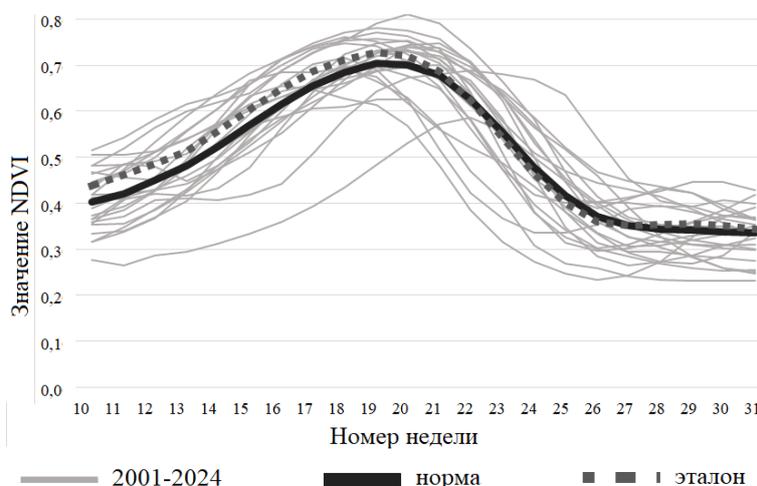


Рис. 2. Пример хода NDVI для озимых культур в 2024 г. для Джанкойского (А) и Красногвардейского (Б) районов Республики Крым

#### 4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки)

Пример результатов обработки данных и построения графиков норм и эталонов развития озимых культур для Красногвардейского района с

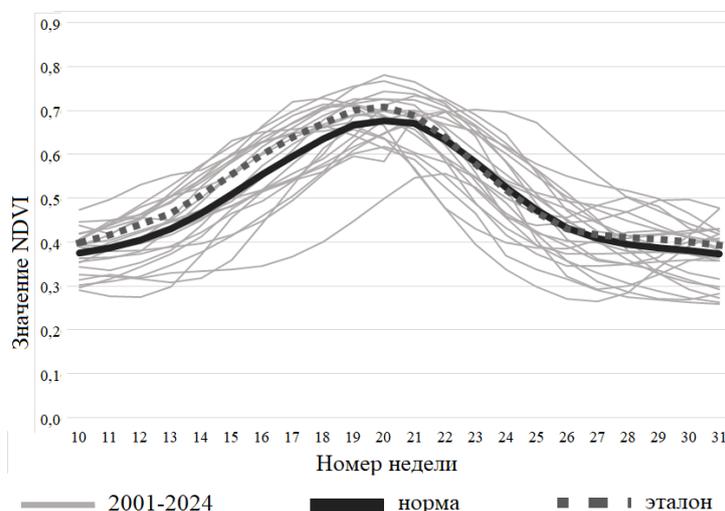
использованием уточненной методологии приведен на рис. 3.



**Рис. 3. Пример динамики нормы и эталона NDVI для озимых культур Красногвардейского района (по уточненной методике) (2001-2024 гг.)**

Уровень связи (коэффициент корреляции,  $r$ ) средней для района урожайности с максимальными значениями параметра NDVI за период вегетации является средним для многолетней нормы (период 2001-2023 гг.) и высоким для эталона (период 2014-2023 гг.) и составляет 0,57, 0,86 и 0,52, 0,84 для озимой пшеницы и озимого ячменя соответственно.

Пример уровня варьирования индекса NDVI в течение периода вегетации озимых культур для периода 2001-2024 гг., а также многолетняя норма и эталон их развития для этого периода приведены на рис. 4.



**Рис. 4. Пример динамики нормы и эталона NDVI для озимых культур Белогорского района (по уточненной методике) (2001-2024 гг.)**

В ходе детального анализа использования методологии создания норм и эталонов озимых культур выявлено, что для ее эффективного применения необходимо поддержание векторных масок полей в актуальном состоянии.

На рисунке 5 приведен пример уровня взаимосвязи (коэффициент детерминации,  $R^2$ ) средней

урожайности с максимальными значениями NDVI. Связь является средней для нормы (период 2001-2023 гг.) для обеих культур и очень высокой и высокой для эталона (период 2014-2023 гг.), составляя 0,45, 0,81 и 0,28, 0,63 для озимой пшеницы и озимого ячменя соответственно.

