

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПРОДУКТИВНОСТИ ОЗИМОЙ ПШЕНИЦЫ В УСЛОВИЯХ ЖИТОМИРСКОГО ПОЛЕСЬЯ

**П. И. ТРОФИМЕНКО, В. И. ЗАЦЕРКОВНЫЙ**

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,  
Украина, e-mail: [trofimenkopetr@ukr.net](mailto:trofimenkopetr@ukr.net), E-mail: [vitalii.zatserkovnyi@gmail.com](mailto:vitalii.zatserkovnyi@gmail.com)

**Е. В. ЗУБОВА, Н. В. ТРОФИМЕНКО**

Житомирский национальный агроэкологический университет,  
Украина, e-mail: [olenalis@ukr.net](mailto:olenalis@ukr.net), e-mail: [NVtrofimenkonv@rambler.ru](mailto:NVtrofimenkonv@rambler.ru)

**Т. Н. МЫСЛЫВА**

УО «Белорусская государственная сельскохозяйственная академия»,  
г. Горки, Беларусь, e-mail: [byrty41@yahoo.com](mailto:byrty41@yahoo.com)

(Поступила в редакцию 10.04.2018)

На основании собственных экспериментальных исследований выполнен анализ эффективности использования данных дистанционного зондирования для оценки продуктивности озимой пшеницы в условиях Житомирского Полесья. Разработан алгоритм применения методов дистанционного зондирования для прогнозирования урожайности, предусматривающий определение взаимосвязи между энергетическими параметрами многоспектральных снимков и продуктивностью озимой пшеницы на разных типах почв. Экспериментальные исследования проведены с применением полевых и камеральных методов с последующей статистической обработкой результатов, их геоинформационным анализом и представлением в виде карт, созданных методом количественного фона. Получены функциональные зависимости между урожайностью зерна и соломы озимой пшеницы и отражающей способностью спектрональных растровых изображений и вегетационных индексов. Установлено наличие высоких ( $r=0,82-0,90$ ) коэффициентов корреляции между величиной отражающей способности для каналов 11, 12, вегетационного индекса NDSI и урожайностью основной и побочной продукции озимой пшеницы. Практическое значение результатов исследований заключается в разработке технологии дистанционного зондирования продуктивности озимой пшеницы на территории с мозаичным неоднородным почвенным покровом с использованием общедоступных бесплатных сцен Sentinel-2A MSI L1C и оупенсорного программного обеспечения QGIS.

**Ключевые слова:** дистанционное зондирование, продуктивность, озимая пшеница, прогнозирование, оценка, точность.

On the basis of our own experimental studies, we have conducted analysis of the effectiveness of remote sensing data use to evaluate the productivity of winter wheat in Zhytomyr Polesia. An algorithm for applying remote sensing methods for forecasting yields has been developed, which provides for the determination of relationship between the energy parameters of multispectral shots and winter wheat productivity on different types of soils. Experimental studies were carried out using field and cameral methods with subsequent statistical processing of results, their geo-information analysis and representation in the form of maps created by the quantitative background method. We have obtained functional dependencies between the yield of grain and straw of winter wheat and the reflective capacity of spectrozonal raster images and vegetative indices. We have established the presence of high ( $r = 0.82-0.90$ ) correlation coefficients between the reflectivity for channels 11, 12, the NDSI vegetation index and the yield of the main and secondary production of winter wheat. The practical significance of research results is the development of technology for remote sensing of winter wheat productivity in a territory with a mosaic heterogeneous soil cover using the free public scenes Sentinel-2A MSI L1C and open source software QGIS.

**Key words:** remote sensing, productivity, winter wheat, forecasting, estimation, accuracy.

### Введение

Дистанционное получение данных об объемах наземной биомассы сельскохозяйственных культур с использованием спутниковых снимков является наиболее экономически выгодным методом агромониторинга. Прикладное значение оценки состояния и прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур выделено в ряде международных и национальных программ [13, 23]. В Украине система мониторинга состояния сельскохозяйственных культур и прогнозирования урожайности на основе спутниковых данных разрабатывается в рамках программы «Аэрокосмические и наземные наблюдения в интересах устойчивого развития и безопасности» (GEOUA), формируемой по решению совместного заседания Президиума Национальной академии наук Украины (НАНУ) и Коллегии Национального космического агентства Украины (НКАУ) от 17.01.2007 г. [5].

