О необходимости учета влияния почвенного фона на связь нормализованного относительного вегетационного индекса посевов с их урожайностью на примере озимых культур

Е.Ю. Прудникова [1], И.Ю. Савин [1,2]
[1] ФИЦ Почвенный институт имени В.В. Докучаева, 119017, Россия, г. Москва, пер. Пыжевский, д. 7, стр. 2;
[2] Экологический факультет РУДН, 115093, Россия, г. Москва, Подольское шоссе, д. 8, стр. 5

Аннотация

Нормализованный относительный вегетационный индекс достаточно широко используется для оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур и прогнозирования их урожайности. В то же время данный вегетационный индекс чувствителен к влиянию почвенного фона, что может повлиять на результаты оценки. В статье рассматривается метод корректировки влияния почвенного фона на нормализованный относительный вегетационный индекс посевов сельскохозяйственных культур на примере озимых культур. Исследование проводилось на тестовых участках с озимой пшеницей, расположенных в Тульской и Московской областях. Во время проведения полевых исследований в 2018–2019 гг. измерялась спектральная отражательная способность почвы и растений озимой пшеницы в разные фазы развития. На основе модели линейной спектральной смеси моделировалось спектральное отражение посевов озимой пшеницы в красном и ближнем инфракрасном участках спектра в разные фазы ее развития на исследуемых почвах при разном проективном покрытии. Для каждой фазы определялась базовая почва, относительно которой нормировалось спектральное отражение посевов на других почвах. Рассчитывались поправочные коэффициенты к значениям спектрального отражения посевов в красном и ближнем инфракрасном каналах для приведения их к спектральному отражению посевов на базовой почве. Оценка влияния поправочных коэффициентов на связь между анализируемым вегетационным индексом и урожайностью озимых культур проводилась на примере Ясногорского и Веневского районов Тульской области. Рассматривались два варианта: сезонный максимум вегетационного индекса и вегетационный индекс для недели, на которой корреляция между данным индексом и урожайностью озимых наибольшая. В целом, применение поправочных коэффициентов позволило увеличить корреляцию между урожайностью озимых культур и нормализованным относительным вегетационным индексом. При этом лучшие результаты получены при коррекции для недели, для которой отмечается наибольшая корреляция между анализируемым вегетационным индексом и статистической урожайностью озимых культур.

Ключевые слова: спектральная отражательная способность, спектральная смесь, Landsat-8 OLI, NDVI, озимые культуры, почва, сельское хозяйство.

Цитирование: **Прудникова, Е.Ю.** О необходимости учета влияния почвенного фона на связь нормализованного относительного вегетационного индекса посевов с их урожайностью на примере озимых культур / Е.Ю. Прудникова, И.Ю. Савин // Компьютерная оптика. – 2026. – Т. 50, № 5. – 1749. – doi: 10.18287/COJ1749.

Citation: Prudnikova EYu, Savin IYu. On the need of accounting for the influence of the soil background on the relationship between the normalized difference vegetation index of agricultural crops and their yield using the example of winter crops. Computer Optics 2026; 50(5): 1749. doi: 10.18287/COJ1749.

Введение

Возможность использования нормализованного относительного вегетационного индекса (NDVI) для предсказания урожайности сельскохозяйственных культур отмечается уже достаточно давно [1 – 5]. Этот вегетационный индекс широко используется для оценки состояния сельскохозяйственных культур, в том числе в системах глобального мониторинга посевов [6 – 8]. При прогнозировании урожайности NDVI или накопленный NDVI может использоваться в качестве единственного предиктора в моделях линейной регрессии [8 – 10]. Согласно [8] увеличение NDVI на 0,1 показывает увеличение урожайности озимой пшеницы примерно на 1,1 т/га. В [3] показали, что регрессионное моделирование позволило предсказать урожайность озимой пшеницы с 7 % ошибкой для Канзаса и 10 % ошибкой для Украины. [10] установили для Центральной Европы, что увеличение в среднем значении NDVI в апреле на 0,1 свидетельствовало об увеличении урожайности зерновых на 1 – 2,6 т/га (среднее около 2 т/га).

С другой стороны, NDVI достаточно часто используется в качестве одного из предикторов при предсказании урожайности с помощью методов машинного и глубокого обучения [11 – 14]. Так, в обзоре [5] показано, что

NDVI является третьим по частоте использования параметром среди всех используемых параметров после температуры и осадков и первым по частоте использования среди вегетационных индексов.

В то же время у NDVI есть ряд недостатков, которые могут оказывать влияние на результат оценки состояния посевов и качество прогнозирования урожайности. В частности, данный индекс чувствителен к почвенному фону. В [15] было показано, что при одном и том же проективном покрытии почвы с низкой спектральной отражательной способностью (СОС) имеют более высокий NDVI, чем почвы с высокой спектральной отражательной способностью.

При прогнозировании урожайности сельскохозяйственных культур информация о почвенном фоне может учитываться в виде отдельных почвенных характеристик. Чаще всего используются данные о типе почв, гораздо реже – об отдельных почвенных свойствах (pH, влажность почвы) [5]. Основным недостатком использования типа почв является то, что данный параметр является классификационной единицей и его пространственные границы обычно не совпадают с пространственными границами почвенных свойств, влияющих на урожайность сельскохозяйственных культур. Использование информации об отдельных почвенных свойствах также имеет свои недостатки. Чаще всего это модельные данные, полученные с определенной ошибкой предсказания, а также не всегда оптимальным пространственным разрешением. Так, данные о почвенных свойствах, используемые в [13], имеют разрешение 250 м, при такой генерализации может теряться информация о внутриполевом варьировании свойств, которая может оказывать влияние на урожайность сельскохозяйственных культур.

Также для учета влияния почвенного фона был разработан ряд вегетационных индексов на основе концепции почвенной линии, предполагающих использование корректирующих коэффициентов (SAVI, TSAVI, MSAVI, OSAVI) [16]. Кроме того, в [17] был предложен вариант модификации NDVI (MNDVI), позволяющий корректировать влияние почвенного фона и атмосферы. Однако NDVI до сих пор остается наиболее часто используемым вегетационным индексом в области мониторинга и оценки состояния посевов сельскохозяйственных культур, включая прогнозирование урожайности [5, 11]. Кроме того, было показано, что вегетационные индексы, основанные на концепции почвенной линии, также чувствительны к влиянию почвенного фона, поскольку не устойчивы к вариациям свойств почв, определяющих их спектральную отражательную способность в видимом участке спектра [18, 19]. Также они не учитывают динамичность открытой поверхности пахотных почв [19].

Несмотря на широкое применение и простоту использования NDVI, многие модели его связи с урожайностью сельскохозяйственных культур никак не учитывают влияние почвы на значение данного индекса. Более того, влияние почвенного фона на предсказание урожайности сельскохозяйственных культур на основе вегетационных индексов практически не изучалось.

Целью нашего исследования было разработать метод коррекции влияния почвенного фона на спектральную отражательную способность посевов и NDVI для повышения точности прогнозирования урожайности сельскохозяйственных культур и провести демонстрацию его эффективности на примере озимых культур с использованием модели линейной связи между NDVI и урожайностью посевов.