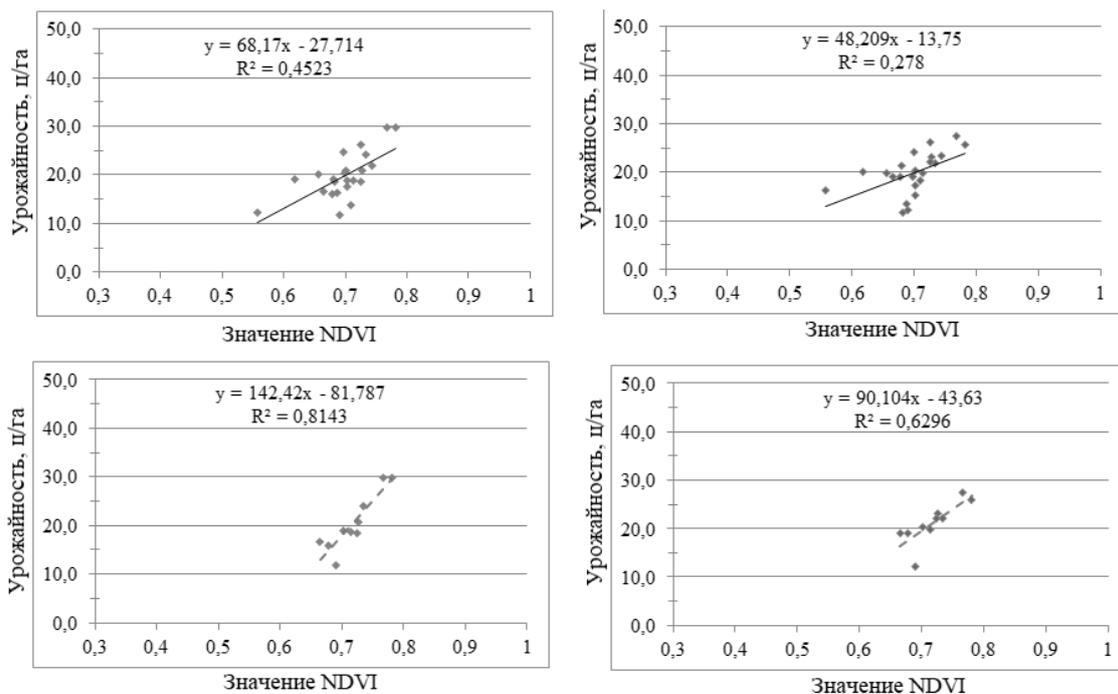


Рис. 5. Пример взаимосвязи урожайности озимой пшеницы (слева) и озимого ячменя (справа) с NDVI<sub>max</sub> для Белогорского района, периоды расчета нормы – 2001-2023 гг. и эталона – 2014-2023 гг.

Таблица 1. Среднемноголетнее значение эталонов динамики NDVI, озимых культур по муниципальным районам Республики Крым

