Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гаджиумаров Р.Г.
Идентификация прямого посева (no-till) по растительным остаткам на поверхности почв при
использовании мультिवременного интегрального индекса minNDTI

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
=====

УДК 631.48

Идентификация прямого посева (no-till) по растительным остаткам на поверхности почв при использовании мультिवременного интегрального индекса minNDTI

Ермолаев Н.Р.¹, Юдин С.А.¹, Белобров В.П.¹, Дридигер В.К.², Гаджиумаров Р.Г.²

¹Почвенный институт имени В.В. Докучаева

²Северо-Кавказский федеральный научный аграрный центр

Аннотация

В рамках исследования проанализирована возможность использования мультिवременного спектрального индекса minNDTI для идентификации хозяйств, использующих технологию прямого посева. При помощи платформы Google earth engine были получены, обработаны и проанализированы космические снимки системы Sentinel 2 за два временных срока. На основании полученных данных были построены изображения NDTI за периоды полевых работ, а также мультिवременные изображения minNDTI. В результате статистического анализа были установлены достоверные различия между значениями NDTI выборок из вариантов «вспашка» и «прямой посев» за два временных срока, в которые проводились полевые работы, и между мультिवременными значениями за два года исследований. На основании динамики значений мультिवременного индекса minNDTI была построена карта вероятности отнесения полей к прямому посеву.

Ключевые слова: ПРЯМОЙ ПОСЕВ, РАСТИТЕЛЬНЫЕ ОСТАТКИ, ГИС, ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ, СПЕКТРАЛЬНЫЕ ИНДЕКСЫ, NDTI

Введение

Современная интенсификация сельского хозяйства приводит к увеличению нагрузки на почву, что влечет за собой ускорение деградационных процессов, приводящих к потере почвенного плодородия. Традиционное «пахотное» земледелие основывается на механической обработке почвы как основной операции. Этот процесс в долгосрочной

перспективе приводит к уменьшению органического вещества в почве [1, 2]. Органическое вещество (ОВ) не только обеспечивает питательные ресурсы для урожая, но и является ключевым элементом стабилизации структуры почвы.

Особое значение негативные процессы приобретают в зонах неустойчивого увлажнения [3, 4]. В хозяйствах применяющих в сельскохозяйственной практике традиционную технологию (ТТ) обработки почвы (вспашка с оборотом пласта с последующими культивациями), с течением времени наблюдается устойчивое снижение плодородия почвы [5]. Кроме того, для получения устойчивых урожаев при ТТ, для накопления влаги в почве необходимо введение в севооборот чистых паров. Открытая поверхность парующего поля с многочисленными культивациями по закрытию влаги и борьбе с сорняками приводит к еще большей деградации почвенной структуры, что влечет усиление дефляции и водной эрозии [6].

Использование в начале 2000 годов в Ставропольском крае технологии прямого посева (ПП) позволило несколько снизить антропогенную нагрузку на сельскохозяйственные поля [3]. Как известно, технология ПП предполагает полный отказ от механической обработки почвы, оставление всей побочной продукции на поверхности поля и обязательное ведение севооборотов, причем из севооборота исключаются чистые пары. При таком ведении полевых работ, как показала пыльная буря 2020 года, блокируется ветровая эрозия, влага накапливается в почве, перекрытой с поверхности мульчирующим слоем на протяжении всего года, что снижает физическое испарение поверхности почвы, особенно в период засух.

Технология прямого посева становится важной составной частью современного землепользования страны. В этой связи необходимы достоверные данные по применению ПП и его воздействию на свойства и плодородие почв, расположенных в разных по климатическим условиям регионах.

Одним из наиболее актуальных и современных методов мониторинга состояния сельскохозяйственных угодий является использование результатов аэрокосмической съемки [7]. Дистанционное зондирование земли (ДЗЗ) с помощью современных спутниковых платформ, таких как Sentinel-2, Landsat, MODIS, позволяет получать данные об отражательных способностях объектов в различных диапазонах электромагнитного спектра. При этом качественная и количественная оценка состояния поверхности

фиксируется спектральными индексами, комбинацией растровых изображений, характеризующих отражательные способности объектов в разных участках электромагнитного спектра.