Исходя из того, что площади посевов зерновых культур в Украине постоянно увеличиваются [7], особую значимость приобретает разработка алгоритма качественного дистанционного диагностирования урожайности их зерна и соломы. Однако на точность проведения дистанционного диагностирования влияет целый ряд объективных и субъективных факторов, определяющих урожайность той или иной сельскохозяйственной культуры: неоднородность почвенного покрова, изменчивость климатических условий, различия в эффективности применяемых агротехнологий и сортовой структуре посевов. Исходя из этого, значительное количество исследователей [11, 22] указывает на необходимость разработки комплексных прогнозных моделей, учитывающих тип почвы, вид землепользования, разнообразие культур, климатические условия. Однако получение таких моделей предполагает сложный процесс корректного интегрирования разнокачественных данных, который в конечном итоге может привести к снижению точности дистанционного зондирования и обесцениванию идеи комплексности.

По нашему мнению, для качественной разработки модели дистанционного диагностирования урожайности озимой пшеницы необходимо четко понимать характер ее обусловленности. Для агроэкологических условий Житомирского Полесья такими факторами следует считать тип почвенного покрова (поскольку существует большая его мозаичность) и сортовую структуру посевов. Причем информация о сортовой структуре посевов может быть использована как дополнительная и уточняющая в случае необходимости получения данных о накоплении массы соломы. Выявить и зафиксировать эти факторы и получить качественный и надежный прогноз возможно с помощью спутниковых снимков с высоким разрешением, каковыми являются сцены Sentinel-2A.

Вопросам оценки эффективности использования данных дистанционного зондирования для прогноза урожайности сельскохозяйственных культур посвящен целый ряд исследований как отечественных, так и зарубежных ученых. На сегодняшний день многим исследователям удалось разработать собственные прогнозные модели урожайности культур, учитывающие конкретные локальные условия формирования продуктивности, которые обеспечили удовлетворительную точность определения, однако ни одна из предложенных моделей не может в полной мере претендовать на универсальность. Для определения урожайности культур с использованием данных дистанционного зондирования используют несколько принципиальных подходов: диагностирование урожайности по спектральной информации в определенные этапы (периоды) вегетации культур [6, 21]; построение прогнозных моделей урожайности по данным полевых измерений на разных этапах органогенеза культуры с использованием методов аппроксимации [17, 26]; оценку продуктивности фитомассы сельскохозяйственных культур с использованием вегетационных индексов, полученных в ходе комбинации различных спектральных каналов спутниковых сцен [8, 10, 15, 22 и др.].

В частности, в исследованиях [21] обнаружен тренд вегетационного индекса RVI как отношение каналов многоспектральных снимков Landsat TM и урожаев озимой пшеницы. Вариация урожаев на уровне малого хозяйства (фермы) на 65% согласовывалась с величинами данного вегетационного индекса и агрометеорологической информацией. По данным [26], величина аккумуляции абсолютно сухого вещества фитомассы на 64% объясняется значениями индекса NDVI, тогда как почвенные и погодные факторы обуславливают остальные регрессии.

Достаточно информативным оказался подход к построению корреляционных прогнозных моделей урожайности зерновых культур на основе спутниковых снимков со средним разрешением MODIS, NOAA AVHRR, SPOT с использованием усредненных данных урожайности в разрезе отдельных областей и провинций [2, 4, 5, 11]. Рассчитанные величины индекса NDVI хорошо согласовывались (73%) с урожайностью сельскохозяйственных культур (преимущественно пшеницы озимой) на почвах Лесостепи и Степи Украины [4, 5], где пестрота почвенного покрова незначительна. При этом максимальные значения индекса были приурочены к определенным датам вегетации. Использование на каштановых и светло-каштановых почвах среднего за вегетационный период озимой пшеницы индекса NDVI также обеспечило удовлетворительные результаты регрессионной зависимости ( $R^2 = 0,78$ ) [2].

Прогноз урожайности, основанный на использовании снимков, синхронизированных с фазами развития пшеницы яровой на суглинистых и супесчаных почвах с учетом сезонной количества осадков, доказал достаточное обоснованность и эффективность такого прогнозирования [11]. Похожий подход к диагностике урожая озимой пшеницы на почвах переходной зоны от Правобережного Полесья к Лесостепи Украины описан и в работе [6]. Суммарный NDVI за

отдельные периоды органогенеза на сплошной сети конкретных хозяйств в разные годы позволил получить регрессионную модель с  $R^2=0,67$ . В исследованиях китайских ученых [15] также использовался подход с суммированием максимального индекса NDVI в пределах определенных периодов роста растений, в результате чего была получена линейная регрессионная прогнозная модель на уровне провинций КНР.