Номер недели	Бахчисарайский	Белогорский	Джанкойский	Кировский	Красногвардейский	Красноперекопский	Ленинский	Нижнегорский	Первомайский	Раздольненский	Сакский	Симферопольский	Советский	Черноморский
10	0,38	0,40	0,43	0,43	0,44	0,41	0,44	0,40	0,43	0,41	0,41	0,44	0,41	0,41
11	0,40	0,42	0,45	0,47	0,46	0,43	0,47	0,42	0,44	0,43	0,43	0,46	0,44	0,43
12	0,41	0,44	0,49	0,50	0,49	0,46	0,50	0,45	0,46	0,45	0,45	0,49	0,47	0,46
13	0,44	0,47	0,52	0,54	0,51	0,49	0,54	0,49	0,49	0,49	0,47	0,52	0,51	0,49
14	0,48	0,51	0,56	0,58	0,56	0,54	0,58	0,54	0,54	0,53	0,52	0,56	0,56	0,53
15	0,53	0,55	0,60	0,63	0,60	0,59	0,63	0,59	0,58	0,58	0,57	0,60	0,60	0,57
16	0,58	0,60	0,64	0,67	0,65	0,63	0,68	0,64	0,63	0,62	0,61	0,64	0,65	0,61
17	0,61	0,64	0,67	0,69	0,69	0,67	0,71	0,68	0,66	0,66	0,65	0,68	0,68	0,64
18	0,64	0,67	0,70	0,70	0,71	0,69	0,73	0,71	0,69	0,69	0,67	0,70	0,70	0,67
19	0,66	0,70	0,71	0,71	0,73	0,71	0,73	0,72	0,71	0,71	0,69	0,71	0,72	0,69
20	0,66	0,71	0,69	0,70	0,72	0,70	0,72	0,72	0,70	0,71	0,69	0,71	0,71	0,69
21	0,63	0,69	0,65	0,66	0,69	0,67	0,68	0,67	0,67	0,69	0,66	0,68	0,66	0,67
22	0,57	0,64	0,58	0,59	0,62	0,60	0,61	0,60	0,60	0,63	0,60	0,62	0,59	0,61
23	0,51	0,58	0,50	0,51	0,54	0,51	0,53	0,51	0,52	0,54	0,52	0,55	0,51	0,52
24	0,46	0,52	0,43	0,44	0,46	0,43	0,45	0,45	0,43	0,45	0,44	0,48	0,44	0,44
25	0,42	0,47	0,39	0,39	0,40	0,37	0,39	0,40	0,37	0,38	0,38	0,43	0,40	0,38
26	0,39	0,43	0,36	0,37	0,36	0,33	0,35	0,37	0,33	0,33	0,34	0,39	0,37	0,34
27	0,38	0,42	0,35	0,36	0,35	0,32	0,34	0,36	0,31	0,32	0,33	0,38	0,36	0,32
28	0,38	0,41	0,35	0,36	0,35	0,32	0,33	0,36	0,31	0,31	0,32	0,37	0,36	0,31
29	0,37	0,41	0,35	0,36	0,36	0,31	0,32	0,35	0,31	0,31	0,31	0,37	0,35	0,31
30	0,36	0,40	0,34	0,35	0,35	0,31	0,32	0,35	0,31	0,31	0,31	0,36	0,35	0,30
31	0,35	0,39	0,33	0,34	0,35	0,30	0,31	0,34	0,31	0,31	0,30	0,36	0,34	0,29

Результатом обработки стали 14 графиков среднемноголетних норм и эталонов динамики развития полевых культур по муниципальным районам Республики Крым. Благодаря полученным нормам и

эталонам можно оценивать состояние озимых культур.

На протяжении вегетационного периода значение NDVI колеблется от 0,3 до 0,8. Пик вегетации

#### 4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки)

наблюдается с 18 по 23 неделю года, варьируя в зависимости от агроклиматической зоны и метеословий. Результаты вычислений значений эталонов приведены в таблице 1. Регрессионные уравнения связи урожайности с параметрами ДЗЗ позволяют их использовать для среднесрочных прогнозов

урожайности отдельных видов сельскохозяйственных культур, так как максимальные значения NDVI имеют связь с урожайностью [8]. В таблице 2 приведены уравнения линейной регрессии зависимости урожайность–NDVImax и коэффициент детерминации  $R^2$ , показывающий уровень их взаимосвязи.

**Таблица 2. Уравнения регрессии связи урожайности озимой пшеницы и озимого ячменя, коэффициента NDVImax для районов РК за 2014–2023 гг.**

