

МОДЕЛИРОВАНИЕ УРОЖАЕВ В СИСТЕМЕ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**Н.К. Вахонин**, кандидат технических наук

РУП «Институт мелиорация»

г. Минск, Беларусь

Ключевые слова: точное земледелие, модели урожая, водный режим почвы, удобрения, стахостичность

В публикациях по точному земледелию в большинстве случаев главное внимание уделяется новой дорогостоящей сельскохозяйственной технике дифференцированного внесения удобрений, средств защиты, определения урожайности по трассе комбайна и отбора проб, точности позиционирования с помощью установленных на ней GPS навигаторов. Однако практически не анализируется главная, интегрирующая составляющая - модель урожая, достоверность которой в конечном счете и определяет точность расчета оптимальных значений подлежащих внесению урожаеобразующих факторов, в итоге определяющих эффективность и действительную точность «точного земледелия».

Система принятия решений в конечном итоге является адекватной при согласованных уровнях точности самой модели, а также точности определения величины входящих в нее переменных и позиционирования точек их фиксации. При этом не имеет смысла увеличивать точность отдельной составляющей, т.к. конечная точность земледелия определяется точностью лимитирующей компоненты, которой в большинстве случаев является модель урожая.

Урожай сельскохозяйственных культур является функцией многих переменных: определяется зависимостью (системой уравнений), аргументами в которой являются различные параметры Π_i и переменные состояния X_j ряда процессов в среде обитания растений: почве и атмосфере, величина которых определяет изменение переменных состояния растений в течение периода вегетации и в результате величину продуктивно полезной биомассы в конечной точке траектории в момент уборки урожая и формально может быть записана:

$$Y = f(\vec{\Pi}_i, \vec{X}_j) \quad (1)$$

Аргументы, определяющие продуктивность культур, изменяются и в пространстве (от точки к точке севооборота, а также и по глубине корнеобитаемого слоя и высоте стебля), и во времени (на протяжении периода вегетации и по годам). В зависимости от характерного времени протекания изменений аргументы подразделяются на параметры (Π_i , $i = \dots, n$), имеющие практически неизменные на протяжении вегетации величины (рельеф полей севооборота, мощность пахотного слоя, тепло- и гидрофизические константы и т. п.), а также являющиеся функцией времени на протяжении периода вегетации переменные

состояния различных процессов (водного, пищевого, теплового, климатического, биологического режимов) в почве и атмосфере ($X_j(t)$, $j = 1 \dots m$).

Урожай конкретного года является интегралом по времени от этих аргументов за период вегетации. При этом изменение переменных состояния X_j в месте обитания растений само зависит от параметров и переменных состояния в других подсистемах (формирование водного режима почвы зависит от параметров и процессов динамики воды в мелиоративной сети), а также входных воздействий (погодно-климатических условий).

В соответствии с вышесказанным общую практическую задачу растениеводства можно сформулировать как проблему принятия решений – согласованного выбора альтернатив во всех подсистемах:

- в виде выращиваемых сельскохозяйственных культур (адаптивные стратегии приспособления к имеющимся условиям);

- в интенсивности их выращивания (активные, являющиеся, как правило, более затратными, но дающие большую отдачу стратегии по изменению природной среды под требования растений – выбор параметров и управлений при регулировании водного режима (тип и параметры мелиоративных систем);

- в химическом режиме (дозы удобрений, средства защиты растений и т. д.).

Они обеспечивают \max дохода и \min затрат при соблюдении ограничений по условиям охраны окружающей среды.

Особо подчеркнем, что в вышеприведенной постановке в качестве критериев оптимальности следует использовать экономические показатели доходов и затрат, а не урожай, часто принимаемый в качестве цели максимума, достижение которой не согласовано с экономическим оптимумом (так как может требовать больших затрат).

Отметим, что параметры и процессы, определяющие урожайность (концентрация питательных элементов, влажность, мехсостав почвы, рельеф, освещенность растений и т. п.) являются пространственно распределенными, то есть $P_i = f(x, y, z)$, $X_j = f(x, y, z, t)$, в результате чего пространственно распределенной (изменяющейся от точки к точке) является урожайность сельскохозяйственных культур.

Поэтому в строгой постановке урожай определяется как интеграл по некоторой площади (к примеру, поля севооборота) от урожайности элементарных участков (всех точек поля). Следует подчеркнуть, что чем более дифференцированно (с меньшим пространственным шагом) определяются и регулируются параметры и процессы, тем большая интегральная урожайность может быть получена. Однако в соответствии с выше сформулированными экономическими критериями эта дискретизация ограничивается возможными затратами, увеличение которых на сбор, переработку информации и более дифференцированную по площади реализацию найденных решений не должно превышать доходов от роста урожайности. Очевидно, что этот предел определяется эффективностью

используемых методов, способов сбора, хранения и переработки информации, точностью имеющихся моделей определения урожайности (информационные технологии), а также имеющейся технико-технологической базой (материальные технологии) для реализации рассчитанных параметров регулирования процессов выращивания сельскохозяйственных растений и технологически целесообразным уровнем пространственной дискретизации участков (размерами «точек» - хозяйство - поле – элементарный участок и т.п.), характеристики которых полагаются единообразными.