Технической основой для мониторинга ПП является количество растительных остатков на поверхности почв, полученное на основании аэрокосмических методов оценки данных спектральных индексов. Наиболее распространенным среди индексов является NDTI, в котором могут использоваться разные методы оценки:

- 1) расчет значений индекса NDTI «в моменте», т.е. в конкретный промежуток времени [8, 9];
- 2) анализ динамики значений NDTI [10];
- 3) расчет мультिवременного индекса minNDTI на основании данных NDTI за определенный временной диапазон [11, 12].

Наиболее оптимальным подходом для дешифрирования растительных остатков является, на наш взгляд, использование мультिवременных показателей NDTI. Расчет значений NDTI в один конкретный срок не позволяет характеризовать особенности почвенного покрова на уровне хозяйства или региона, что связано с технологическими особенностями традиционного земледелия и прямого посева.

В прямом посеве, так же, как и в ТТ, применяется севооборот, т.е. научно и экономически обоснованная смена культур, имеющих различную фитопродуктивность. Следствием является разный объем растительных остатков, сроки посева и уборки урожая, что усложняет процесс анализа данных при анализе данных за один срок, поскольку есть вероятность не «поймать» срок, когда все поля хозяйства или региона будут убраны. Подход, связанный с анализом динамики за определенный временной диапазон является более сложным, так как для его реализации требуется предварительная фильтрация сцен, на основании которых будут строиться индексы на базе живой растительности. Живые растения имеют значения NDTI завышенные, что может приводить к ошибкам и неверным выводам при анализе данных. Ряд исследователей предлагает использовать для фильтрации живой растительности значения вегетационного индекса NDVI с порогом фильтрации его значений выше 0.3 [10]. Индекс NDVI позволяет давать качественную оценку состояния живой растительности, однако на него влияет ряд сторонних параметров, которые затрудняют четкое количественное разграничение поверхностей и ее оценку. При

Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гаджимаров Р.Г.
Идентификация прямого посева (no-till) по растительным остаткам на поверхности почв при
использовании мультिवременного интегрального индекса minNDTI

.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
=====

применении мультिवременного подхода и использовании NDTI мы минимизируем возможность попадания в итоговые данные сторонних значений.

Целью исследования является анализ использования мультिवременного индекса minNDTI для выявления и качественно-количественной оценки растительных остатков на полях хозяйств, использующих технологию прямого посева.

Методы и объекты исследований

Полевые эксперименты проводились на ключевых участках в Буденновском районе Ставропольского края в междуречье рек Кума и Горькая Балка на территории 2-х фермерских хозяйств, использующих различные технологии обработки почвы – ТТ для этого района и ПП. На участке площадью 109 га с координатами 44° 32.000' С.Ш. и 44° 9.935' В.Д. применялась ТТ, а на участке площадью 161 га и координатами 44° 32.842' С.Ш. и 44°10.547' В.Д. – технология ПП (рис. 1).

Рис. 1. Расположение зоны исследования

В ТТ применялась вспашка с оборотом пласта и последующая культивация для подготовки почвы под посев, а в ПП использовалась специальная сеялка Salford-525

непосредственно по стерне и растительным остаткам предшествовавших культур, равномерно распределенным по поверхности почв. Технология ПП применялась на участке на протяжении 8-9 лет, а ТТ в различных модификациях севооборота постоянно. В обеих технологиях в течение последних лет использовали схожие севообороты с включением в них озимой пшеницы, озимого ячменя, подсолнечника, гороха, нута и льна масличного (рис. 2).

Буденновский район относится к северо-западной подзоне засушливой зоны Ставропольского края. Наиболее распространёнными почвами являются тёмно-каштановые и каштановые (36 и 44 % от общей площади района). Среднегодовая температура составляет 10.7°C, количество осадков – 461мм [13]. В годы проведения исследований с 1 октября 2018 г. по 30 сентября 2019 г выпало 406 мм осадков при 147 дней с осадками, а в 2020 в этом же временном диапазоне – всего 257мм при 108 днях с осадками.