Название районов	Озимая пшеница		Озимый ячмень	
	Уравнение регрессии**	$R^2$ *	Уравнение регрессии**	$R^2$ *
Бахчисарайский	$y = 93,394x - 36,9$	0,42	$y = 84,184x - 35,6$	0,31
Белогорский	$y = 142,42x - 81,8$	0,81	$y = 90,104x - 43,6$	0,63
Джанкойский	$y = 163,42x - 90,1$	0,71	$y = 149,4x - 82,8$	0,81
Кировский	$y = 106,45x - 51,3$	0,41	$y = 103,18x - 51,5$	0,51
Красногвардейский	$y = 183,08x - 107,2$	0,76	$y = 169,29x - 99,1$	0,78
Краснопереконский	$y = 124,46x - 56,8$	0,43	$y = 183,04x - 99,3$	0,74
Ленинский	$y = 148,21x - 79,5$	0,42	$y = 104,81x - 52,6$	0,36
Нижнегорский	$y = 139,77x - 77,2$	0,65	$y = 144,23x - 81,1$	0,77
Первомайский	$y = 125,00x - 64,0$	0,61	$y = 118,04x - 60,1$	0,61
Раздольненский	$y = 177,71x - 99,3$	0,62	$y = 156,95x - 85,3$	0,61
Сакский	$y = 124,07x - 60,6$	0,62	$y = 100,4x - 45,7$	0,63
Симферопольский	$y = 125,84x - 59,6$	0,46	$y = 103,63x - 45,1$	0,36
Советский	$y = 116,79x - 60,1$	0,49	$y = 141,12x - 77,8$	0,6
Черноморский	$y = 118,49x - 57,3$	0,52	$y = 75,788x - 30,8$	0,31

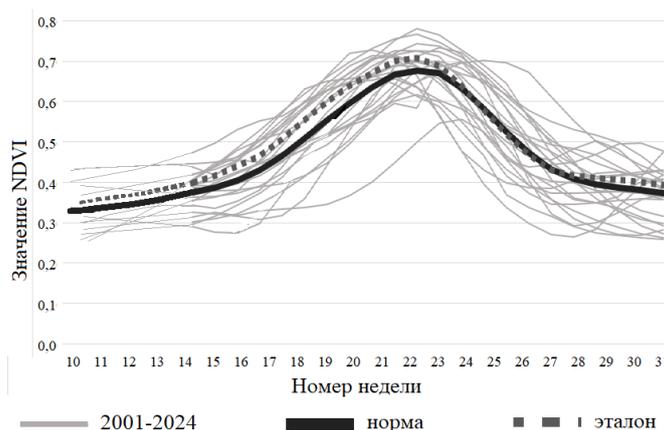
Примечание: \* – коэффициент детерминации ( $R^2$ ); \*\* x = NDVImax

Алгоритм построения норм и эталонов динамики развития яровых культур аналогичен применяемому для озимых, однако имеет несколько нюансов. Прежде всего, сроки вегетации – ранние и поздние яровые культуры имеют различные сроки наступления периода достижения наибольшей биомассы, которая обычно соответствует максимальному значению NDVI.

Также можно использовать композитные изображения, применяемые при идентификации озимых культур, и опираться на низкое значение NDVI

при выборе, но при таком методе может возрастать ошибка идентификации, так как можно включить в выборку залежи, заросшие сорными растениями. Следует учитывать дифференциацию на ранние и поздние яровые культуры.

Кроме сроков вегетации важна её длительность, так как у яровых она короче, чем у озимых. Пример результатов, полученных с использованием методологии создания осредненных по территории районов значений NDVI для яровых культур (сервис «Bera-Science»), приведен на рис. 6.



**Рис. 6. Пример динамики годовых и «среднемноголетней нормы» NDVI для яровых культур Белогорского района (2001–2024 гг.)**

При анализе хода осредненных для территории района значений NDVI (рис. 7) визуально заметно

наличие сдвигов пиковых значений параметра, что ведет к снижению уровня связи урожайность – NDVI.

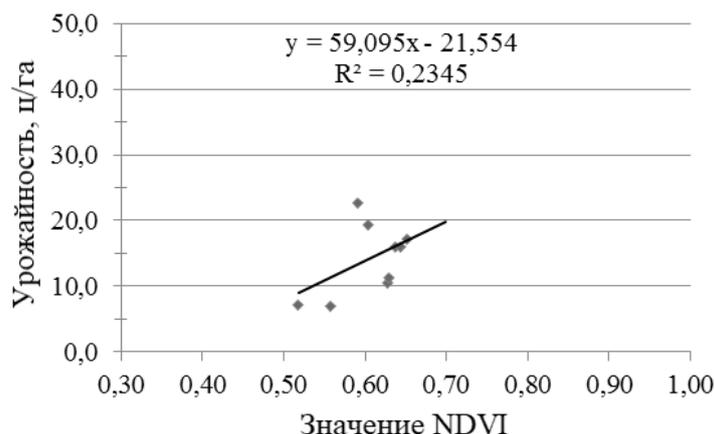


Рис. 7. Пример уровня взаимосвязи урожайности яровых культур с NDVI<sub>max</sub> для Белогорского района (2015-2023 гг.)

