

УДК [633.15+633.34]:631.559: 528.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОЖАЙНОСТИ КУКУРУЗЫ И СОИ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

В. А. ГЕНИН

*РНДУП «Институт почвоведения и агрохимии»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220108*

Н. В. КЛЕБАНОВИЧ

*УО «Белорусский государственный университет»,
г. Минск, Республика Беларусь, 220108*

(Поступила в редакцию 14.06.2018)

Оценена возможность использования данных дистанционного зондирования земли для моделирования урожайности кукурузы и сои. Использованы данные перманентного учета урожайности для трех полей суммарной площадью 326 га, на двух из которых в 2017 г. произрастала кукуруза, на одном – соя. Данные вегетационного индекса NDVI были получены с использованием съемки спутника Sentinel 2. За вегетационный период указанных культур авторы располагали девятью изображениями для различных фенологических стадий. Полученные значения вегетационных индексов были сопоставлены с данными урожайности и рассчитаны показатели статистической связи. Для полей с кукурузой наибольшие значения коэффициента детерминации были зафиксированы для данных урожайности и вегетационным индексом на момент наступления фенологической стадии – 15-й лист. Для поля 1к коэффициент детерминации составил 0,91, для поля 2к – 0,70. Для поля, засеянного соей, значения статистической связи ниже (коэффициент детерминации – 0,41), максимальное его значение было получено для фенологической фазы плодообразования. Практическое значение данного исследования заключается в том, что данные вегетационного индекса NDVI могут быть использованы для моделирования распределения урожайности на поле с высоким разрешением, полученная информация может применяться в системах точного земледелия.

Ключевые слова: *геоинформационные системы, данные дистанционного зондирования земли, точное земледелие, перманентный учет урожайности, вегетационный индекс, NDVI, кукуруза, соя.*

The possibility of using remote sensing data for modeling maize and soybean yields was evaluated. For the study, we had data on the permanent recording of yields for three fields, two of which in 2017 were corn, on one – soybean. The total area of the study was 326 hectares. The NDVI vegetation index data was obtained using a Sentinel 2 satellite survey. During the vegetation period of these cultures, we had nine images for different phenological stages. The obtained values of the vegetation indices were compared with the yield data and the indices of the statistical connection were calculated. For fields with corn, the highest values of the determination coefficient were recorded for the yield data and the vegetation index at the time of the onset of the phenological stage – the 15th leaf. For the field 1k, the coefficient of determination was 0.9, for the field 2k – 0.7. For a field sowed with a soybean, the values of the statistical coupling are lower (the coefficient of determination is 0.41), its maximum value was obtained for the phenological phase of seed formation. The practical significance of this study is that the NDVI vegetation index data can be used to model yield distribution on a high-resolution field, the information obtained can be applied in precision farming systems.

Key words: *geoinformation systems, remote sensing data of the earth, exact agriculture, permanent yield calculation, vegetation index, NDVI, corn, soybean.*

Введение

Точное земледелие – область научных знаний, которая находится на пересечении агрохимии, агрономии и геоинформатики. В настоящее время в научной литературе встречаются несколько трактовок данного термина. Так, под точным земледелием понимается управление продуктивностью посевов с учётом внутривидовой вариативности среды обитания растений [1]. Иначе говоря, это оптимальное управление для каждого квадратного метра поля. Целью такого управления является получение максимальной прибыли при условии оптимизации сельскохозяйственного производства, экономии хозяйственных и природных ресурсов. При этом открываются реальные возможности производства качественной продукции и сохранения окружающей среды.

В литературе можно встретить более широкое определение [2] точного земледелия – комплексная высокотехнологичная система сельскохозяйственного менеджмента, включающая в себя технологии глобального позиционирования, географические информационные системы, технологии оценки урожайности, переменного нормирования и дистанционного зондирования земли.