В работе [22] при прогнозировании урожая на уровне районов использовали различные вегетационные индексы, полученные комбинациями сцен из серий космических снимков MODIS, NOAA AVHRR. Построенная на основе комплекса данных модель (метеорологические условия, статистические данные) в результате проведенной кросс-валидации обеспечила относительную погрешность измерений 10 %. Похожий подход был реализован при разработке алгоритмов определения урожайности в Украине и в КНР [8, 15]. Использование различных вегетационных индексов, рассчитанных на основе Red, Infra Red и SWIR диапазонов обеспечило прогнозирование урожая пшеницы на уровне 87 %, а высокая точность прогнозирования, выполненного за 6 недель до уборки культуры, показала целесообразность применения указанного подхода [10]. Однако, конкретная приуроченность проведения полевых работ к определенному этапу органогенеза растений свидетельствует лишь о создании соответствующих условий формирования биомассы, величина которой оказалась пропорционально соразмерной с продуктивностью на момент сбора урожая.

Учитывая вышесказанное, выполнение исследований, направленных на создание прогнозных моделей урожайности озимой пшеницы с использованием данных дистанционного зондирования в условиях сложной структуры почвенного покрова Житомирского Полесья представляет собой важную научную задачу, решению которой и посвящена данная работа.

Для достижения цели исследований были поставлены следующие задачи: учитывая параметры сценариев почвенных ареалов, установить характер зависимости яркостных характеристик каналов сцены Sentinel-2A от полевой урожайности зерна и соломы озимой пшеницы; разработать модель определения урожайности озимой пшеницы с использованием данных дистанционного зондирования в условиях сложной структуры почвенного покрова Житомирского Полесья Украины.

### Основная часть

Исследования выполнялись на территории Брусиловского района Житомирской области (Украина) на землях ООО «Вега-Агро» (д. Осовцы; 50°21' с. ш. и 29°29' в. д.) на площади 223,34 га. Данная территория расположена в пределах Житомирского Полесья на границе с зоной Лесостепи Украины и отличается исключительной почвенной неоднородностью (рис. 1).

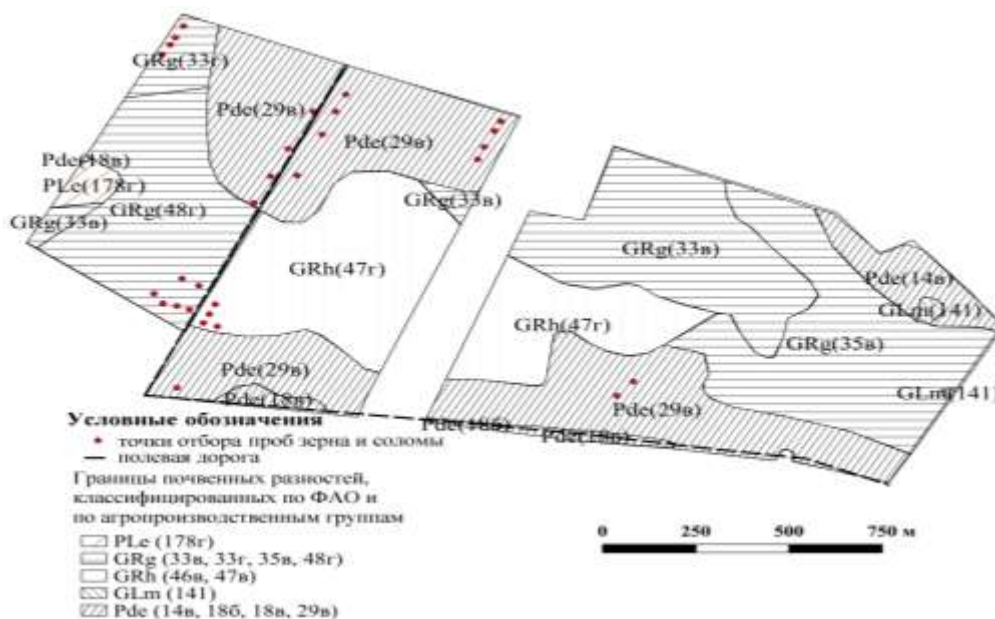


Рис. 1. Карта почвенного покрова исследуемой территории

В табл. 1 приведены сведения о количестве точек наблюдений, расположенных в пределах ареалов распространения типов почв, выделенных по классификации ФАО и по соответствующим агропроизводственным группам почв, принятым в Украине. Во время координирования точек

отбора растительных образцов использовался прибор GPS Trimble R3, который в режиме навигационной съемки обеспечивал дифференциальную точность WAAS/EGNOS <1 м в географической системе координат WGS 84 (универсальная проекция Меркатора).

Полевые исследования выполнялись в фазу наступления полной спелости озимой пшеницы сорта «Богдана» (1-я декада августа 2017 г.) и предусматривали отбор растительных образцов в соответствии с рекомендациями [1]. В каждой точке наблюдений с площади 1 м<sup>2</sup> в 5-кратной повторности срезалась вся наземная масса пшеницы и в отобранных образцах с влажностью 15 % определялись масса зерна и соломы [1, 3].