1. Объект и методы исследования

1.1. Объект исследования

В качестве объектов исследований использована территория Ясногорского, Щекинского и Веневского районов Тульской области, а также Домодедовского района Московской области с посевами озимых культур (рис. 1). Среди озимых культур, выращиваемых в этих районах, преобладает озимая пшеница. На ее долю приходится более 95 % посевов озимых. Почвы региона исследований представлены дерново-подзолистыми, аллювиальными, выщелоченными черноземами и серыми лесными.

В Тульской и Московской областях посев озимых культур происходит во второй половине сентября. Период покоя начинается в начале ноября с появлением устойчивого снегового покрова. Возобновление вегетации происходит в конце марта – начале апреля. Уборка урожая – конец июля – начало августа.

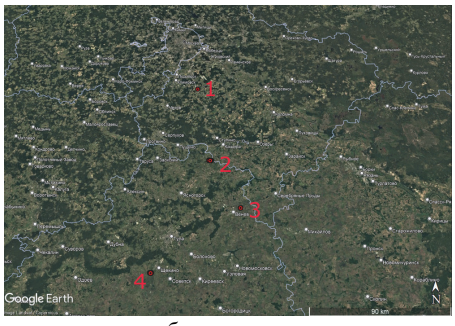


Рис. 1. Регион исследования. Цифры красного цвета обозначают номера тестовых участков: 1 – Домодедовский район Московской области; 2 – Ясногорский район Тульской области; 3 – Веневский район Тульской области; 4 – Щекинский район Тульской области

1.2. Данные

В период апрель–октябрь 2018 и 2019 гг. было совершено несколько выездов на тестовые участки, расположенные в регионе исследования (рис. 2). Во время каждого выезда проводилась съемка спектральных кривых с помощью спектрорадиометра HandHeld-2, работающего в диапазоне 325 – 1075 нм. В каждой точке полевого обследования (ТПО) в 5-кратной повторности снимались спектральные кривые для открытой поверхности почвы (поверхность почвы, свободная от растительности) и растений озимой пшеницы (рис. 2). Для снятия спектров растения озимой пшеницы листья отделялись и выкладывались сплошным слоем на ровную поверхность. И спектры определялись для этого ровного слоя листьев [19].

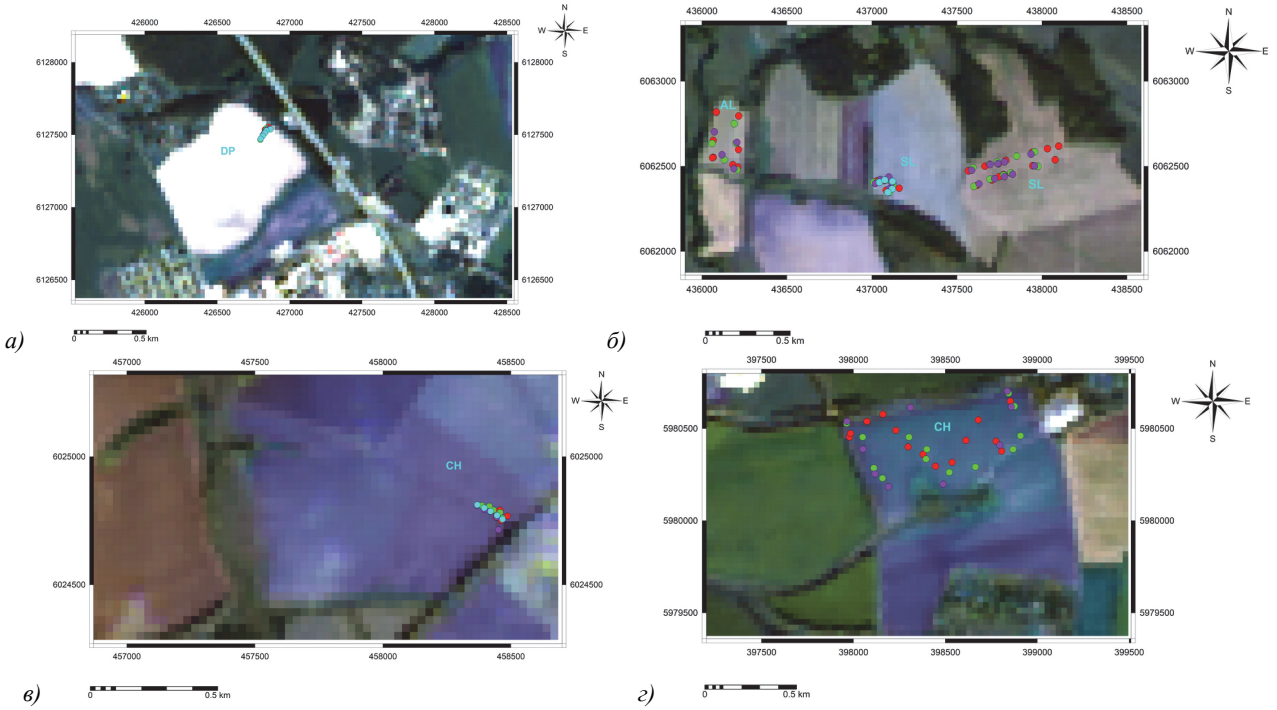


Рис. 2. Тестовые поля, расположенные в регионе исследования (подложка – Landsat 8 OLI, сцена от 24.08.2018, комбинация 4, 3, 2 – «естественные цвета»): а) Домодедовский район Московской области; б) Ясногорский район Тульской области; в) Веневский район Тульской области; г) Щекинский район Тульской области. DP – дерново-подзолистые почвы, CH – чернозем выщелоченный, AL – аллювиальные почвы, SL – серые лесные почвы. Красные точки – точки съемки спектров в фазу кущения, зеленые точки – в фазу выхода в трубку, фиолетовые – в фазу молочной спелости, голубые – в фазу твердой спелости

В фазу кущения озимой пшеницы съемка спектров была проведена в 49 точках, в фазу выхода в трубку – в 43, в фазу молочной спелости – в 37 (в 23 из них были получены только спектры открытой поверхности почвы), в фазу твердой восковой спелости – в 15 точках (рис. 3).

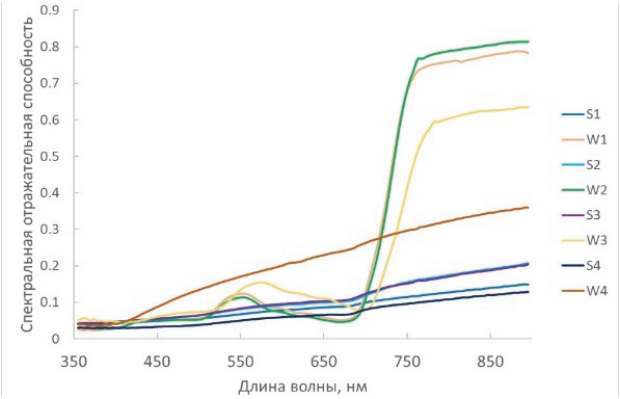


Рис. 3. Средние кривые спектрального отражения открытой поверхности почв (S) и растений озимой пшеницы (W) в разные фазы ее развития: 1) кущение, 2) выход в трубку, 3) молочная спелость, 4) твердая спелость

На территории исследования было отобрано 7 дат съемки Landsat-8 OLI за период весна–осень 2017–2019 гг., в которые были получены безоблачные данные: 21.08.2017, 11.05.2018, 27.05.2018, 21.06.2018, 24.08.2018,

11.10.2018, 18.10.2018. Использовались атмосферно скорректированные данные, содержащие информацию о спектральной отражательной способности поверхности (продукт Landsat 8 Collection 2 level-2) [20]. Территория исследования покрывается одной сценой Landsat-8 OLI.