Одним из направлений точного земледелия является оценка внутривариативности урожайности сельскохозяйственных культур. Ее вариативность на поле может быть следствием неоднородности почвенного покрова, агрохимических свойств почв, рельефа и других факторов. Самым точным методом оценки вариативности урожайности является уборка комбайнами, оборудованными датчиками, которые позволяют записывать значения массы и влажности убираемого зерна. Многие ведущие производители комбайнов устанавливают такие датчики в заводском варианте, при их отсутствии комбайн может быть доукомплектован [3, 4, 5].

Не стали исключением и белорусские производители сельскохозяйственной техники. В 2018 г. прошел полевые испытания комбайн с датчиками урожайности, выпущенный белорусским предприятием «Гомсельмаш» [6]. Несмотря на то, что современное оборудование для перманентного картирования урожайности все чаще используется в сельскохозяйственном производстве, процесс полной модернизации может затянуться на несколько лет. Карты урожайности могут быть получены с использованием спутниковых снимков и рассчитанных на их основе вегетационных индексов [7]. В предыдущей работе [8] мы рассматривали связь вегетационного индекса и урожайности озимой пшеницы, нами было показано, что вегетационный индекс имеет значительную связь с массой убираемого зерна.

В ходе данной статьи перед нами стояла цель – оценить связь урожайности кукурузы и сои с данными вегетационного индекса, полученного с использованием спутниковой съемки за разные даты и, как следствие, за различные фенологические стадии анализируемых культур.

Связь вегетационного индекса кукурузы и сои с урожайностью была исследована рядом авторов. В работе, проведенной в США [9], ученые показали, что между вегетационными индексами и данными урожайности существует тесная связь при условии правильно подобранного интервала съемки. В ходе исследования с использованием статистических моделей им удалось объяснить 70 % урожайности культур. Успешная оценка вариативности урожайности сои была произведена в США с использованием данных съемки беспилотного летательного аппарата [10].

Еще одно исследование было проведено в Латинской Америке [11], в ходе которого авторы использовали данные в фенологическую фазу цветения кукурузы и данные урожайности на тестовых площадках, а также были получены высокие коэффициенты статистической связи.

Исследования связи вегетационных индексов, получаемых с использованием спутниковой съемки, и данных урожайности ведутся сравнительно недавно и их недостаточно, особенно для территории Республики Беларусь, это подтверждает актуальность заявленной темы исследования.

Основная часть

Объектом исследования были поля, засеянные кукурузой и соей, для которых мы располагали данными перманентного учета урожайности полученных с комбайнов в 2017 г. В общей сложности наше исследование было проведено на трех полях суммарной площадью 326 га в Минском районе.

Для исследования нам была доступна информация для двух засеянных кукурузой полей и одного поля, где выращивалась соя. Методы геоинформационных систем и обработки данных дистанционного зондирования земли были ключевыми при проведении нашего исследования. Для обработки полученной информации были использованы статистические методы.

NDVI [12] является одним из самых распространенных вегетационных индексов и рассчитывается как разность отражения ближнеинфракрасного и красного каналов, деленное на их сумму. Спектральный график здоровых растений имеет специфический вид и характеризуется провалом в красном диапазоне спектра и пиком в ближней инфракрасной области. Это объясняется физическими свойствами листьев растений. В итоге имеет место следующая закономерность: чем здоровее растение (т. е. имеет более высокое содержание хлорофилла и влаги в листьях), тем разница между красным и ближнем инфракрасным каналом будет выше. Верно и обратное утверждение: чем более растение угнетено и его биомасса меньше, тем меньше разница в указанных каналах.

Для написания работы были использованы данные спутника Sentinel 2, которые позволяют получать изображения вегетационного индекса с пространственным разрешением в 10 метров. Для нашего исследования было доступно 9 дат съемки, соответствующих разным фенологическим стадиям развития исследуемых культур.

Снимки каждой даты были обработаны с использованием геоинформационного программного обеспечения. Процесс обработки включал в себя атмосферную коррекцию, уточнение географической привязки изображений и расчёт вегетационного индекса NDVI.