Таблица 3. Значения NDVI (максимальные за год) и урожайность яровых культур в зерновых единицах по районам РК и уровень их связи

Район	Параметр	NDVI <sub>max</sub> и урожайность яровых в зерновых единицах, ц/га										r*
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Бахчисарайский	NDVI	0,63	0,55	0,65	0,58	0,61	0,47	0,61	0,63	0,55	0,52	
	Ур. з.ед., ц/га	15,15	9,03	16,82	15,03	18,25	10,61	12,85	23,86	19,90		
Белогорский	NDVI	0,63	0,64	0,64	0,56	0,63	0,52	0,59	0,60	0,65	0,48	
	Ур. з.ед., ц/га	10,67	16,17	16,24	7,08	11,58	7,40	22,78	19,47	17,28		
Джанкойский	NDVI	0,58	0,64	0,51	0,54	0,62	0,46	0,67	0,55	0,51	0,22	
	Ур. з.ед., ц/га	16,69	19,89	17,33	9,02	14,99	11,36	21,22	32,68	21,82		
Кировский	NDVI	0,62	0,57	0,66	0,57	0,66	0,53	0,69	0,57	0,58	0,38	
	Ур. з.ед., ц/га	17,33	20,90	22,45	11,03	28,37	19,14	20,96	25,11	20,50		
Красногвардейский	NDVI	0,63	0,67	0,65	0,52	0,66	0,50	0,64	0,57	0,56	0,58	
	Ур. з.ед., ц/га	23,26	36,25	26,74	7,84	24,34	12,43	22,48	34,40	30,90		
Красноперекопский	NDVI	0,61	0,65	0,64	0,55	0,65	0,50	0,65	0,55	0,53	0,44	
	Ур. з.ед., ц/га	27,84	31,07	21,55	13,65	23,66	17,29	27,47	28,93	26,69		
Ленинский	NDVI	0,68	0,65	0,69	0,60	0,66	0,57	0,70	0,56	0,53	0,11	
	Ур. з.ед., ц/га	19,71	22,36	22,28	11,24	22,96	12,11	14,23	24,13	20,00		
Нижегородский	NDVI	0,69	0,68	0,69	0,59	0,69	0,47	0,66	0,62	0,62	0,50	
	Ур. з.ед., ц/га	15,68	22,84	20,66	6,18	17,94	6,90	15,94	30,97	23,56		
Первомайский	NDVI	0,60	0,60	0,65	0,51	0,61	0,49	0,62	0,56	0,55	0,53	
	Ур. з.ед., ц/га	19,39	23,39	22,28	9,96	19,08	14,17	27,87	28,79	25,89		
Раздольненский	NDVI	0,63	0,66	0,66	0,55	0,62	0,54	0,69	0,61	0,58	0,55	
	Ур. з.ед., ц/га	19,28	22,13	24,61	11,31	17,52	16,04	24,40	31,45	22,64		
Сакский	NDVI	0,64	0,63	0,67	0,53	0,64	0,52	0,65	0,61	0,58	0,55	
	Ур. з.ед., ц/га	16,35	20,53	20,65	12,54	13,08	11,19	18,35	22,89	20,54		
Симферопольский	NDVI	0,64	0,66	0,67	0,55	0,66	0,55	0,67	0,63	0,68	0,58	
	Ур. з.ед., ц/га	21,06	25,79	22,76	10,16	11,41	17,19	17,86	20,70	28,88		
Советский	NDVI	0,69	0,60	0,69	0,59	0,68	0,53	0,69	0,63	0,65	0,62	
	Ур. з.ед., ц/га	17,81	14,74	20,92	10,27	23,71	9,23	16,47	19,25	25,85		
Черноморский	NDVI	0,56	0,60	0,65	0,56	0,60	0,51	0,65	0,57	0,58	0,71	
	Ур. з.ед., ц/га	12,86	17,77	16,17	11,49	14,24	11,55	19,97	20,44	15,53		

Примечание. \* - коэффициент корреляции

Для оценки уровня связи урожайности всех яровых культур с NDVI для периода 2015–2023 гг. величины урожайности были приведены к сопоставимому виду, используя методологию пересчета в зерновые единицы (з.е.) [9], что позволило провести анализ урожайности яровых культур по районам и оценить уровень ее связи с NDVI (табл. 3).