1.3. Общая стратегия исследования

На первом этапе отдельно для каждой фазы развития озимой пшеницы проводилось моделирование спектрального отражения посевов в красном и ближнем инфракрасном (ИК) участках спектра на разных почвах при разном проективном покрытии по данным точечных полевых измерений спектральной отражательной способности почв и растений. Затем по модельным данным проводился расчет поправочных коэффициентов для коррекции влияния почвенного фона на спектральное отражение посевов озимой пшеницы в анализируемых участках спектра.

Поскольку моделирование и расчет поправочных коэффициентов проводились на основе точечных данных, следующим этапом стало создание карт поправочных коэффициентов. Для этого использовались спутниковые данные Landsat-8 OLI. Пространственное разрешение этих спутниковых данных оптимально для данной цели с учетом расположения ТПО.

Для каждой фазы развития озимой пшеницы создавалась отдельная карта с поправочными коэффициентами для красного и ближнего ИК-каналов.

Заключительным этапом стала проверка эффективности использования полученных поправочных коэффициентов для прогнозирования урожайности озимой пшеницы с использованием уточненных значений NDVI для полей с озимыми культурами для Ясногорского и Веневского районов Тульской области. Более подробно каждый из этапов описан ниже в соответствующем параграфе. Схема общей стратегии исследования представлена ниже на рис. 4.

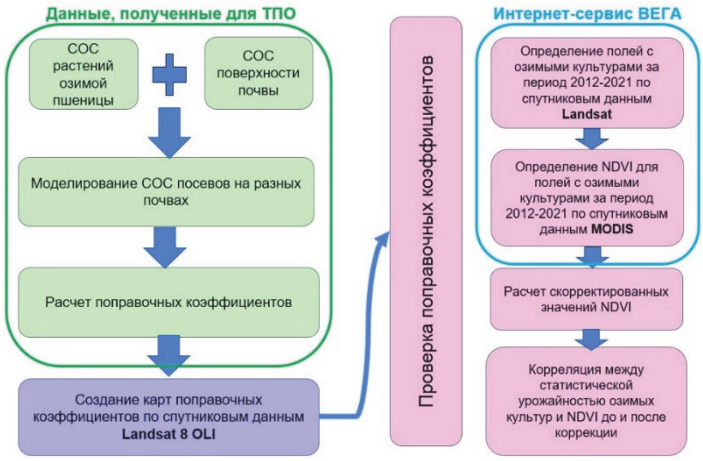


Рис. 4. Стратегия исследования (ТПО – точки полевого обследования)

1.4. Моделирование спектрального отражения посевов озимой пшеницы в красном и ближнем ИК-участках спектра на разных почвах

Сначала была проведена предобработка спектральных кривых, снятых в поле, которая заключалась в их усреднении, поскольку они были сняты с 5-кратным повторением в каждой точке. После чего все полученные спектральные кривые были сглажены с помощью фильтра Савицкого–Голея в программном пакете R для уменьшения шумов. Затем для каждой ТПО было рассчитано среднее значение спектральной отражательной способности открытой поверхности почвы и растений озимой пшеницы в красном (620–690 нм) и ближнем ИК- (760 – 900 нм) участках спектра.

Для каждой анализируемой фазы развития озимой пшеницы было проведено моделирование спектральной отражательной способности ее посевов при изменении почвенного фона и проективного покрытия в каждой ТПО.

Спектральное отражение посевов в каждой ТПО рассматривалось аналогично [19] как линейная спектральная смесь спектрального отражения открытой поверхности почвы (поверхность без растительности) и растений озимой пшеницы. Моделирование проводилось в ТПО по следующей формуле:

$$SRn=s1\times SRww+(1-s1)\times SRs, \quad (1)$$

где SRn – модельное спектральное отражение посевов в конкретной ТПО, SRww – среднее спектральное отражение озимой пшеницы в конкретную фазу развития; SRs – спектральная отражательная способность поверхности почвы в конкретной ТПО; s1 – проективное покрытие озимой пшеницы: при моделировании изменялось от 0 до 1 (100 %) с шагом в 0,1 (10 %).

1.5. Расчет поправочных коэффициентов для красного и ближнего ИК-участков спектра

Поправочные коэффициенты рассчитывались для каждой анализируемой фазы развития озимой пшеницы на основе смоделированных на предыдущем шаге данных в ТПО (п. 1.4, уравнение 1) следующим образом:

$$SRcoef = SRn/SRbase, \quad (2)$$

где SRcoef – поправочный коэффициент для спектрального отражения в анализируемом участке спектра в конкретной ТПО, SRn – модельное спектральное отражение посевов в анализируемом канале в конкретной ТПО (уравнение 1), SRbase – модельное спектральное отражение посевов на базовой почве в анализируемом канале в конкретной ТПО. Базовая почва – почва с максимальным спектральным отражением и в красном, и в ближнем ИК-участке спектра. Базовая почва определялась для региона исследований для каждой фазы развития озимой пшеницы на основе анализа значений спектральной отражательной способности, измеренной в поле.

Расчет поправочных коэффициентов, как и моделирование спектрального отражения посевов (п. 1.4), проводился для разного проективного покрытия.

1.6. Создание карт поправочных коэффициентов по спутниковым данным

Для каждой фазы развития озимой пшеницы для региона исследования по спутниковым данным Landsat 8 OLI создавалась отдельная карта с поправочными коэффициентами для красного и ближнего ИК-каналов (рис. 5).

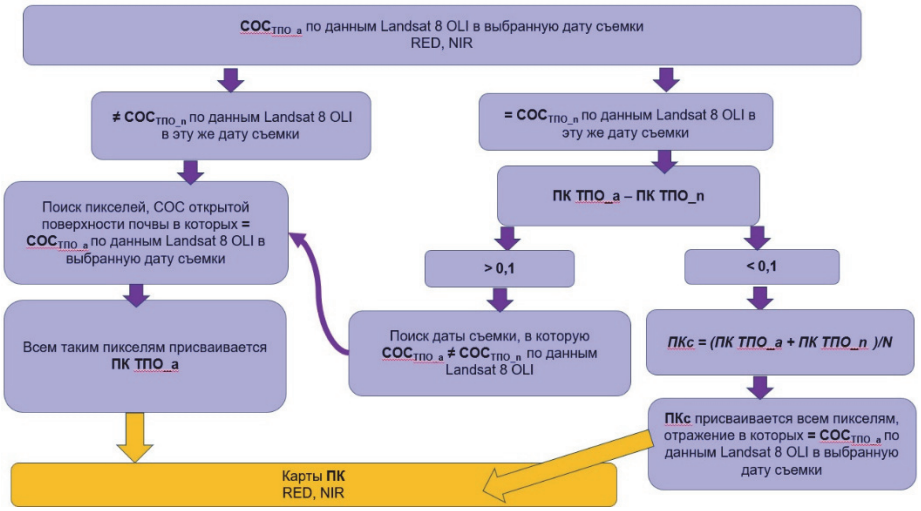


Рис. 5. Схема создания карт поправочных коэффициентов по спутниковым данным: СОС – спектральная отражательная способность, ТПО_а – анализируемая точка полевого обследования, ТПО_n – остальные точки полевого обследования (с которыми производится сравнение), ПК – поправочный коэффициент, ПКс – средний поправочный коэффициент, N – количество точек полевого обследования, для которых рассчитывается ПКс, выбранная дата съемки – дата, в которую большая часть ТПО, по данным Landsat 8 OLI, попала на открытую поверхность пахотных почв, RED – красный канал Landsat 8 OLI, NIR – ближний ИК-канал Landsat 8 OLI