Таблица 1. Номенклатура почв в пределах исследуемой территории и количество точек наблюдений

Название и шифр агропроизводственной группы почв	Название и шифр почвы по классификации FAO	Количество точек, шт
Светло-серые и серые оподзоленные супесчаные почвы (29в)	Eutric podzoluvisols (Pde)	15
Светло-серые и серые легкосуглинистые оподзоленные глееватые почвы (33г)	Gleic Greyzems (GRg)	4
Темно-серые легкосуглинистые оподзоленные и черноземы оподзоленные поверхностно-глееватые (47г)	Haplic Greyzems (GRh)	4
Темно-серые легкосуглинистые оподзоленные и черноземы оподзоленные поверхностно-глеевые (48г)	Haplic Greyzems (GRh)	6
Светло-серые и серые оподзоленные супесчаные глееватые почвы (33в)	Gleic Greyzems (GRg)	—*
Дерново-подзолистые и подзолисто-дерновые супесчаные глеевые почвы (14в)	Eutric podzoluvisols (Pde)	—*
Дерново-подзолистые и подзолисто-дерновые связно-песчаные поверхностно-глееватые почвы (18б)	Eutric podzoluvisols (Pde)	—*
Дерново-подзолистые и подзолисто-дерновые супесчаные поверхностно-глееватые почвы (18в)	Eutric podzoluvisols (Pde)	—*
Лугово-болотные, иловато-болотные и торфовато-болотные неосушенные почвы (141)	Mollic Gleysols (GLm)	—*
Дерновые легкосуглинистые глубокие глеевые почвы и их оподзоленные разности (178г)	Eutric Planosols (PLe)	—*

\* наблюдения выполнялись только в пределах ареалов наиболее распространенных почв.

Мультиспектральная сцена Sentinel-2A MSI L1C с радиометрическим разрешением 12 бит/пиксель и пространственным разрешением 10–60 м/пиксель, используемая в качестве данных дистанционного зондирования, была получена из архива спутниковых данных USGS EROS Data Center (Геологическая служба США), находящегося в свободном доступе (табл. 2).

Таблица 2. Характеристика мультиспектральной сцены Sentinel-2A MSI L1C

Название сцены	S2A_OPER_MSI_L1C_TL_MPS_20170804T111320_A011058_T35UPR
Дата и время съемки	04.08.2017 г., 09:15
Радиометрическое разрешение, бит/пиксель	12
Пространственное разрешение, м/пиксель	10
Центральная длина волны, мкм:	
Канал 2	0,490
Канал 3	0,560
Канал 4	0,665
Канал 8	0,842
Пространственное разрешение, м/пиксель	20
Центральная длина волны, мкм:	
Канал 5	0,705
Канал 6	0,740
Канал 7	0,783
Канал 8а	0,865
Канал 11	0,1610
Канал 12	0,2190
Пространственное разрешение, м/пиксель	60
Центральная длина волны, мкм:	
Канал 1	0,443
Канал 9	0,940
Канал 10	0,1375

Каналы сцены не нуждались в радиометрической и геометрической коррекции значений пикселей и ортотрансформировании и содержали информацию об отражательной способности р ТОВА (Top of Atmosphere Reflectance) поверхности. Изображение границ ареалов почв

интегрировалось с мультиспектральной сценой, на полученную основу наносились точки отбора образцов и интегрировались в единую базу геопространственных данных. Работа с геопространственными данными выполнялась с помощью оупенсорской геоинформационной системы Quantum GIS версии 2.18.

По общеизвестным формулам, адаптированным к соответствующим каналам использованной сцены Sentinel-2A MSI L1C, были рассчитаны следующие вегетационные и почвенные индексы: нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) [20]; нормализованный дифференцированный почвенный индекс NDSI (Normalized Difference Soil Index) [25]; вегетационный индекс с учетом почвы SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) [16]; модифицированный почвенно-корректированный индекс MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index) [9, 27]; нормализованный инфракрасный индекс NDII (Normalized Difference Infrared Index) [14]; нормализованный индекс содержания влаги в почве NDWI (Normalized Difference Water Index) [12]; нормализованный индекс увядшей растительности NDSVI (Normalized Difference Senescent Vegetation Index) [19].

Полученные индексы были включены в исходную корреляционную матрицу для проведения корреляционно-регрессионного анализа в программе для статистической обработки Statistica 12.0. Статистическая обработка данных выполнялась в несколько этапов. На первом этапе путем расчета погрешности абсолютной аппроксимации - среднего отклонения расчетных значений от фактических (MAPE) и среднеквадратического отклонения расчетных значений от фактических (RMSE) было оценено качество полученных уравнений регрессии [24]. На втором этапе была проведена оценка достоверности полученных корреляционно-регрессионных моделей, которая предусматривала верификацию самой модели (кросс-валидацию), а также сравнение прогнозных величин, полученных на основе разработанной модели, с реально измеренными значениями. Указанные методы применялись для оценки моделей, полученных для доминирующей по площади почвы светло-серой и серой оподзоленной почвы.