Методика анализа данных включала в себя несколько этапов. На первом этапе данные урожайности сегментировались для целей выделения однородных зон с порогом варьирования урожайности не более 10 %. Далее в границах полученных зон высчитывался средний вегетационный индекс, значения которого использовались для анализа. Достоинством данного метода является то, что он существенно минимизирует ошибку, которая возникает в результате погрешностей при привязке космических изображений.

Кукуруза и соя имеют сравнительно поздние сроки посева, что объясняется их низкой устойчивостью к холоду. Данные культуры имеют свои особенности роста и развития, что хорошо видно на графике хода вегетационного индекса в течение вегетационного сезона (рис. 1).

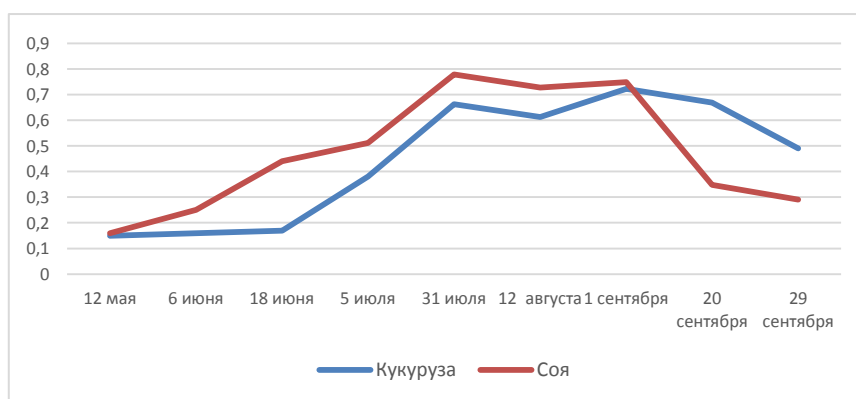


Рис. 1. Динамика вегетационного индекса исследуемых культур в течение вегетационного сезона 2017 г.

Динамика вегетационного индекса кукурузы имеет свои особенности. Для исследуемого поля 1к с момента всходов (29 апреля) и до фенологической стадии 5-й лист (18 июня) рост вегетационного индекса незначителен, это связано с тем, что проективное покрытие листьев растений увеличивается медленно. С 18 июня по 31 июля (фенологическая стадия 15-й лист) июля наблюдается активный рост вегетационного индекса, с появлением новых листьев у растений растёт проективное покрытие и к 31 июля приближается к 100 %. К 12 августа наблюдается снижение вегетационного индекса, что связано с наступлением фенологической стадии цветения метелки и изменением отражательной способности растений. К 1 сентября (цветение початка) наблюдается максимальный вегетационный индекс, далее начинается процесс формирования зерна, постепенное усыхание растений и, как следствие, снижение вегетационного индекса. Динамика вегетационного индекса сои имеет ряд особенностей. Его рост имеет более плавный характер, максимальный вегетационный индекс нами был зафиксирован 31 июля, в конце фенологической фазы ветвления. К 12 августа наблюдалась фаза цветения, и нами был зафиксировано некоторое снижение вегетационного индекса. К моменту наступления фенологической фазы плодообразования (1 сентября) вегетационный индекс увеличился и с формированием плодов он начал снижаться.

Данные перманентного учета урожайности, полученные с комбайнов, были сопоставлены с вегетационным индексом в программном комплексе Microsoft Excel.

Первое поле исследований 1к находится в Минском районе, на поле в 2017 г. произрастала кукуруза с датой сева 2 мая. В начале ноября кукуруза была убрана на зерно с использованием комбайна, оборудованного датчиками перманентного картирования урожайности. Средняя зафиксированная урожайность на поле составила 71 ц/га с диапазоном колебаний – от 10 до 145 ц/га (рис. 2).