Сначала для всех ТПО считывались значения отражения в красном и ближнем ИК-каналах съемки Landsat-8 OLI для всех выбранных сроков съемки (п. 1.2). Затем путем экспертного анализа видимых композитов (комбинация каналов 4, 3, 2 – «естественные цвета») для каждого из анализируемых сроков съемки определялись ТПО, в которых поверхность пахотных почв была открыта (без растительности). После чего выбиралась дата съемки, в которую большее количество ТПО попало на открытую поверхность. И сцена, полученная в эту дату, использовалась как основа для создания карты поправочных коэффициентов для региона исследований.

В связи с динамичностью свойств и спектральной отражательной способности открытой поверхности пахотных почв прямой перенос поправочных коэффициентов, рассчитанных на основе полевых данных (например, на основе регрессионного уравнения), на спутниковые данные приведет к ошибкам. Поэтому в нашем подходе для интерполяции поправочных коэффициентов, рассчитанных для конкретной ТПО, на всю территорию исследований мы анализируем сходство отражения пикселей в красном и ближнем ИК-каналах съемки Landsat-8 OLI с таковым для ТПО. Сходство отражения в данном случае принимается как индикатор сходства почв и свойств их открытой поверхности.

Анализ для каждой фазы развития озимой пшеницы отдельно для красного и отдельно для ближнего ИК-каналов съемки Landsat-8 OLI проводился следующим образом. Сначала все ТПО сравнивались между собой по величине спектрального отражения в одном из двух рассматриваемых каналов Landsat-8 OLI в выбранную для создания карты поправочных коэффициентов дату съемки. Если для какой-то ТПО совпадений величины СОС с другими ТПО не было, то для всех пикселей сцены Landsat-8 OLI, спектральное отражение в которых

было таким же, как спектральное отражение для данной ТПО, устанавливался поправочный коэффициент, рассчитанный для нее.

Если были совпадения величин спектрального отражения, например, между двумя ТПО, тогда проводилось сравнение значений поправочных коэффициентов, рассчитанных для этих точек. Если значения поправочных коэффициентов для них различались меньше чем на 0,1, то пикселям, спектральное отражение в которых было равно спектральному отражению в анализируемых ТПО, присваивалось среднее значение поправочного коэффициента, рассчитанное для этих точек (рис. 6*а*). Если значения поправочных коэффициентов различались больше чем на 0,1, то для этих ТПО подбиралась другая дата съемки Landsat-8 OLI, на которой их спектральное отражение не совпадало (разница от 0,0001) (рис. 6*б*). После этого все пиксели спутниковой сцены с установленными таким образом поправочными коэффициентами объединялись в одну карту. Таким образом, для каждой анализируемой фазы развития озимой пшеницы было получено по две карты с поправочными коэффициентами: для красного и ближнего ИК-каналов Landsat-8 OLI.

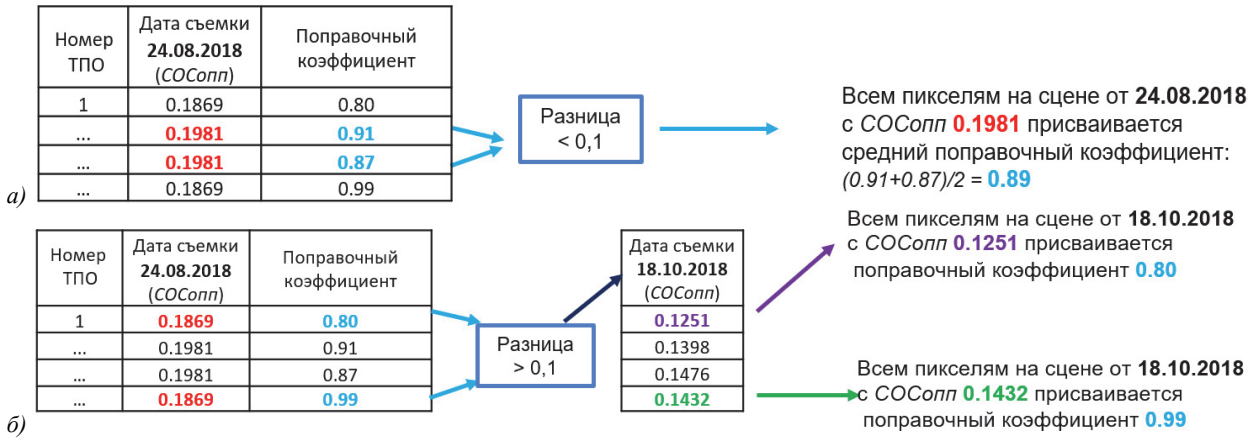


Рис. 6. Примеры определения значений поправочных коэффициентов при совпадении значений СОС в ближнем ИК-канале Landsat-8 OLI в разных ТПО: COCопп – спектральная отражательная способность открытой поверхности пахотных почв

1.7. Проверка поправочных коэффициентов: связь между NDVI (до и после коррекции) и урожайностью озимых культур

Информация об урожайности озимой пшеницы в Ясногорском и Веневском районах Тульской области была получена с сайта Федеральной службы государственной статистики [21]. Информация по районам анализировалась за период 2012–2021 гг.

1) Среднее недельное значение NDVI для района.

При анализе использовались маски полей с посевами озимых культур для каждого из выбранных для проверки районов Тульской области для каждого анализируемого года, построенные по спутниковым данным Landsat ранее на основе методов, изложенных в [22].

Недельные значения NDVI для всех полей с озимыми культурами для исследуемых районов были определены на основе данных MODIS с использованием интернет-сервиса ВЕГА [23]. После этого для каждого выбранного административного района и каждого года были рассчитаны средние для полей с озимыми значения NDVI. Далее для каждой порядковой недели года, начиная с 14 до 33, рассчитывался коэффициент корреляции между средним недельным значением NDVI для административного района и статистической урожайностью озимых. И таким образом для каждого из двух районов определялась неделя года, для которой корреляция между урожайностью озимых и NDVI была наибольшей.

Параллельно за каждый анализируемый год для полей с озимыми культурами для установленной недели года с наибольшей корреляцией считывались значения спектрального отражения по данным MODIS в красном и ближнем ИК-каналах. Затем в программе ILWIS Academic 3.3 для каждого поля с озимыми рассчитывались скорректированные значения NDVI.