#### Основная часть

С целью решения задачи по установлению взаимосвязи между отражательной способностью поверхности и величиной урожайности озимой пшеницы был выполнен корреляционно-регрессионный анализ. При этом было учтено, что точность дистанционного диагностирования продуктивности наземной биомассы пшеницы в значительной мере обусловлена сложностью почвенного покрова, которая определяется не только количеством типов почв, но и взаимным расположением их ареалов в пределах территории исследований. Для учета пространственной неоднородности распределения наземной массы озимой пшеницы было разработано три сценария, под которыми понимали сочетания близких по генезису и свойствам почв в зоне наблюдений. Четвертый сценарий использовался для сравнения и не учитывал почвенной неоднородности, поскольку в него были включены ареалы всех наиболее распространенных почв (табл. 3). Такой прием позволил косвенно учесть основные режимы функционирования почвы (питательный, температурный, влажности, воздушный), обуславливающие величину урожайности, а также значительно расширить возможности осуществления пространственного (геостатистического) анализа, обеспечивая определенную комбинаторность почв. При этом максимально точно воспроизводится структура почвенного покрова, характерная для соответствующей территории. В результате были установлены величины коэффициентов корреляции между продуктивностью озимой пшеницы и отражательной способностью поверхности по разным почвенным сценариям для растров каналов сцены Sentinel-2A MSI L1C (табл. 3).

Таблица 3. Коэффициенты корреляции для показателей продуктивности озимой пшеницы и качественных характеристик каналов сцены Sentinel-2A MSI L1C для различных сценариев

Номер сценария	Параметры сценария	Показатели продуктивности озимой пшеницы		
		количество продуктивных растений, шт/м <sup>2</sup>	полевая урожайность, ц/га	масса соломы полевая, ц/га
1	Светло-серые и серые оподзоленные супесчаные почвы, 29в; светло-серые и серые оподзоленные супесчаные глееватые почвы, 33г; темно-серые легкосуглинистые оподзоленные и черноземы оподзоленные поверхностно-глееватые, 47г; темно-серые легкосуглинистые оподзоленные и черноземы оподзоленные поверхностно-глеевые, 48г; FAO Pde+GRg+GRh (29 точек наблюдений)	0,56 $\rho_9$	-0,41 $\rho_{11}$ -0,42 $\rho_{12}$ 0,41 NDSI	-0,64 $\rho_{11}$ -0,60 $\rho_{12}$ -0,57 NDSI
2	Светло-серые и серые оподзоленные супесчаные почвы, 29в; FAO Pde (15 точек наблюдений)	0,76 $\rho_9$	-0,76 $\rho_{11}$ -0,82 $\rho_{12}$ 0,82 NDSI	-0,86 $\rho_{11}$ -0,89 $\rho_{12}$ 0,78 NDSI

3	Светло-серые и серые оподзоленные супесчаные почвы, 29в; FAO Pde (14 точек наблюдений)	0,75 $\rho_9$	-0,70 $\rho_1$ -0,83 $\rho_{11}$ -0,87 $\rho_{12}$ -0,69 $\rho_6$ 0,80 NDSI	-0,89 $\rho_{11}$ -0,90 $\rho_{12}$ -0,74 $\rho_6$ 0,77 NDSI
4	Светло-серые и серые оподзоленные супесчаные почвы, 29в; FAO Pde (13 точек наблюдений)	0,79 $\rho_9$	-0,70 $\rho_1$ -0,83 $\rho_{11}$ -0,86 $\rho_{12}$ 0,78 NDSI	-0,73 $\rho_6$ -0,88 $\rho_{11}$ -0,90 $\rho_{12}$ 0,75 NDSI

Примечание: 1) в качестве значимых принимались коэффициенты корреляции, величина которых превышала 0,76 при вероятности 95 %;

2)  $\rho$  – отражательная способность поверхности.

Для сценария 1, не учитывающего мозаичность почвенного покрова, не установлены значимые коэффициенты корреляции ни для одного канала либо вегетационного индекса. Максимальная зависимость для данного сценария была установлена между отражательной способностью канала 11 (средняя длина волны 0,161 мкм) и массой соломы, когда коэффициент корреляции достиг значения 0,64. В случае расширения диапазона почв (сценарий 1) происходит потеря точности прогнозной модели, которая в абсолютных величинах составила 1,73 ц/га для зерна и 1,91 ц/га для соломы. С учетом потери точности средняя погрешность аппроксимации полевой урожайности для зерна составила  $RMSE_{\text{зерно}} = 11,2$  ц/га, для соломы  $RMSE_{\text{солома}} = 13,7$  ц/га.