Рассчитанный коэффициент корреляции  $r$  характеризует силу статистической связи между урожайностью яровых культур и NDVI, которая варьирует от слабой (Ленинский и Джанкойский районы) и низкой (Белогорский, Кировский, Красноперекопский и Нижнегорский районы) до высокой (Черноморский район) и средней – для остальных районов.

Учитывая наличие слабого и низкого уровня связи между урожайностью всех яровых культур и индексом NDVI (при текущем состоянии разработок), без совершенствования методологии идентификации различных яровых культур разработка многолетних норм динамики NDVI для Крыма не рекомендуется.

##### Обсуждение

В настоящее время эталоны динамики развития полевых культур являются важной темой исследований в сельском хозяйстве, так как с их помощью можно решить различные прикладные задачи. Среди зарубежных ученых, проводящих исследования в этом направлении, можно выделить Shuang Li [10], Amia A., Pipia L. [11], Tongxi H. [12]. Термин «эталон» не присутствует в этих работах, однако исследование сводится к статистическому анализу пространственных и временных данных дистанционного зондирования.

К примеру, в публикации D. Johnson [13] были проанализированы продукты спутников Terra и Aqua, учитывался не только индекс NDVI, но также и другие (LAI, EVI и т.д.). Проведено сравнение с учётом использования снимков, различных по периодичности съемки и пространственного разрешения. Большинство рассматриваемых культур (за исключением риса) показали положительный коэффициент корреляции при сравнении расчётных и фактических данных.

Также в работе E. Panek [14] анализировали взаимосвязь урожайности со значениями индекса NDVI, учитывали разновременные метеорологические и спутниковые данные на территории четырёх стран Европы. Коэффициент корреляции варьировался от 0,5 до 1,0 в зависимости от географического положения, времени года и прочих условий.

Среди отечественных исследователей этой проблемы можно выделить учёных ИКИ РАН – Хвостиков С. А., Барталёв С. А., Денисов П.В. [7, 15, 16], Ёлкина Е. С., Плотников Д. Е. [17]. В их работах

отражена методология создания разновременных серий NDVI на основе различных спутниковых данных, которые служат основой для построения эталонов динамики развития полевых культур.

Анализ многолетней динамики биопродуктивности пахотных земель включает в себя комплексное исследование изменения продуктивности сельскохозяйственных угодий. Для климатических и агрогидрологических норм параметров обычно используется ряд не менее 30-ти лет. Построение эталонов развития полевых культур позволяет анализировать отклонения NDVI от средней по району. Уточненная методология создания эталонов динамики развития полевых культур для уровня районов позволит прогнозировать урожайность, а также может способствовать принятию управленческих решений.

##### Заключение

В рамках исследований уточнена методология создания эталонов динамики развития полевых культур для уровня районов и алгоритм ее использования. На примере озимой пшеницы и озимого ячменя разработаны многолетние нормы (для периода 2001–2024 гг.) и эталоны динамики спутникового индекса NDVI (период 2014–2024 гг.), характеризующего уровень их развития.

Анализ динамики развития озимых зерновых культур для всех районов Крымского полуострова (период 2001–2024 гг.) показал наличие существенно более высокого уровня связи между данными ДЗЗ и урожайностью для периода 2014–2023 гг. по сравнению со средним уровнем связи для всего рассмотренного периода.

Создание норм и эталонов динамики NDVI позволило получить соответствующие уравнения регрессии отдельно для каждого из районов (учитывая их региональные особенности) с уровнем связи (коэффициент корреляции) от 0,64 до 0,90 и от 0,56 до 0,90 для посевов озимой пшеницы и озимого ячменя. При этом, высокий и очень высокий уровень связи урожайность – NDVI наблюдается для 9-ти и 10-ти из 14 районов степного и предгорного Крыма по озимой пшенице и озимому ячменю соответственно.