Расчет проводился по следующей формуле:

$$NDVIcor = (NIR/NIRcoef - RED/REDcoef) \times (NIR/NIRcoef + RED/REDcoef), \quad (3)$$

где NDVIcor – скорректированное значение NDVI для поля с озимыми культурами для недели года с наибольшей корреляцией; NIR, RED – спектральное отражение в ближнем ИК- и красном канале, по данным MODIS, для недели года с наибольшей корреляцией для полей с озимыми культурами; NIRcoef, REDcoef – поправочный коэффициент для ближнего ИК- и красного канала для полей с озимыми, усредненные на уровне поля (карты поправочных коэффициентов, полученные по Landsat-8 OLI (п. 1.6)).

Далее полученные скорректированные значения NDVI усреднялись по районам. После чего также определялась корреляция между средним для района скорректированным значением NDVI и урожайностью

озимых культур за анализируемый период времени. Полученные коэффициенты корреляции сравнивались с коэффициентами корреляции между урожайностью и нескорректированными значениями NDVI.

2) Сезонный максимум NDVI

Для полей с озимыми культурами экспертно определялся сезонный максимум MODIS NDVI за каждый год за период 2012–2021 г. Скорректированный сезонный максимум NDVI рассчитывался аналогично скорректированному значению NDVI для недели года с наибольшей корреляцией (уравнение 3). Далее оценивалась корреляция между сезонным максимумом NDVI до и после коррекции и статистической урожайностью озимых культур.

2. Результаты и обсуждение

2.1. Результаты

Вне зависимости от фазы развития озимой пшеницы разница в модельном спектральном отражении посевов, вызванная изменением спектрального отражения почвенного фона, уменьшается при увеличении проективного покрытия (рис. 7). Кроме того, в красном канале различия в спектральном отражении посевов проявляются сильнее, чем в ближнем ИК.

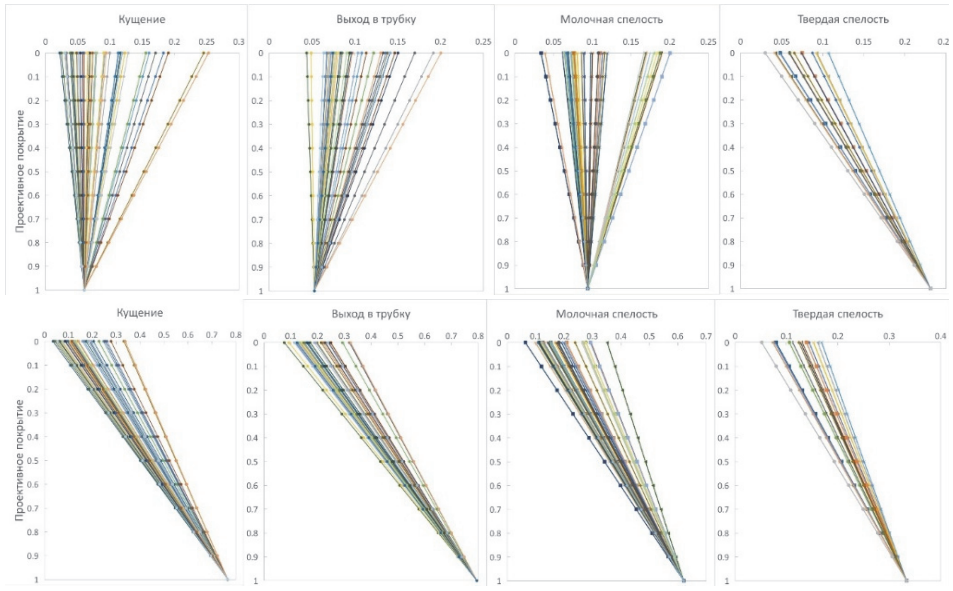


Рис. 7. Изменение модельного спектрального отражения посевов при изменении спектрального отражения почвенного фона в зависимости от проективного покрытия озимой пшеницы в фазу кущения, выхода в трубку, молочной спелости и твердой спелости в красном (а) и ближнем ИК- (б) участках спектра. По оси ОУ – изменение проективного покрытия; по оси ОХ – изменение спектрального отражения. Кривые разного цвета соответствуют разным ТПО

В красном канале модельное спектральное отражение посевов меняется по-разному по мере увеличения проективного покрытия озимой пшеницы в зависимости от спектральной отражательной способности почвенного фона. В стадии кущения, выхода в трубку и молочной спелости на почвах с высокой спектральной отражательной способностью в красном канале модельное спектральное отражение посевов снижается при увеличении проективного покрытия озимой пшеницы, в то время как на почвах с низкой спектральной отражательной способностью оно увеличивается. В стадию твердой спелости для красного канала и для ближнего инфракрасного канала во все анализируемые стадии развития наблюдается похожая ситуация: модельное спектральное отражение посевов увеличивается при увеличении проективного покрытия озимой пшеницы.

Так же как и в случае спектрального отражения в отдельных каналах, разница в NDVI посевов при изменении почвенного фона уменьшается при увеличении проективного покрытия (рис. 8). На стадии твердой спелости зависимость NDVI от проективного покрытия меняет вид, поскольку NDVI почвы превышает NDVI посевов. Следовательно, поведение NDVI при увеличении проективного покрытия озимой пшеницы зависит от почвенного фона. Оно может увеличиваться линейно либо насыщаться при достижении определенного проективного покрытия.

Величина поправочных коэффициентов увеличивается при увеличении проективного покрытия (рис. 9). Для базовых почв коэффициент равен 1 и остается постоянным при любом проективном покрытии.

Применение поправочных коэффициентов при расчете NDVI привело к существенному снижению пространственного варьирования значений этого вегетационного индекса на разных почвах при разном проективном покрытии озимой пшеницы (рис. 10) по сравнению с NDVI до применения поправочных коэффициентов (рис. 8) таким образом, что значения NDVI на разных почвах становятся одинаковыми, т.е.

кривые для разных почв совпадают. При нормировании спектрального отражения посевов озимой пшеницы в красном и ближнем ИК-каналах на почву с наибольшим спектральным отражением, скорректированный NDVI увеличивается линейно во все фазы развития озимой пшеницы, кроме фазы твердой спелости.

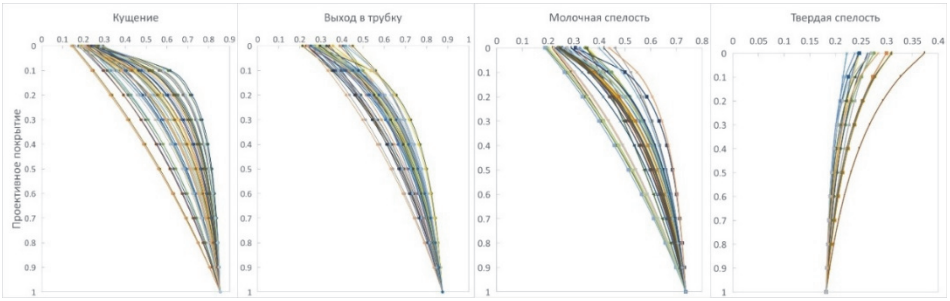


Рис. 8. Изменение NDVI при изменении почвенного фона в зависимости от проективного покрытия озимой пшеницы в стадию кущения, выхода в трубку, молочной спелости, твердой спелости. Кривые разного цвета соответствуют разным ТПО