Наиболее информативными для диагностики величины продуктивности озимой пшеницы в фазе полной спелости, оказались нормализованный дифференцированный почвенный индекс NDSI, а также величины отражательной способности каналов 1, 6, 9, 11 и 12 сцены Sentinel-2A MSI L1C. Однако в случае получения одинаковых величин коэффициентов корреляции для отдельных каналов  $\rho_{TOA}$  альбедо и вегетационных индексов, предпочтение лучше отдавать последним.

Полученный результат следует считать закономерным и достаточно показательным. Высокие корреляционные коэффициенты величин урожайности со значениями вегетационного индекса NDSI свидетельствуют о необходимости учета почвенных различий при дистанционной диагностике. Высокая диагностирующая способность индекса NDSI является закономерной и свидетельствует о доминирующей роли почвенных параметров и режимов в формировании урожая озимой пшеницы в фазе полной спелости. Нормализованный разностной почвенный индекс NDSI определяют по формуле:

$$NDSI = (SWIR-NIR) / (SWIR+NIR),$$

где: SWIR – отражение в инфракрасном диапазоне 1550-1750 нм; NIR – отражение в инфракрасном диапазоне 2080–2350 нм.

Существует прямая взаимосвязь между величиной NDSI и содержанием влаги в почве, поскольку коротковолновая инфракрасная длина волны влияет на радиометрический отклик, способный детектировать наличие воды. При этом NDSI более тесно коррелирует с содержанием воды в почве на глубине 10 см, нежели на глубине 5 см и ближе к поверхности. Это связано с тем, что вода, как правило, проходит через верхний слой и начинает удерживаться почвой с глубины 10 см [18].

Следует отметить, что за исключением индекса NDSI для остальных зависимостей выявлен обратный характер корреляционной связи. Это связано с тем, что наблюдения проводились в период полного созревания пшеницы. Возрастание альбедо во время созревания хлебов вызывается изменением состояния растений, в первую очередь уменьшением содержания в листьях и стеблях воды, а также изменением их окраски. Независимо от параметров сценария и количества точек дистанционного диагностирования значение количества продуктивных растений озимой пшеницы хорошо соотносилось с величиной коэффициентов  $\rho_{TOA}$  для канала 9 (средняя длина волны 945 нм) ( $r = 0,75-0,79$ ).

С целью получения уравнений, пригодных для использования в качестве прогнозных, был проведен регрессионный анализ и получены следующие модели для выборки точек в пределах сценария 2 (рис 2–3).

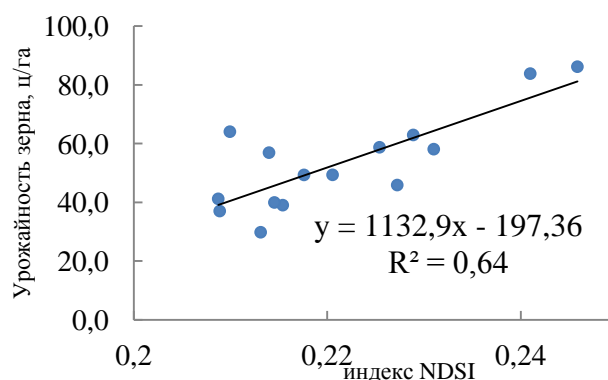


Рис. 2. Зависимость между урожайностью зерна озимой пшеницы и величиной индекса NDSI в границах Pde

Средняя погрешность аппроксимации полевой урожайности зерна составила  $\bar{A}_{\text{зерно}} = 14,5\%$  ( $\text{RMSE}_{\text{зерно}} = 9,47$  ц/га). Соответствующие величины для урожайности соломы составили  $\bar{A}_{\text{солома}} = 15,3\%$  ( $\text{RMSE}_{\text{зерно}} = 11,79$  ц/га). Коэффициенты детерминации для урожайности зерна и соломы составили соответственно 0,64 и 0,74.

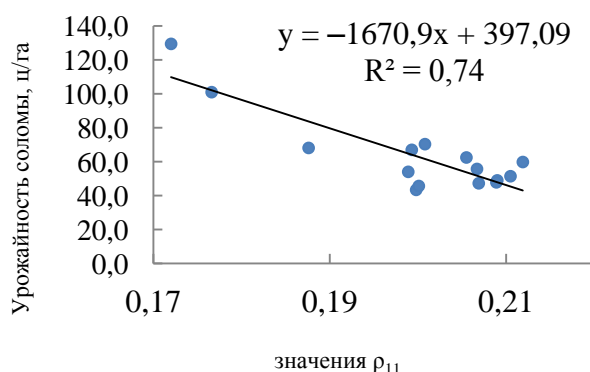


Рис. 3. Зависимость между урожайностью соломы озимой пшеницы и величиной индекса NDSI в границах Pde

Результаты применения методов кросс-валидации и тестовых участков свидетельствуют о допустимом уровне погрешностей разработанных прогнозных моделей, что указывает на достаточную корректность проведенных полевых и статистических исследований.