Доработанная и апробированная в рамках проведенного исследования методология создания норм и эталонов динамики развития полевых культур (на примере озимых) для уровня районов и ее алгоритм могут быть использованы в рамках задач по развитию растениеводства общей системы мониторинга за состоянием агросектора.

(Исследование выполнено с использованием ресурсов Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» [8])

##### Литература

1. Развитие сельскохозяйственных культур в России в 2024 году на основе данных дистанционного мониторинга / К. А. Трошко, П. В. Денисов, Е. А. Дунаева и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. №4. С. 308–315.

2. Развитие озимых сельскохозяйственных культур на юге европейской части России весной 2024 года на основе данных дистанционного мониторинга / К. А. Трошко, П. В. Денисов, Е. А. Дунаева и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 2. С.357–362.
3. Сычков А. А., Трошко К. А. Разработка автоматизированной системы совместного анализа спутниковых и статистических данных для оценки урожайности сельскохозяйственных культур // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. 402 с.
4. Возможности анализа состояния сельскохозяйственной растительности с использованием спутникового сервиса «ВЕГА» / В. А. Толпин, Е.А. Лупян, С.А. Барталев и др. // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27, № 7 (306). С. 581-586.
5. Возможности и опыт использования информационной системы Вега-PRO для мониторинга сельскохозяйственных земель / П. В. Денисов, К. А. Трошко, Е. А. Лупян и др. // Вычислительные технологии. 2022. Т. 27. № 3. С. 66-83.
6. Клещенко А. Д., Савицкая О. В. Технология ежедекадной оценки урожайности зерновых культур по спутниковой и наземной агрометеорологической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 178-182.
7. Хвостиков С. А., Барталев С. А. Построение эталонов сезонной динамики индекса NDVI для основных сельскохозяйственных культур // "Информационные технологии в дистанционном зондировании Земли - RORSE 2018". М: ИКИ РАН, 2019. С. 55-59. doi:10.21046/rorse2018.55
8. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП "ИКИ-Мониторинг") / Е. А. Лупян, А. А. Прошин, М. А. Бурцев и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151-170
9. Приказ Министерства сельского хозяйства РФ от 6 июля 2017 г. № 330 «Об утверждении коэффициентов перевода в зерновые единицы сельскохозяйственных культур». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/456080031?marker=6540IN> (дата обращения 23.01.2025).
10. High-quality vegetation index product generation: A review of NDVI time series reconstruction techniques / L. Shuang, X. Liang, J. Yinghong, et al. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2021. Vol. 105(5). P. 1–18
11. In-season forecasting of within-field grain yield from Sentinel-2 time series data. / A. Amin., L. Pipia, S. Belda, et al. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2024. Vol. 126. P. 103636. doi: 10.1016/j.jag.2023.103636
12. Climate change impacts on crop yields: A review of empirical findings, statistical crop models, and machine learning methods / H. Tongxi, Z. Xuesong, K. Sam, et. al. // Environmental Modelling & Software. 2024. Vol. 179. 106119.
13. Johnson D. M. A comprehensive assessment of the correlations between field crop yields and commonly used MODIS products Johnson // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. Vol. 52. P. 65–81. doi: 10.1016/j.jag.2016.05.010
14. Panek E., Gozdowski D. Analysis of relationship between cereal yield and NDVI for selected regions of Central Europe based on MODIS satellite data // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2020. No. 17. P. 100286.
15. Возможности и опыт оперативного дистанционного мониторинга состояния озимых культур на территории России / П. В. Денисов, И. И. Середа, К. А. Трошко и др. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 2. С. 171-185.
16. Прогнозирование урожайности озимой пшеницы с использованием технологий дистанционного зондирования земли / П. В. Денисов, А. Б. Иванов, Н. П. Мишуров и др. // Управление рисками в АПК. 2021. № 1(39). С. 37-45
17. Елкина Е. С. Плотников Д. Е., Дунаева Е. А. Обнаружение возможности дистанционного распознавания орошаемых земель Республики Крым на основе спектрально-временных и температурных признаков // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 5. С. 379-386.