К примеру, выбор размера участков для размещения культур, наиболее адаптированных к комплексу их свойств, «разумно» ограничивается площадью, определяемой шириной захвата и длиной гона сельскохозяйственной техники.

При этом точность модели урожая, зависящая в том числе от применяемого уровня дискретности площадных участков, для которых находятся определяющие её аргументы, является ключевым звеном в «точности земледелия», а все более точное позиционирование с помощью GPS навигации, совершенствование и механизмов дифференцированного внесения факторов урожайности служит лишь техническим средством реализации этой «точности». Очевидно также, что помимо пространственной точности земледелия необходимо рассматривать и временную точность – подачу урожаеобразующих факторов в оптимальные сроки периода вегетации растений (к примеру, дробные подкормки, а не разовое внесение удобрений и т.п.). Поэтому необходима текущая диагностика состояния растений и почвы как традиционными наземными методами, так и на основе методов дистанционного зондирования (спектральная, гиперспектральная съемка и т.п.).

На «точность» земледелия особое влияние оказывает формирование водного режима, являющегося одним из важнейших урожаеобразующих факторов как на мелиорированных землях, так и на автоморфных, на которых он формируется в результате естественно складывающихся метеорологических условий.

Влияние водного режима на урожайность проявляется не только само по себе, но и за счет влияния на другие урожаеобразующие факторы, прежде всего на перенос элементов питания. В наибольшей степени это проявляется на землях со значительными уклонами, на которых в связи с поверхностным стоком происходит смыв элементов питания с возвышенных форм рельефа в понижения. Перемещение элементов питания по площади происходит также и с грунтовым стоком. В результате вышесказанного неравномерность распределения элементов питания по площади полей главным образом определяется процессами динамики воды. В связи с этим на склоновых и западных землях не целесообразно стремиться «выравнивать» содержание элементов питания посредством внесения дифференцированных доз удобрений, т.к. они неизбежно будут перемещаться водными потоками к подножьям склонов.

Получение зависимостей урожайности сельскохозяйственных культур от урожаеобразующих факторов может осуществляться двумя кардинально различающимися подходами:

– теоретическим, основывающимся на использовании феноменологических моделей физико-биохимических процессов метаболизма факторов жизни в отдельном растении во взаимосвязи с моделями взаимодействия сообщества растений с сорняками и вредителями на протяжении периода вегетации. Математический аппарат – уравнения математической физики: описание динамики факторов жизни растений (воды, воздуха, элементов питания и т.д.) во времени и пространстве уравнениями с распределенными параметрами (дифференциальные уравнения в частных производных), базирующиеся на физических законах сохранения массы и энергии.

– эмпирическим, основывающимся на формальной аппроксимации зависимости урожайности от урожаеобразующих факторов произвольно выбираемого вида функцией (алгебраические полиномы), в общем случае полиномы Чебышева, наиболее точно приближающей данные экспериментов по методу наименьших квадратов. Математический аппарат для получения нефизических регрессионных зависимостей – методы обработки экспериментальных данных, теория планирования эксперимента.

При сопоставлении этих двух методов необходимо учитывать следующие априорно очевидные принципы:

– в случае получения надежной зависимости (модели) по первому варианту она является, в рамках принятых допущений и упрощений используемых уравнений, действительной физико-биологической моделью формирования урожайности сельскохозяйственной культуры, представляемой сложной системой интегро-дифференциальных уравнений, описывающих все агро-физико-химико-биологические процессы метаболизма – нарастания полезной биомассы растения в результате воздействия урожаеобразующих факторов в течение периода вегетации.

– во втором случае следует понимать, что полученная эмпирическая зависимость при любом значении коэффициента детерминации не является действительной зависимостью урожайности (не имеет физического смысла), а представляет собой формальное сглаживание данных эксперимента.

Главными реальными факторами, предельно усложняющими возможность получения надежных зависимостей урожайности культур при теоретическом, и при эмпирическом подходах, являются [1]:

1) многофакторность урожайности и мультипликативный, а не аддитивный, характер влияния факторов на урожай;

2) большинство факторов не скалярные величины, а функции времени – переменные состояния процессов: водный, тепловой, пищевой, световой, химический режимы за период вегетации;

3) случайный характер входных воздействий (аргументов в зависимости урожайности) – осадков, температуры воздуха и т.п., каждый конкретный сценарий формирования которых определяет свой характер влияния на урожай других, управляемых урожаеобразующих факторов.