С целью визуализации результатов исследований на основе разработанных прогнозных моделей с использованием функциональных возможностей ГИС QGIS методом количественного фона были созданы карты пространственного распределения урожайности зерна и соломы озимой пшеницы на всю исследуемую территорию. Представленная на картах геопространственная информация в достаточной мере согласуется с особенностями территориального распространения ареалов почв. Так, например, при выполнении полевых исследований на почвах с наличием в профиле глеевого горизонта GRg (35в, 33г, 33в) урожайность пшеницы была ниже, что подтверждается и результатами геостатистического моделирования. При попиксельном подсчете общая масса зерна в пределах территории исследования составила 13248,10 ц, а соответствующая масса соломы 13339,70 ц.

### Заключение

Результаты выполненных исследований дают основания для следующих выводов: 1) данные дистанционного зондирования, полученные со спутника Sentinel-2A MSI L1C с пространственным разрешением 10 и 20 м, пригодны для диагностирования урожайности зерна и соломы озимой пшеницы; 2) установлено, что каналы ближнего инфракрасного диапазона (SWIR 11, 12) и вегетационный индекс NDSVI, рассчитанный с их использованием, могут применяться для диагностирования продуктивности озимой пшеницы в фазе полной спелости в условиях неоднородности почвенного покрова; 3) прогнозные модели урожайности зерна и соломы, созданные с использованием данных дистанционного зондирования, обеспечивают допустимый уровень погрешности, а при кросс-валидации коэффициент корреляции между измеренными и прогнозными величинами составляет 0,85-0,89; 4) при условии мозаичности почвенного покрова диагностирование продуктивности пшеницы следует выполнять в пределах почвенных ареалов, сходных по генезису и свойствам, поскольку пренебрежение данным фактом вызывает потерю точности прогнозной модели, которая в абсолютных величинах составила 1,73 ц/га для зерна и