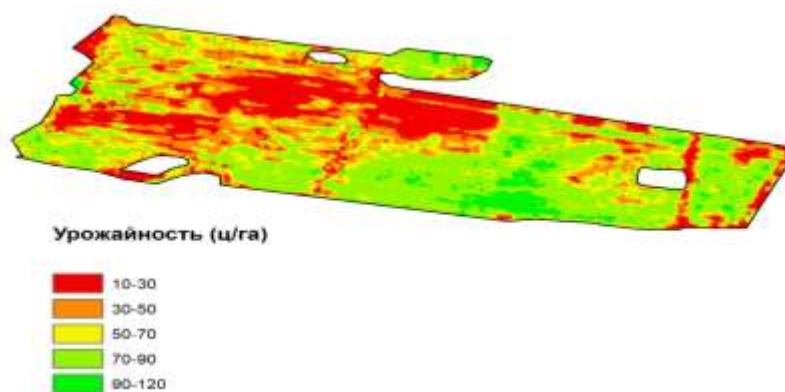


Рис 2. Карта урожайности на поле 1к

На поле представлены дерново-подзолистые автоморфные почвы суглинистого и супесчаного гранулометрического состава. Рельеф на поле сложный, с перепадом высот 17 м, для большей части поля характерен уклон до 2 градусов, но присутствуют участки с уклоном, превышающим это значение. На поле встречаются как выпуклые, так и вогнутые формы рельефа. Мы считаем, что именно рельеф является причиной столь значительной вариативности урожайности на поле, которая хорошо видна на рис. 2.

Спутниковый снимок за каждую из 9 дат был предварительно обработан и с использованием инструментов растровой алгебры был рассчитан вегетационный индекс NDVI. На следующем этапе значения вегетационного индекса были сопоставлены со значениями урожайности и рассчитан коэффициент детерминации, полученные значимые значения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Связь вегетационных индексов и урожайности кукурузы (поле 1к, количество обобщенных измерений –94

Дата	5 июля	31 июля	12 августа	1 сентября	20 сентября	29 сентября
Коэффициент детерминации (R^2)	0,81	0,91	0,86	0,81	0,83	0,61

До 5 июля не были зафиксированы значимые значения статистической связи. К 5 июля коэффициент детерминации составил 0,81, то есть с использованием спутниковой съемки на момент наступления фенологической фазы 9-й лист можно моделировать распределение урожайности на поле. К 31 июля (15-й лист) коэффициент детерминации достигает 0,90, другими словами, вегетационный индекс за указанную фенологическую фазу объясняет 90 % данных урожайности. Для дальнейших дат съемки степень связи постепенно снижается и к 29 сентября достигает 0,61.

Для лучшей визуализации данных на рис. 3 приводится распределение данных урожайности и соответствующих им данных вегетационного индекса NDVI за 31 июля. Из графика можно видеть, что между рядами данных прослеживается сильная корреляционная зависимость, что подтверждают высокие значения коэффициентов детерминации, и существует линейная регрессионная связь.

Следующее поле (2к), засеянное кукурузой, площадью 89 га находится в Минском районе в непосредственной близости от поля 1к и имеет дерново-подзолистые, супесчаного почвы. Рельеф на поле более выровненный, зафиксированные нами перепады высот находятся в диапазоне 13 метров, отмечаются места со значениями уклона свыше 2 градусов.