Рис. 2. Общий план и поверхности почвы при разных системах обработки в годы исследований

Наиболее распространённый подход для дешифрирования растительных остатков на

поверхности почвы на основании данных ДЗЗ связан с использованием спектральных индексов [14-16], рассчитываемых по результатам операций с разными спектральными диапазонами (каналами) ДЗЗ. Высокую точность в дешифрировании растительных остатков дают СИ, рассчитанные на основании гиперспектральных данных [14, 17]. Однако такой подход имеет два главных недостатка: 1) гиперспектральные данные не имеют широкого пространственного и временного разрешения; 2) подобные данные имеют высокую стоимость, что ограничивает их использование в производстве.

Кроме индексов, основанных на гиперспектральных данных, также используются СИ, рассчитываемые на основании мультиспектральных данных, таких как Landsat и Sentinel 2. Основным преимуществом данных платформ ДЗЗ является их доступность для использования, открытый доступ к получению снимков через портал геологической службы США, Google Earth Engine и другие подобные ресурсы, а также большой архив мультиспектральных данных, который позволяет работать не только с актуальными изображениями, но проводить ретроспективные исследования. Распространённым и часто упоминаемым в зарубежной литературе спектральным индексом, основанным на открытых данных, используемых для дешифрирования растительных остатков, является NDTI - Normalized Difference tillage Index (нормализованный относительный индекс обработок). Впервые данный индекс в ключе дешифрирования растительных остатков упоминается в работе A.P. van Deventer [18]. За счет отражательных и поглотительных особенностей растительных остатков в SWIR1 и SWIR2 диапазонах электромагнитного спектра (формула 1) (табл. 1), на основании данных NDTI, можно идентифицировать открытую поверхность почвы и растительные остатки, при этом значение NDTI для растительных остатков будет выше. При подборе данных для расчета NDTI—необходимо также учитывать, что на значения NDTI в значительной степени влияют вегетирующие растения и влажность почв, завышая показатель NDTI до аномальных значений [10].

$$NDTI = \frac{SWIR1 - SWIR2}{SWIR1 + SWIR2} \quad (1)$$

Таблица 1. Каналы разных платформ ДЗЗ для построения индекса NDTI

Канал	Диапазоны ЭМС для разных источников ДЗЗ, нм			
	Landsat 5 TM	Landsat 7 ETM+	Landsat-8 OLI	Sentinel-2 MSI
SWIR1	1550–1750	1550–1750	1566–1651	1565-1655
SWIR2	2080–2350	2090–2350	2107–2294	2100-2280

Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гаджимаров Р.Г.
 Идентификация прямого посева (no-till) по растительным остаткам на поверхности почв при
 использовании мультивременного интегрального индекса minNDTI

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
 =====

В данном индексе для реализации цели работы наибольший интерес представляет его minNDTI модификация. В работах В. Zheng [11, 17, 19] обосновывается применение данного индекса в ключе анализа состояния растительных остатков при использовании прямого посева. Основная идея данного мультивременного индекса лежит в особенности технологии ПП: при правильном соблюдении технологии почва в любой момент времени перекрыта растительными остатками. Если в какой-то момент времени при прямом посеве дневная поверхность почвы не покрыта растительными остатками, это свидетельствует о нарушении технологии и ведет к ошибкам в определении minNDTI. При правильном соблюдении технологии значение minNDTI при использовании ПП будет выше, чем при традиционной технологии.

Схема технической реализации исследования представлена на рис. 3. Первым этапом работы является подбор и обработка сцен космических снимков за интересующий нас временной интервал. Были отобраны сцены системы Sentinel-2 для интересующей нас территории в динамике за отчетные периоды исследований.

Рис. 3. Схема проведения исследования

Одним из лимитирующих параметров для подбора снимков являлось покрытие облаками: не более 20% от всей территории. Из каждого снимка удалялись пиксели, соответствующие облакам и теням от облаков. Размер коллекции снимков за 2018-2019 гг.

составил 19 сцен, за 2019-2020 – 21. Для каждой сцены рассчитывались данные NDTI, а на основании коллекций рассчитывался мультитременной индекс minNDTI за оба временных промежутка, а также отбирались актуальные на момент проведения полевых работ значения NDTI.