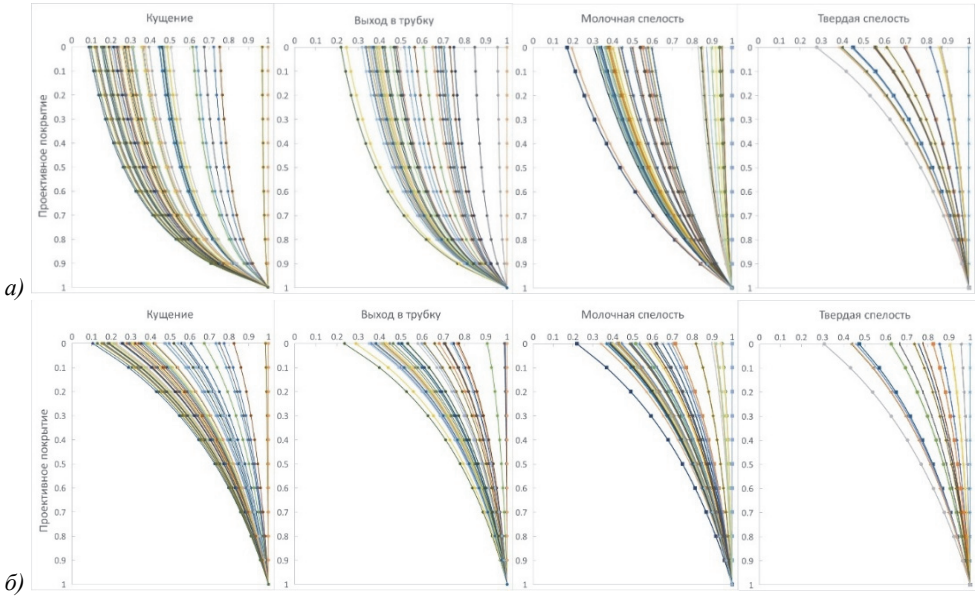


Рис. 9. Поправочные коэффициенты для пересчета на базовую почву для красного (а) и ближнего ИК- (б) каналов для фазы кущения, выхода в трубку, молочной спелости и твердой спелости. По оси ОУ – изменение проективного покрытия; по оси ОХ – изменение спектрального отражения. Кривые разного цвета соответствуют разным ТПО

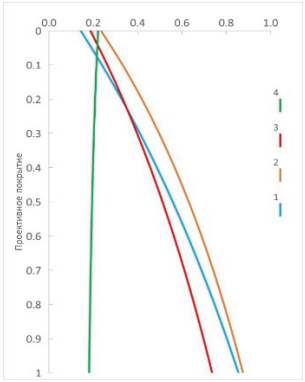


Рис. 10. Результат применения корректирующих коэффициентов при расчете NDVI в разные фазы развития озимой пшеницы: 1 – кущение, 2 – выход в трубку, 3 – молочная спелость, 4 – твердая спелость

Анализ недельных значений NDVI для Веневского и Ясногорского районов, полученных на основе данных MODIS, показал схожий характер изменения коэффициента корреляции между урожайностью озимых и недельным значением NDVI для этих двух районов (рис. 11). До 17 – 18 недели идет увеличение коэффициента корреляции. Затем коэффициент корреляции снижается. При этом в случае Ясногорского района отмечается достаточно резкое падение – до 0. Начиная с 20 недели и до 21 – 22 идет увеличение коэффициента корреляции для обоих районов. С 21 недели в случае Ясногорского района идет постепенное снижение коэффициента

корреляции. В случае Веневского района снижение отмечается с 26 недели. На 32 – 33 неделе коэффициент корреляции становится отрицательным.



Рис. 11. Корреляция между урожайностью озимых и недельным значением NDVI, полученным на основе данных MODIS, за период 2012–2021 гг.: 1 – Веневский район, 2 – Ясногорский район

При этом в случае Веневского района наибольшая корреляция наблюдается между статистической урожайностью и значением NDVI для 22-й недели, в случае Ясногорского района – для 21-й (фаза выхода в трубку).

Применение поправочных коэффициентов для недели с максимальной корреляцией позволило увеличить коэффициент корреляции между и урожайностью озимых культур для обоих анализируемых районов (табл. 1). Для Веневского района коэффициент корреляции увеличивается с 0,59 до 0,64, а в случае Ясногорского района – с 0,53 до 0,60.

В то же время в случае сезонного максимума NDVI применение поправочных коэффициентов позволило незначительно увеличить корреляцию между индексом и урожайностью озимых культур для Веневского района с 0,63 до 0,64. В случае Ясногорского района корреляция, наоборот, немного снизилась с 0,40 до 0,39.

Табл. 1. Корреляция между NDVI до и после коррекции и статистической урожайностью озимых культур

NDVI	**Веневский район**	**Ясногорский район**
Неделя с наибольшей корреляцией		
до коррекции	0,59	0,53
после коррекции	0,64	0,60
Сезонный максимум		
до коррекции	0,63	0,40
после коррекции	0,64	0,39

Примечание. NDVI как до, так и после коррекции рассчитывался только для тех полей с озимыми, для которых были получены поправочные коэффициенты. Отсутствие поправочных коэффициентов для полей объясняется двумя основными причинами:

1) отсутствием на поле пикселей без растительности в анализируемую дату съемки;

2) несовпадение отражения в пикселе с отражением в пикселях, соответствующих ТПО, ни для одного из пикселей в пределах поля.

2.2. Обсуждение

Установленные тенденции снижения модельного отражения посевов в красном канале и увеличения в ближнем ИК при увеличении проективного покрытия совпадают с результатами, полученными [15, 24]. В [15] измеряли спектральное отражение посевов хлопчатника на разном почвенном фоне (4 типа почв). В [24] моделировали изменение спектрального отражения в красном и ближнем ИК на основе моделей SAIL и SOILSPECT в зависимости от индекса листовой поверхности или угла листовой пластины. Почвенным фоном служили 26 образцов органических и минеральных почв различной влажности. В то же время в нашем случае диапазон варьирования значений модельного отражения посевов в ближнем ИК-участке спектра при изменении проективного покрытия оказался меньше, чем в красном участке. А у [24] они сопоставимы, что, вероятнее всего, связано с тем, что они использовали в исследовании почвы различной влажности, в то время как в нашем случае поверхность почв была сухой во время съемки спектральных кривых.

Согласно результатам, полученным [25], вариабельность NDVI была наиболее низкой в случае низкого или высокого проективного покрытия. В наших исследованиях такая ситуация наблюдалась только для фазы кущения, когда коэффициент вариации при нулевом проективном покрытии был ниже, чем при покрытии 0,1 – 0,3, а при дальнейшем увеличении проективного покрытия снижался до 0 при максимальном проективном

покрытии (рис. 12). Во все остальные фазы развития озимой пшеницы вариабельность NDVI была наиболее высокой при нулевом проективном покрытии и снижалась по мере его увеличения. В стадию твердой восковой спелости зависимость приобрела линейный вид. В первую очередь, это, скорее всего, связано с динамичностью открытой поверхности пахотных почв, спектральная отражательная способность которой меняется во времени [26]. Во-вторых, это также может быть связано с изменениями в спектральной отражательной способности озимой пшеницы в ходе ее развития.