При наличии надежной феноменологической модели урожайности от определяющих аргументов, урожайность может быть рассчитана при любых сценариях метеофакторов: температур воздуха, осадков и т.д. Однако предсказание самих этих случайных аргументов с годичной заблаговременностью невозможно в принципе. Соответственно, невозможен чисто детерминированный прогноз урожайности даже при наличии достаточно надежной модели ее формирования, так как входные воздействия могут задаваться только стохастически, к примеру, методом Монте-Карло, или более упрощенно – их значениями некоторой произвольно принятой величины обеспеченности (50 %, 10 %, 1 % и т.п.). Т.е. модель урожайности неизбежно динамико-стохастическая, а соответственно, принятие решений по выбору интенсивности использования урожаяобразующих факторов является задачей в смешанных стратегиях, т.е. детерминированный прогноз величины урожайности конкретного года невозможен в связи с непрогнозируемостью величин соответствующих именно ему погодных условий.

Однако и само получение надежной детерминированной зависимости урожайности проблематично в связи с: необходимостью учета в модели множества плохо формализованных процессов, проблематичностью численной реализации таких многомерных задач, а также чрезвычайной сложностью идентификации множества входящих в модель коэффициентов, к тому же, как правило, нелинейно зависящих и от времени, и от искомой функции. Упрощение же модели за счет исключения или параметризации процессов приводит к значительному снижению точности. Основные процессы динамики воды, тепла, элементов питания оказывают существенное влияние на величину урожайности, оцениваемую исключительно экспертно, из эвристических соображений, а не расчетно. Однако вышеприведенные особенности формирования урожайности делают проблемным и получение надежных регрессионных зависимостей ее от множества факторов. По сути, регрессионная зависимость – нефизическая модель, использующая предельно параметризованные учитываемые факторы (типа черный ящик: входные воздействия – урожай).

Для решения реальных задач оптимизации растениеводства, выбора вида сельскохозяйственных культур и интенсивности применения их урожаяобразующих факторов модель обязательно должна быть многофакторной, так как при однофакторной обработке в действительности многофакторных, мультипликативно влияющих на урожайность процессов могут быть получены ложные выводы о виде этой зависимости и, в частности, об отсутствии влияния в действительности значимого фактора, реальное воздействие которого на урожайность проявляется при обработке с учетом влияния других значимых факторов.

Стохастичность аргументов: $T_{\text{возд}}$, осадков, УГВ по годам также требует увеличения числа экспериментов – набора статистики по годам.

Сложность связана также с тем, что влияние многих аргументов на урожай, к примеру, НУГВ, проявляется в виде функции времени за период вегетации.

$$Y_P = f \left(\int_0^{T_{\text{сез}}} H_{\text{УГВ}}(t) \times dt \right) \quad (2)$$

Для упрощения непрерывный от времени аргумент может разбиваться на дискретные промежутки времени с использованием соответствующих каждому из них статистических значений аргумента за период. Агрегирование во времени может осуществляться до суток – декад – месяцев – сезона в целом. Очевидно, что с увеличением периода осреднения аргумента (в частности неизбежного в связи с отсутствием достаточно большой многолетней протяженности экспериментов), основания надеяться получить надежную зависимость урожайности также убывают, как и при пространственном агрегировании сельскохозяйственных площадей.

В связи с отсутствием достаточно длинных рядов наблюдений за продуктивностью конкретных полей агропредприятий, получение для них надежных зависимостей урожайности является проблематичным. Поэтому можно согласиться с тем, что массовая закупка техники для осуществления точного земледелия для Беларуси в настоящих условиях не актуальна [2], а на первом этапе необходимо формирование автоматизированного информационного обеспечения. Это может быть осуществлено посредством повсеместного внедрения в агропредприятия разработанной на основе ГИС автоматизированной книги истории полей [3], многолетнее ведение которой превращает все производственные посевы в непрерывный эксперимент, обеспечивающий возможность получения зависимостей урожайности не по аналогии, а для каждого конкретного поля.

Библиографический список

1. Вахонин, Н. К. Концептуальные основы моделирования урожайности в системе принятия решений по регулированию водного режима / Н. К. Вахонин // Мелиорация. – 2014. – № 2 (72). – С. 7-15.
2. Шваб, Г. Точное земледелие: возможности для Беларуси / Г. Шваб, К. Аридт // Сейбит. – 2008. - С. 14-18.
3. Вахонин, Н.К. Книга истории полей как базисная компонента информационной системы агропредприятия для оптимизации хозяйствования / Н. К. Вахонин // Мелиорация переувлажненных земель. – 2007. – № 2 (58). – С. 17-25.

Summary

N. Vakhonin

YIELD MODELING IN THE SYSTEM OF PRECISION FARMING

This article presents some modes of yield modeling, in particular balance type and empirical type (regressive). The main components affecting the reliability of dependencies are analyzed. Its impact on accuracy of decision-making concerning the use of agricultural areas is examined.

Поступила 23.04.2015