## References

1. Development of agricultural crops in Russia in 2024 based on remote monitoring data / К. А. Troshko, P. V. Denisov, E. A. Dunaeva et al. // Modern problems of remote sensing of the Earth from the space. 2024. Vol. 21. No. 4. P. 308–315.
2. Development of winter agricultural crops in the south of the European part of Russia in spring 2024 based on remote monitoring data / К. А. Troshko, P. V. Denisov, E. A. Dunaeva, et al. // Modern problems of remote sensing of the Earth from the space. 2024. Vol. 21. No. 2. P. 357–362.
3. Sychkov A. A., Troshko K. A. Development of an automated system for joint analysis of satellite and statistical data to assess the yield of agricultural crops // Modern problems of remote sensing of the Earth from the space. 2023. 402 p.

#### **4.1.1. Общее земледелие и растениеводство (сельскохозяйственные науки)**

---

4. Possibilities of analyzing the state of agricultural vegetation using the VEGA satellite service / V. A. Tolpin, E. A. Lupyan, S. A. Bartalev, et al. // Optics of the atmosphere and ocean. 2014. Vol. 27, No. 7 (306). P. 581-586.
5. Possibilities and experience of using the Vega-PRO information system for monitoring agricultural lands / P. V. Denisov, K. A. Troshko, E. A. Lupyan, et al. // Computational technologies. 2022. Vol. 27, No. 3, P. 66-83.
6. Kleshchenko A. D., Savitskaya O. V. Technology of decadal assessment of grain crop yields based on satellite and ground-based agrometeorological information // Modern problems of remote sensing of the Earth from the space. 2011. Vol. 8, No. 1, P. 178-182.
7. Khvostikov S. A., Bartalev S. A. Construction of standards for the seasonal dynamics of the NDVI index for major agricultural crops // "Information technologies in remote sensing of the Earth - RORSE 2018". Moscow: IKI RAS, 2019. P. 55-59. doi: 10.21046/rorse2018.55
8. Experience in operating and developing the center for collective use of systems for archiving, processing and analysis of satellite data (СКР "IKI-Monitoring") / E. A. Lupyan, A. A. Proshin, M. A. Burtsev, et al. // Modern problems of remote sensing of the Earth from space. 2019. Vol. 16. No. 3. P. 151-170
9. Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation dated July 6, 2017 No. 330 "On approval of the coefficients of conversion of agricultural crops into grain units". [Electronic resource]. Access mode: <http://docs.cntd.ru/document/456080031?marker=6540IN> (access date: 23.01.2025).
10. High-quality vegetation index product generation: A review of NDVI time series reconstruction techniques / L. Shuang, X. Liang, J. Yinghong, et al. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2021. Vol. 105(5). P. 1–18
11. In-season forecasting of within-field grain yield from Sentinel-2 time series data. / A. Amin., L. Pipia, S. Belda, et al. // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2024. Vol. 126. P. 103636. doi: 10.1016/j.jag.2023.103636
12. Climate change impacts on crop yields: A review of empirical findings, statistical crop models, and machine learning methods / H. Tongxi, Z. Xuesong, K. Sam, et. al. // Environmental Modeling & Software. 2024. Vol. 179. P. 106119.
13. Johnson D. M. A comprehensive assessment of the correlations between field crop yields and commonly used MODIS products Johnson // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. Vol. 52. P. 65–81. doi: 10.1016/j.jag.2016.05.010
14. Panek E., Gozdowski D. Analysis of the relationship between cereal yield and NDVI for selected regions of Central Europe based on MODIS satellite data // Remote Sensing Applications: Society and Environment. 2020. No. 17. P. 100286.
15. Capabilities and experience of operational remote monitoring of the state of winter crops in Russia / P. V. Denisov, I. I. Sereda, K. A. Troshko et al. // Modern problems of remote sensing of the Earth from the space. 2021. Vol. 18. No. 2. P. 171-185.
16. Forecasting the yield of winter wheat using remote sensing technologies / P. V. Denisov, A. B. Ivanov, N. P. Mishurov et al. // Risk management in the agro-industrial complex. 2021. No. 1(39). P. 37-45
17. Elkina E. S. Plotnikov D. E., Dunaeva E. A. Discovery of the possibility of remote recognition of irrigated lands of the Republic of Crimea based on spectral-temporal and temperature features // Modern problems of remote sensing of the Earth from the space. 2024. Vol. 21. No. 5. P. 379-386.