1,91 ц/га для соломы. С учетом потери точности средняя погрешность аппроксимации полевой урожайности для зерна составила  $RMSE_{\text{зерно}} = 11,2$  ц/га, для соломы  $RMSE_{\text{солома}} = 13,7$  ц/га.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Доспехов, Б. А. Методика полевого опыта. 5 изд., перераб. и доп. / Б. А. Доспехов. – М., – 351 с.
2. Ерошенко, Ф. В. Регрессионные модели оценки урожайности озимой пшеницы в Ставропольском крае с использованием NDVI / Ф. В. Ерошенко, И. Г. Чередищенко // Бюл. Ставропольского научно-исслед. ин-та сельского хозяйства. – 2013. – № 5. – С. 58–64.
3. Зінченко, О. І. Рослинництво: підручник / О. І. Зінченко, В. Н. Салатенко, М. А. Білоножко. За ред. О. І. Зінченка // Аграрна освіта., 2001. – 591 с.
4. Регрессионные модели оценки урожайности сельскохозяйственных культур по данным MODIS / Н. Н. Куссуль [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – №1. – С. 95–107.
5. Куссуль, Н. Н. Оценка состояния растительности и прогнозирование урожайности озимых культур Украины по спутниковым данным / Наталья Куссуль, Николай Ильин, Сергей Скаун, Алла Лавренюк // XIVth International Conference "Knowledge–Dialogue–Solution". – International Book Series "Information Science and Computing". June–July 2008. – Bulgaria, Varna. – 2008. – P. 103–109.
6. Некоторые направления использования аэрокосмических методов при решении сельскохозяйственных задач в Украине / В. И. Лялько [и др.] // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Институт космических исследований Российской академии наук (Москва). – 2010. – Том: 7. – № 1. – С. 19–28.
7. Статистичний бюлетень: Посівні площі сільськогосподарських культур під урожай 2017 року / Відп. за випуск – директор департаменту статистики сільськогосподарства та навколишнього середовища Державної служби статистики України Прокопенко О. М. – К.: Держкомстат України, 2017. – 49 с.
8. Busygin, V. S. Evaluation of yield forecast indicators of agricultural crops using aerospace imagery [Электронный ресурс] / V. S. Busygin, I. M. Garkusha, K. L. Sergieieva // Kyiv, 16th International Conference on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects. Session: Remote Sensing in Geosciences. – 2017. – Режим доступа: <http://earthdoc.eage.org/publication/publicationdetails/?publication=89542>.
9. Chehbouni Qi. J. Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI) [Electronic resource] / Qi. J. Chehbouni, A. R. Huete, Y. H. Kerr // Remote Sensing of Environment. – 1994. – Vol. 48. – P. 119–126.
10. Dempewolf Jan Wheat Yield Forecasting for Punjab Province from Vegetation Index Time Series and Historic Crop Statistics / Jan Dempewolf, Bernard Adusei, Inbal Becker–Reshef, Matthew Hansen, Peter Potapov, Ahmad Khan and Brian Barker // Remote Sens. – 2014. – Vol. 6. – P. 9653–9675.
11. Doraiswamy Paul C. Crop Yield Assessment from Remote Sensing / Paul C. Doraiswamy, Sophie Moulin, Paul W. Cook, and Alan Stern // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2003. – Vol. 69, No. 6. – P. 665–674.
12. Gao Bo–Cai NDWI – A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space / Bo–Cai Gao // Remote Sensing of Environment. – 1996. – Vol. 58. – P. 257–266.
13. GEOS 10-Year Implementation Plan: Reference Document // ESA Publication Division. – 2005. – 209 p.
14. Hardisky M. The Influences of Soil Salinity, Growth Form, and Leaf Moisture on the Spectral Reflectance of Spartina Alterniflora Canopies / M. Hardisky, V. Klemas, R. Smart // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1983. – Vol. 49. – P. 77–83.
15. Huang J. Remotely Sensed Rice Yield Prediction Using Multi–Temporal NDVI Data Derived from NOAA's–AVHRR [Электронный ресурс] / J. Huang, X. Wang, X. Li, H. Tian, Z. Pan // PLoS ONE. – 2013. – Vol. 8 (8). P. e70816. – Режим доступа: <http://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0070816&type=printable>
16. Huete A. R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) [Electronic resource] / A. R. Huete // Remote Sensing of Environment, – 1988. – Vol. 25, – Is. 3, P. 295–309.
17. Johnson David M. An assessment of pre- and within-season remotely sensed variables for forecasting corn and soybean yields in the United States / David M. Johnson // Remote Sensing of Environment. – 2014. – Vol. 141. – P. 116–128.
18. Potitsep S. The potential of normalized difference soil index (NDSI) for soil water content estimation in Mongolia / S. Potitsep, R. Ishii, R. Suzuki [Электронный ресурс]: Asian Association on Remote Sensing. – Режим доступа: <http://www.aar-s.org/acrs/index.php/acrs/acrs-overview/proceedings-1?view=publication&task=show&id=379>
19. Qi J. RANGES improves satellite-based information and land cover assessments in southwest United States / J. Qi, R. Marsett, P. Heilmann, S. Biedenbender, S. Moran, D. Goodrich, M. Weltz // Eos, Transactions American Geophysical Union. – 2002. – Vol. 83(51). – P. 601–606.
20. Rouse J. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS [Electronic resource] / J. W. Rouse, R. H. Haas, J. A. Schell, D. W. Deering // Third Earth Resources Technology Satellite (ERTS) Symposium, NASA SP-351. – 1973. – Vol. I. – P. 309–317.
21. Rudorff B. F. T. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data [Электронный ресурс] / B. F. T. Rudorff, G. T. Batista // Journal International Journal of Remote Sensing. – 1991. – Vol. 12. – Issue 12. – P. 2477–2484. – Режим доступа: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431169108955281>.
22. Schut A.G.T. Improved wheat yield and production forecasting with a moisture stress index, AVHRR and MODIS data / A.G.T. Schut, D. J. Stephens, Richard G. Stovold, R. L. Craig // Crop and Pasture Science. – 2009. – № 60. – P. 60–70.
23. The common agricultural policy. - Directorate-General for Agriculture and Rural Development European Commission. – 2006. – 24 p.
24. Tofallis Chris A Better Measure of Relative Prediction Accuracy for Model Selection and Model Estimation / Chris Tofallis // J. of the Operational Research Society. – 2015. – 66(8). – P. 1352–1362.
25. Tripathi N. K., Spatial Modeling of Soil Alkalinity in GIS Environment Using IRS data [Electronic resource] / N. K. Tripathi, B. K. Rai, P. Dwivedi // 18th Asian conference on remote sensing, Kuala–Lumpur, – 1997. – P. A.8.1–A.8.6.
26. Tucker C. J. Relationship of Spectral Data to Grain Yield Variation / C. J. Tucker, B. N. Holben, J. H. Elgin, J. E. Mc Murtrey // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1980. – 6(5). – P. 657–666.
27. Zhongming Wen Stratified vegetation cover index: A new way to assess vegetation impact on soil erosion. [Electronic resource] / Wen Zhongming, Brian G. Lees, Jiao Feng, Lei Wannig, Shi Haijing // Catena. – 2010. – Vol. 83, Is. 1. – P. 87–93.