Финальной частью работы было построение карты на основании значений динамики minNDTI за два года. Система ПП подразумевает многолетнее циклическое сохранение растительных остатков на поверхности почвы, поэтому для идентификации прямого посева имеет смысл использовать значения minNDTI за несколько лет. В оценке данных minNDTI применялась бинарная классификация, при которой значение 1 соответствовало прямому посеву, 0 – традиционной обработке. Карта строилась на основании данных вероятности отнесения пикселя к прямому посеву. Обучающей выборкой служили поля хозяйств, использующих прямой посев и традиционную для региона технологию. Классификация проводилась на основании логистической регрессии, метода ближайших соседей, дерева решений, метода случайного леса, градиентного бустинга. Качество классификации проверялось при помощи метрики – «ассигасу» – общей доли правильных ответов алгоритма. «Ассигасу» является одной из самых простых и поэтому распространённой метрикой качества. Она показывает количество правильно классифицированных объектов для всех классов от общего количества объектов. Оценка ассигасу в нашем исследовании проводилась на основании разбиения обучающей выборки на 10 случайных подвыборок [20].

Для реализации мультитременного подхода при использовании данных ДЗЗ возникает необходимость обработки и дальнейшего анализа большого объема аэрокосмических данных. Облачный сервис Google Earth Engine (GEE) предоставляет оптимальное решение подобных задач. Сервис включает в себя архив геоданных, в том числе базы данных, векторные и растровые геоданные, каталог ретроспективных и актуальных космических снимков разных платформ, а также набор инструментов для работы с этими данными. Еще одним преимуществом сервиса является наличие программного интерфейса на языке программирования Python. В связке с библиотеками для анализа геоданных, существующими для этого языка, GEE становится очень мощным инструментом получения, обработки, анализа и визуализации данных дистанционного зондирования, превосходящим по возможностям большинство специализированных

коммерческих и бесплатных настольных приложений. Статистическая обработка данных и их визуализация осуществлялись в среде jupyter notebook с использованием соответствующих библиотек

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены фотографии поверхностей почвы при разных системах обработки. Несмотря на различия между культурами за два временных промежутка, можно утверждать, что на качественном уровне в послеуборочный период поверхности отличаются друг от друга.

На основании проверки на нормальность методом Шапиро-Уилка можно утверждать, что распределение актуальных на момент проведения полевых работ значений NDTI по двум выборкам отличаются от нормального. Медианальные значения для выборок соответствуют 0.031 для прямого посева и 0.012 для традиционной технологии (рис. 4). Статистический анализ при помощи U-критерия показывает достоверные различия между выборками.

Полевые значения в 2020 г. также имеют статистически подтверждаемые различия, однако в количественном отношении не такие выраженные, как в 2019. Медианальные значения для ПП составляют 0.0302, для традиционной технологии – 0.018. Если сравнивать значения NDTI по выборкам за два года наблюдения, то значения для прямого посева не различаются (p-уровень значимости 0.164 при сравнении двух выборок), а для традиционной технологии имеют статистически достоверные различия, при этом значения в 2020 году количественно выше. Мы связываем это явление с различными погодными условиями в 2019 и 2020 гг., которые могли привести к изменению отражательных свойств открытой поверхности почв. Кроме этого, возможно, малая масса растительных остатков и более низкие актуальные значения NDTI на 21.09.2020 для прямого посева связаны с аномально засушливым сезоном этого года.

Мультитременной индекс minNDTI для сезона 2018-2019 гг. принимает медианальные значения 0.021 при прямом посеве и 0.003 при традиционной обработке. Сравнивая полученные данные с данными NDTI на момент проведения полевых работ в 2019 году, можно сказать, что значения снижаются для обеих выборок, однако также наблюдаются статистически достоверные различия. Падения значений связаны с самой

Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гаджимаров Р.Г.
Идентификация прямого посева (no-till) по растительным остаткам на поверхности почв при
использовании мультिवременного интегрального индекса minNDTI
.....
Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
=====

методикой расчета minNDTI, при которой мы отбираем именно минимальные значения. Для прямого посева значения не падают ниже 0.013.

Рис. 4. Распределение значений NDTI

Примечания: 1 – актуальные значения за 28.08.2019, 2 – актуальные значения за 21.09.2020, 3 – мультिवременные значения за 2018–2019 гг., 4 – мультिवременные значения за 2019–2020 гг.