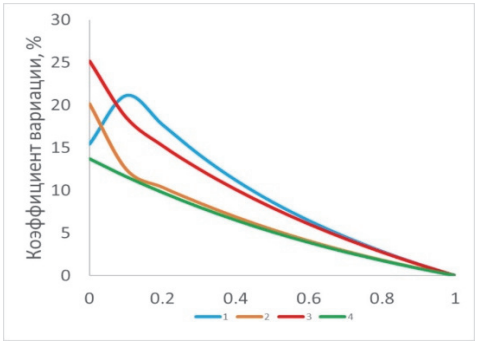


Рис. 12. Изменение коэффициента вариации (отношения среднеквадратического отклонения величины к ее среднему арифметическому, умноженного на сто процентов) NDVI посевов озимой пшеницы в зависимости от проективного покрытия в разные фазы развития озимой пшеницы: 1 – кущение; 2 – выход в трубку; 3 – молочная спелость; 4 – твердая восковая спелость. По оси OX – изменение проективного покрытия

Наибольшая корреляция между урожайностью озимой пшеницы и NDVI отмечалась для обоих анализируемых районов в фазу выхода в трубку. Похожие результаты были получены в [27], где наибольшая корреляция между и урожайностью озимой пшеницы и NDVI также отмечается для фазы выхода в трубку. При этом SAVI для данной фазы показал более низкие значения коэффициента корреляции. Время, когда между урожайностью и NDVI наблюдается наибольшая корреляция, может варьироваться. В исследовании для Центральной Европы также высокая корреляция была получена между апрельским NDVI и урожайностью озимых [10]. Этот период важен, поскольку в это время определяется число зерен, что является самым важным компонентом урожая. Похожие результаты были получены [9] для восточной части Китая. В то же время в [8] получили лучшую зависимость за один месяц для сбора урожая для Аргентины, а в [28] для Венгрии – за 6 – 8 недель до сбора урожая.

Применение корректирующих коэффициентов позволило нивелировать влияние почвенного фона на NDVI так же, как в случае SAVI, MSAVI согласно [29]. Предложенный нами подход для корректировки влияния почвенного фона позволил увеличить корреляцию между NDVI и урожайностью озимых культур. Существенным его достоинством является отсутствие привязки к классификационным единицам почв (в частности, почвенному типу). Одним из недостатков рассчитанных поправочных коэффициентов является их зависимость от фазы развития растений.

Для дальнейшего развития подхода необходима дополнительная проверка индекса с корректирующими коэффициентами на устойчивость к влиянию атмосферы и дополнительный сбор данных о спектральной отражательной способности почв и посевов для получения более полной информации о пространственном варьировании корректирующих коэффициентов, а также проверка подхода на других сельскохозяйственных культурах и при использовании в модели большего количества предикторов, а также при моделировании другими методами машинного и глубокого обучения.

Выводы

Предлагаемый подход коррекции NDVI позволяет нивелировать варьирование спектральной отражательной способности посевов в красном и ближнем ИК-участках спектра на разном почвенном фоне. Использование почвы с наибольшим спектральным отражением в качестве базовой позволяет получить скорректированный NDVI, который не насыщается при увеличении проективного покрытия, а линейно с ним связан. В целом, применение поправочных коэффициентов позволило увеличить корреляцию между урожайностью озимых культур и NDVI. При этом лучшие результаты получены при коррекции для недели, для которой отмечается наибольшая корреляция между NDVI и статистической урожайностью озимых культур.

Благодарности

Исследование выполнено в рамках госзадания по теме НИР ФИЦ "Почвенный институт им. В.В. Докучаева" FGUR-2025-0003 №226012223045-7.

References

[1] Smith RC, Adams J, Stephens DJ, Hick PT. Forecasting wheat yield in a Mediterranean-type environment from the NOAA satellite. Australian Journal of Agricultural Research 1995; 46(1): 113-125. DOI: 10.1071/AR9950113.

[2] Reeves MC, Zhao M, Running SW. Usefulness and limits of MODIS GPP for estimating wheat yield. International Journal of Remote Sensing 2005; 26(7): 1403-1421. DOI: 10.1080/01431160512331326567.
[3] Becker-Reshef I, Vermote E, Lindeman M, Justice C. A generalized regression-based model for forecasting winter wheat yields in Kansas and Ukraine using MODIS data. Remote Sensing of Environment 2010; 114(6): 1312-1323. DOI: 10.1016/j.rse.2010.01.010.
[4] He M, Kimball JS, Maneta MP, Maxwell BD, Moreno A, Beguería S, Wu X. Regional crop gross primary productivity and yield estimation using fused Landsat-MODIS data. Remote Sensing 2018; 10(3): 372. DOI: 10.3390/rs10030372.
[5] Jabed MA, Murad MA. Crop yield prediction in agriculture: A comprehensive review of machine learning and deep learning approaches, with insights for future research and sustainability. Heliyon 2024; 10(24): e40836. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e40836.
[6] Benedetti R, Rossini P. On the use of NDVI profiles as a tool for agricultural statistics: The case study of wheat yield estimate and forecast in Emilia Romagna. Remote Sensing of Environment 1993; 45(3): 311-326. DOI: 10.1016/0034-4257(93)90113-C.
[7] Doraiswamy PC, Sinclair TR, Hollinger S, Akhmedov B, Stern A, Prueger J. Application of MODIS-derived parameters for regional crop yield assessment. Remote Sensing of Environment 2005; 97(2): 192-202. DOI: 10.1016/j.rse.2005.03.015.
[8] Ren J, Chen Z, Zhou Q, Tang H. Regional yield estimation for winter wheat with MODIS-NDVI data in Shandong, China. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 2008; 10(4): 403-413. DOI: 10.1016/j.jag.2007.11.003.
[9] Lopresti MF, Di Bella CM, Degioanni AJ. Relationship between MODIS-NDVI data and wheat yield: A case study in Northern Buenos Aires Province, Argentina. Information Processing in Agriculture 2015; 2(2): 73-84. DOI: 10.1016/j.inpa.2015.06.001.
[10] 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; 17: 100286. DOI: 10.1016/j.rsase.2019.100286.
[11] Muruganantham P, Wibowo S, Grandhi S, Samrat NH, Islam N. A systematic literature review on crop yield prediction with deep learning and remote sensing. Remote Sensing 2022; 14(9): 1990. DOI: 10.3390/rs14091990.
[12] Kamangir H, Sams B, Dokoozlian N, Sanchez L, Earles JM. CMAViT: Integrating climate, management, and remote sensing data for crop yield estimation with multimodel vision transformers. arXiv preprint arXiv:2411.16989; 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2411.16989.
[13] Mena F, Pathak D, Najjar H, Sanchez C, Helber P, Bischke B, Habelitz P, Miranda M, Siddamsetty J, Nuske M, Charfuelan M. Adaptive fusion of multi-modal remote sensing data for optimal sub-field crop yield prediction. Remote Sensing of Environment 2025; 318: 114547. DOI: 10.1016/j.rse.2024.114547.
[14] Saha S, Kucher OD, Utkina AO, Rebouh NY. Precision agriculture for improving crop yield predictions: A literature review. Frontiers in Agronomy 2025; 7: 1566201. DOI: 10.3389/fagro.2025.1566201.
[15] Huete AR, Jackson RD, Post DF. Spectral response of a plant canopy with different soil backgrounds. Remote Sensing of Environment 1985; 17(1): 37-53. DOI: 10.1016/0034-4257(85)90111-7.
[16] Huete AR. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment 1988; 25(3): 295-309. DOI: 10.1016/0034-4257(88)90106-X.
[17] Liu HQ, Huete A. A feedback-based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 1995; 33(2): 457-465. DOI: 10.1109/TGRS.1995.8746027.
[18] Chen X, Guo Z, Chen J, Yang W, Yao Y, Zhang C, Cui X, Cao X. Replacing the red band with the red-SWIR band ($0.74\ \rho_{red}+0.26\rho_{SWIR}$) can reduce the sensitivity of vegetation indices to soil background. Remote Sensing 2019; 11(7): 851. DOI: 10.3390/rs11070851.
[19] Prudnikova E, Savin I, Vindeker G, Grubina P, Shishkonakova E, Sharychev D. Influence of soil background on spectral reflectance of winter wheat crop canopy. Remote Sensing 2019; 11(16): 1932. DOI: 10.3390/rs11161932.
[20] Earth Resources Observation and Science Center. Landsat 8-9 Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor Level-2, Collection 2 [dataset]. U.S. Geological Survey; 2020. DOI: 10.5066/P9OGBGM6.
[21] Federal State Statistics Service. Database of indicators of municipalities [In Russian]. Available at: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/munst.htm (accessed 24.08.2026).
[22] Savin IYu, Kucher OD. Detection of winter crops using satellite data: Possibilities and limitations [In Russian]. Agrophysics 2024; (4): 40-47.
[23] Lupan EA, Bartalev SA, Savin IYu. Satellite monitoring technologies in Russian agriculture [In Russian]. Aerospace Courier 2009; (6): 47-49.
[24] Rondeaux G, Steven M, Baret F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sensing of Environment 1996; 55(2): 95-107. DOI: 10.1016/0034-4257(95)00186-7.
[25] Todd SW, Hoffer RM. Responses of spectral indices to variations in vegetation cover and soil background. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 1998; 64(9): 915-921. Available at: https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1998journal/sep/1998_sep_915-921.pdf (accessed 24.08.2026).
[26] Vindeker GV, Prudnikova EYu, Savin IYu. Transformation of open soil surface under the impact of rainfall in a model experiment [In Russian]. Dokuchaev Soil Bulletin 2018; 95: 23-40. DOI: 10.19047/0136-1694-2018-95-23-40.
[27] Nagy A, Szabó A, Adeniyi OD, Tamás J. Wheat yield forecasting for the Tisza River catchment using Landsat 8 NDVI and SAVI time series and reported crop statistics. Agronomy 2021; 11(4): 652. DOI: 10.3390/agronomy11040652.
[28] Nagy A, Fehér J, Tamás J. Wheat and maize yield forecasting for the Tisza River catchment using MODIS NDVI time series and reported crop statistics. Computers and Electronics in Agriculture 2018; 151: 41-49. DOI: 10.1016/j.compag.2018.05.035.
[29] Huete AR, Liu HQ. An error and sensitivity analysis of the atmospheric- and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 1994; 32(4): 897-905. DOI: 10.1109/36.298018.