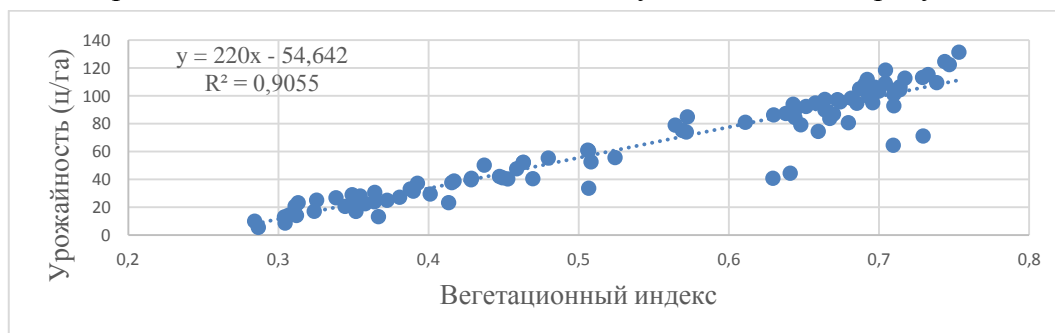


Рис. 3. Связь вегетационного индекса за 31 июля и данных урожайности кукурузы

Поле было засеяно в период 28–29 апреля. Зафиксированная урожайность варьирует в диапазоне от 40 до 115 ц/га, при среднем значении в 69 ц/га. Значения вегетационного индекса за каждую из тех же дат сопоставлены со значениями урожайности, существенные значения занесены в табл. 2.

Таблица 2. Связь вегетационных индексов и урожайности кукурузы (поле 2к, количество обобщенных измерений – 49)

Дата	5 июля	31 июля	12 августа	1 сентября	20 сентября
Коэффициент детерминации (R^2)	0,59	0,70	0,65	0,51	0,64

Как и для предыдущего поля, нам не удалось выявить значимых коэффициентов корреляции для дат до 5 июля (наступление фенологической фазы 9-й лист).

Для данных за 5 июля мы можем наблюдать значение коэффициента детерминации в 0,59, что уже достаточно для моделирования распределения урожайности на исследуемом поле. Максимальное значение статистической связи нами зафиксировано для фенологической фазы 15-й лист, оно объясняет 70 % массы получаемого зерна за счет вегетационного индекса. С 31 июля по 1 сентября коэффициент детерминации снижается и достигает 0,51 и к 20 сентября увеличивается до 0,64. Для 29 сентября значение коэффициента статистической связи не является значимым.

Регрессионное уравнение связи между данными вегетационного индекса за 31 июля и данными урожайности имеет вид:

$$y = 240,73x - 77,6,$$

где y – значение урожайности в ц/га, x – значение вегетационного индекса.

В целом для обоих полей наиболее высокие значения коэффициента детерминации были зафиксированы для фенологической стадии 15-й лист. Высокие его значения позволяют моделировать распределение урожайности в границах полей. Для поля 1к значения коэффициентов детерминации выше для всех исследуемых дат съемки, предположительно из-за большего диапазона варьирования урожайности на поле 1к.

Поле 1с в 2017 г. было засеяно соей. Мы решили рассмотреть данную культуру наряду с полями, засеянными кукурузой, потому что эти две культуры часто используются в двухпольном севообороте, особенно в западных странах. Соя на исследуемом поле была посеяна в период с 1 по 3 мая 2017 г. Средняя урожайность составила 18 ц/га, фиксировались участки крайне низкой урожайности – до 5 ц/га и участки высокой урожайности – свыше 25 ц/га.

Площадь поля составляет 60 га, почвы дерново-подзолистые супесчаные. Рельеф на поле волнистый, со средним уклоном 1,1 градус. Перепад высот в границах поля составляет 12 метров.

По рассчитанным коэффициентам детерминации (табл. 4) можно сделать вывод, что для сои значения статистической связи урожайности и вегетационного индекса существенно меньше, чем для кукурузы. В первую очередь мы связываем это с особенностью культуры. Максимальное значения коэффициента детерминации нами было обнаружено для данных за 1 сентября, в фазу плодообразования, для остальных дат значение коэффициента значительно ниже.

Таблица 4. Связь вегетационных индексов и урожайности сои (обобщенных измерений – 37)

Дата	5 июля	31 июля	12 августа	1 сентября	20 сентября
Коэффициент детерминации (R^2)	0,06	0,09	0,2	0,41	0,2

График распределения данных урожайности и значений вегетационного индекса за 1 сентября показывает, что для участков с урожайностью ниже 15 ц/га характерен низкий вегетационный индекс, для участков с урожайностью свыше 15 ц/га мы можем наблюдать значительный разброс NDVI, и существует линейная регрессионная связь.