Следует отметить, что размах значений minNDTI при традиционной технологии шире. При технологии ПП формируются «покров» растительных остатков на поверхности почвы и, по визуальной оценке, он довольно однороден, при ТТ минимальный NDTI будет соответствовать значениям голой почвы, которая, в свою очередь, является неоднородной структурой. С этим можно связать повышенную вариабельность значений minNDTI. В сезон 2019–2020 наблюдаются такие же тенденции, как и в 2018–2019. Выборки статистически различимы, показатели у прямого посева выше, чем при традиционной обработке.

На рис. 5 отражено распределение значений minNDTI за 2019–2020-сезоны для

Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гаджимаров Р.Г.
 Идентификация прямого посева (no-till) по растительным остаткам на поверхности почв при
 использовании мультитременного интегрального индекса minNDTI

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
 =====

обучающей выборки. Опираясь на полученные данные, можно сделать вывод, что данные для выборок качественно группируются. Мы видим, что не все значения для пикселей прямого посева расположены в верхней левой части графика, что соответствует высоким значениям мультитременного индекса. Мы связываем это с некоторыми технологическими нарушениями при использовании no-till.

Рис. 5. Значения мультитременного индекса minNDTI за периоды 2018-2019 и 2019-2020

В таблице 2 представлены значения метрики качества ассурасу при использовании разных методов классификации. Проверка качества осуществлялась на моделях без настройки гиперпараметров.

Таблица 2. Значения метрик качества при классификации

Классификатор	Логистическая регрессия	Метод ближайшего соседа	Дерево решений	Случайный лес	Градиентный бустинг
accuracy	0.76	0.76	0.83	0.86	0.85

Ансамблевые методы классификации – случайный лес и градиентный бустинг – дают самые высокие оценки качества для наших данных. Наиболее высокое качество

классификации было получено при использовании метода random forest (случайный лес). Мы предполагаем, что при дополнительной оптимизации модели и подборе данных за более широкий временной промежуток возможно будет достичь и более высокой оценки качества модели.

На основании результатов классификации, проведенной методом случайного леса, была построена карта сельскохозяйственных угодий Буденновского района Ставропольского края, юго-восточный участок которой представлен на рис. 6. Данная карта отражает вероятности отнесения пикселей к прямому посеву, где 1 является максимальной вероятностью, 0 – минимальной. На наш взгляд, такой подход при обработке результатов бинарной классификации позволяет перейти с качественной (два класса: прямой посев и традиционная технология) на количественную оценку (вероятность). Зеленым цветом на карте обозначены границы хозяйства, использующего прямой посев. Поля хозяйства значительно отличаются от других территорий как по плотности распределения значений вероятности на полях, так и по количественным значениям вероятности.

Рис. 6. Карта вероятностей отнесения пикселей к технологии прямого посева

Выводы

Данное исследование показало перспективность использования мультитременного спектрального индекса minNDTI для качественно-количественной оценки применения одной из двух технологий земледелия. Значения minNDTI являются интегральным

классификационным признаком, на основании которого можно идентифицировать хозяйства, применяющие технологию прямого посева. Значения данного индекса согласуются с полевыми значениями NDTI, что усиливает достоверность применяемого метода. Классификация методом случайного леса на основании динамики minNDTI дает точность 86%, что свидетельствует об информативности данного индекса. Важно отметить простоту предварительной подготовки данных дистанционного зондирования относительно других подходов, в которых применяются данные NDTI. Для идентификации хозяйств, применяющих ПП, следует использовать многолетнюю динамику значений данного мультивременного индекса, что связано с его технологическими особенностями.