Сведения об авторах

Прудникова Елена Юрьевна, 1987 года рождения, в 2013 году защитила диссертацию на соискание степени кандидата биологических наук по специальности 03.02.13 «Почвоведение». В настоящий момент работает в должности старшего научного сотрудника Отдела генезиса, географии, классификации и цифровой картографии почв ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева». Сфера научных интересов: спектроскопия почв, дистанционное зондирование, дистанционный мониторинг почв и посевов. E-mail: *prudnikova_eyu@esoil.ru*

Савин Игорь Юрьевич, 1962 года рождения, академик РАН, доктор сельскохозяйственных наук. Работает главным научным сотрудником ФИЦ «Почвенный институт имени В.В. Докучаева». Сфера научных интересов: дистанционный мониторинг почв и посевов. E-mail: *savin_iyu@esoil.ru*

Поступила в редакцию 10 июня 2025 г. *Окончательный вариант – 14 января 2026 г.*

On the need of accounting for the influence of the soil background on the relationship between the normalized difference vegetation index of agricultural crops and their yield using the example of winter crops

E.Yu. Prudnikova [2], I.Yu. Savin [1,2]
[1]FRC V.V. Dokuchaev Soil Science Institute, Per. Pyzhevski, 2, bldg. 7, Moscow, 119017, Russia;
[2] The Faculty of Ecology, RUDN, Podolskoye Shosse, 8, bldg. 5, Moscow, 115093, Russia

Abstract

The normalized difference vegetation index is widely used for the assessment and prediction of crop yield. At the same time this vegetation index is sensitive to the influence of the soil background, which may affect the results of the prediction. This article demonstrates an approach for correcting the influence of the soil background on the Normalized Difference Vegetation Index of agricultural crops, using winter crops as an example. The study was carried out on test plots with winter wheat located in the Moscow and Tula regions. During field studies in 2018-2019, we measured the spectral reflectance of the soil and winter wheat plants in different phases of their development. Based on a linear spectral mixture model, we modelled the spectral reflectance of the winter wheat crop canopy in the red and near-infrared spectral bands in different phases of winter wheat development with varying projected area. For each phase, a base soil was determined in relation to which the spectral reflectance of the winter wheat crop canopy on other soils was corrected. Correction factors were calculated for the spectral reflectance of crops in the red and near-infrared channels to bring them into line with the spectral reflectance of crops on the base soil. The effect of the correction factors on the relationship between the analysed vegetation index and the yield of winter crops was assessed using the Yasnogorsk and Venevsky districts of the Tula region as examples. Two options were considered: the seasonal maximum of the vegetation index and the vegetation index for the week in which the correlation between the value of this index and the yield of winter crops was the highest. In general, the use of the correction factors provided an increase in the correlation between the yield of winter crops and the analysed vegetation index.

Keywords: spectral reflectance, spectral mixture, Landsat-8 OLI, NDVI, winter crops, soil, agriculture.

Citation: Prudnikova EYu, Savin IYu. On the need of accounting for the influence of the soil background on the relationship between the normalized difference vegetation index of agricultural crops and their yield using the example of winter crops. Computer Optics 2026; 50(5): 1749. doi: 10.18287/COJ1749.

Acknowledgements: he study was conducted within the framework of a state assignment for a research project at the V.V. Dokuchaev Soil Science Institute (a Federal Research Center), under project code FGUR-2025-0003 (No. 226012223045-7).

About authors

Prudnikova Elena Yurievna (b. 1987) defended (2013) PhD thesis for the degree of candidate of biological sciences in the specialty Soil Science. Currently works as a senior researcher in the Department of Genesis, Geography, Classification and Digital Soil Mapping of the Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Science Institute". Research interests: soil spectroscopy, remote sensing, remote monitoring of soils and crops. E-mail: *prudnikova_eyu@esoil.ru*

Savin Igor Yurievich (b. 1962), academician of the Russian Academy of Sciences, doctor of agricultural sciences. Works as chief researcher at the Federal Research Center "V.V. Dokuchaev Soil Institute". Research interests: remote monitoring of soils and crops. E-mail*: savin_iyu@esoil.ru*

Received June 10, 2025. The final version – January 14, 2026.