Заключение

Данные, приведенные в статье, показывают, что урожайность кукурузы имеет высокую степень связи с вегетационным индексом, нами была выявлена фенологическая стадия развития растений, для которой уровень связи максимальный (15-й лист). С использованием

данных спутниковой съёмки в указанную фенологическую фазу можно с высокой степенью вероятности моделировать распределение данных урожайности в границах поля.

Нами было обнаружено, что для сои уровень связи значительно ниже, чем для кукурузы. Другими словами, уровень урожайности сои в меньшей степени связан со значением ее вегетационной массы, что в первую очередь может быть объяснено тем, что соя является бобовой культурой, у которых обычно урожайность семян слабо связана с величиной общей биомассы. Мы предполагаем, что участки со средним и высоким вегетационным индексом сои на момент наступления фенологической стадии плодообразования могут в итоге дать высокие значения убираемой массы зерна.

Несмотря на все недостатки использования вегетационного индекса для моделирования урожайности мы считаем, что его использование перспективно для получения информации в системах точного земледелия. Важно отметить, что данные вегетационного индекса показывают относительное распределение урожайности по полю. Для полей исследования, засеянных кукурузой, мы фиксировали линейный характер связи, и, зная среднее значение урожайности на рабочем участке, мы можем смоделировать абсолютное ее распределение. Для полей, засеянных соей, с использованием вегетационного индекса мы можем выделять только низкопродуктивные участки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бикбулатова, Г. Г. Технология точного земледелия / Г. Г. Бикбулатова // Омский научный вестник. – 2005. – № 2 (71). – С. 45–49.
2. Навигационные системы в сельском хозяйстве. Координатное земледелие / В. И. Балабанов [и др.]; под общ. ред. В. И. Балабанова. — М.: Из-во РГАУ –МСХА им. К. А. Тимирязева, 2013. –143 с.
3. Картирование урожайности комбайны Claas [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.claas.co.uk/products/easy/precision-farming/yield-mapping/yield-mapping-lexion-tucano>. – Дата доступа: 25.07.2018.
4. Картирование урожайности комбайны John Deere [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.deere.com/en/technology-products/precision-ag-technology/data-management/apex/>. – Дата доступа : 25.07.2018.
5. Системы мониторинга урожайности Trimble [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.trimble.com/Agriculture/yield-monitoring.aspx?tab=Product_Overview. – Дата доступа: 25.07.2018.
6. Мониторинг урожайности на комбайнах Гомсельмаш [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.gomselmash.by/press-tsentr/>. – Дата доступа : 25.07.2018.
7. Doraiswamy, P. C. Operational prediction of crop yields using modis data and products / P.C. Doraiswamy, B. Akhmedovb, L. Beardc, A. Sterna // Remote sensing support to crop yield forecast and area estimates XXXVI–8/W48 Workshop proceedings, Stresa, November 30 – December 1, 2006. – P. 137–141.
8. Генин, В. А. Моделирование урожайности озимой пшеницы по данным дистанционного зондирования земли / В. А. Генин, Н. В. Клебанович // Земледелие и защита растений. –2018. – №4 (119). – С. 24–32.
9. Zhang, M. Corn and soybean yield indicators using remotely sensed vegetation index / M. Zhang, M. O'Neill, P. Hendley, D. Drost, S. Ustin // Proceedings of the 3rd International Conference, Milan, 23–26 June. – P. 403–415.
10. Yang, C. Mapping Grain Sorghum Yield Variability Using Airborne Digital Videograph / C. Yang, G. L. Anderson // Precision Agriculture. – 2000. – Vol. 2, № 1. – P. 7–23.
11. Fernandez, Y. Maize crop yield estimation with remote sensing and empirical models / Y. Fernandez, J. Soria –Ruiz // Conference: IGARSS 2017, USA, 13–17 June. – P. 493–511.
12. NDVI – теория и практика [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://gis-lab.info/qa/ndvi.html>. – Дата доступа : 25.08.2018.