Список использованных источников

1. Lal R., Reicosky D.C., Hanson J.D. Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming // Soil Tillage Res. – 2007. – Vol. 93. – № 1. – P. 1-12.
2. Montgomery D.R. Soil erosion and agricultural sustainability // Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A. – 2007. – Vol. 104. – № 33. – P. 13268-13272.
3. Дридигер В.К., Стукалов Р.С., Гаджиумаров Г.С. Влияние растительных остатков на накопление влаги и популяцию дождевых червей при возделывании полевых культур по технологии no-till // Новые методы и результаты исследований ландшафтов в Европе, Центральной Азии и Сибири. – 2018. – С. 134-139.
4. Дридигер В.К. Особенности проведения научных исследований по минимизации обработки почвы и прямому посеву (методические рекомендации). – Ставрополь: Сервис-Школа, 2020. – 69 с.
5. Turin E.N. Advantages and Disadvantages of No-Till Farming Around the World (Review) // Taurida Her. Agrar. Sci. – 2020. – Vol. 2 (22), – № 22. – P. 150-168.
6. Белобров В.П., Дридигер В.К., Юдин С.А., Ермолаев Н.Р. К вопросу о диагностике и защите почв от дефляции в Ставропольском крае // Аграрный вестник Урала. – 2021. – № 2 (205). – С. 12-25. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-205-02-12-25.
7. Loupian E.A. et al. Observation of early development of winter crops in spring 2017 in southern regions of Russia based on remote sensing data // Sovrem. Probl. Distantionnogo Zo. Zemli iz Kosmosa. – 2017. – Vol. 14. – № 2. – P. 268-272.
8. Daughtry C.S.T. et al. Remote sensing the spatial distribution of crop residues // Agron. J. – 2005. – Vol. 97. – № 3. – P. 864-871.
9. Quemada M., Craig S.T. Spectral indices to improve crop residue cover estimation under varying moisture conditions // Remote Sens. – 2016. – Vol. 8. – № 8. – P. 660.
10. Beeson P.C., Daughtry C.S.T., Wallander S.A. Estimates of conservation tillage

practices using landsat archive // Remote Sens. – 2020. – Vol. 12. – № 16. – P. 1-18.

11. Zheng B. et al. Multitemporal remote sensing of crop residue cover and tillage practices: A validation of the minNDTI strategy in the United States // J. Soil Water Conserv. – 2013. – Vol. 68. – № 2. – P. 120-131.

12. Zheng B., Campbell J.B., de Beurs K.M. Remote sensing of crop residue cover using multi-temporal Landsat imagery // Remote Sens. Environ. Elsevier Inc. – 2012. – Vol. 117. – P. 177-183.

13. Кулинцев В.. Система земледелия нового поколения Ставропольского края. – Ставрополь: АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2013. – 520 с.

14. Bannari A. et al. Estimating and mapping crop residues cover on agricultural lands using hyperspectral and IKONOS data // Remote Sens. Environ. – 2006. – Vol. 104. – № 4. – P. 447-459.

15. Najafi P. et al. Object-based satellite image analysis applied for crop residue estimating using Landsat OLI imagery // Int. J. Remote Sens. Taylor & Francis. – 2018. – Vol. 39. – № 19. – P. 6117-6136.

16. Hively W.D. et al. Mapping crop residue and tillage intensity using WorldView-3 satellite shortwave infrared residue indices // Remote Sens. – 2018. – Vol. 10. – № 10. – P. 1657.

17. Zheng B. et al. Remote sensing of crop residue and tillage practices: Present capabilities and future prospects // Soil Tillage Res. Elsevier B.V. – 2014. – Vol. 138. – P. 26-34.

18. Van Deventer A.P. et al. Using thematic mapper data to identify contrasting soil plains and tillage practices // Photogramm. Eng. Remote Sensing. – 1997. – Vol. 63. – № 1. – P. 87-93.

19. Zheng B. et al. Broad-Scale Monitoring of Tillage Practices Using Sequential Landsat Imagery // Soil Sci. Soc. Am. J. – 2013. – Vol. 77. – № 5. – P. 1755-1764.

20. John D. Kelleher B.M.N. and A.D. Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics, Algorithms, Worked Examples, and Case Studies. – London: MIT Press, 2015. – 624 p.

=====

Цитирование:

Ермолаев Н.Р., Юдин С.А., Белобров В.П., Дридигер В.К., Гаджиумаров Р.Г. Идентификация прямого посева (no-till) по растительным остаткам на поверхности почв при использовании мультитременного интегрального индекса minNDTI [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №4. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/4/st_401.pdf. DOI: <https://doi.org/10.51419/20214401>.