

## ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В АГРОПРОИЗВОДСТВЕ

Вахонин Н.К.,  
 Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси

В отличие от социализма, когда оптимальные решения рассчитывались на уровне страны и доводились для реализации до уровня отдельных предприятий (очевидно, что если бы это были действительно оптимальные варианты, что нереально из-за большого размера задачи, то имел бы место идеальный вариант принятия решений), при рыночных отношениях планирование оптимального хозяйствования (бизнес-планирование) становится главной задачей каждого отдельного хозяйствующего субъекта. Совершенно очевидно, что при этом не снижается важность задачи планирования хозяйства в масштабах страны, а становится необходимым иерархическое, итеративное решение локальных и координирующей задач субъектами различного иерархического уровня, причем не всегда имеющими согласованные цели. В результате необходимость решения таких задач приобретает массовый характер. В связи с этим внедрение информационных технологий в создание систем оптимизации хозяйственных решений (бизнес-процессов) во всех сферах реальной экономики является важнейшим, обеспечивающим наибольшую отдачу от их использования направлением, фактически реализующим единственно возможный путь инновационного развития экономики (инновации — внедрение новых решений, эффективность которых может быть обеспечена только на основе многовариантных расчетов в сравнении с существовавшими решениями).

Наибольшую актуальность выбор обоснованных вариантов имеет в предметных областях с капиталоемкими решениями, в особенности при ограниченных ресурсах. Примером этого является сельскохозяйственное производство, все составляющие которого (обеспечивающие регулирование факторов жизни растений: питание (удобрения), водный режим (мелиоративные системы), а также техника, средства защиты растений и т.п.) являются энерго- и соответственно капиталоемкими, в связи с чем обоснованный выбор уровня их интенсивности из множества возможных вариантов дает наибольший эффект.

Система поддержки принятия решений в агропроизводстве включает в себя оптимизационно-имитационные модели для обеспечения вариантных расчетов всех компонент интенсивности производства и систему их информационного обеспечения.

В настоящее время принятие решений обычно основывается на отдельных расчетах и экспертных оценках, т.е. на «ручных» способах обработки информации. Новые сложившиеся экономические обстоятельства, современные возможности обработки информации требуют реинжиниринга всех составляющих принятия решений на основе системного подхода.

В наиболее общем случае, соответствующем необходимости регулирования водного режима для ведения растениеводства, в качестве целостной оптимизируемой системы (объекта в терминах объектно-ориентированного проектирования), неразрывно связанной единой системой целей и сложных цепочек взаимосвязанных процессов, выступает мелиорированный сельскохозяйственный объект (МСХО) (агропредприятие на мелиорированных землях), включающий взаимодействующие подсистемы: мелиоративная сеть, мелиорируемая почва, сельскохозяйственная растительность, изменяемая окружающая среда. В качестве надсистемы для него выступают природа и экономика, задающие входные воздействия.

Для выделенного объекта при любом иерархическом уровне его крупности (отдельное поле — хозяйство — район и т.д.) задача оптимизации может быть формализована в виде формул [1, 2]:

$$\begin{aligned} & \text{extr } \bar{\Phi}(y, a, u, r), \\ & a \in A, u \in U, W \in R_0^3; \end{aligned} \quad (1)$$

$$y(t) = F(z(t_0), N, a, u, \xi_t, t); \quad (2)$$

$$f(y, z, a, u, r) \leq \geq 0; \quad (3)$$

где  $\bar{\Phi}$  — вектор критериев;  $f$  — вектор-функция искусственных (экономических, экологических) ограничений;  $F$  — оператор функционирования системы, являющийся естественно-физическим ограничением системы;  $y(t)$  — вектор-функция выходных воздействий системы;  $z(t)$  — вектор-функция переменных состояния системы;  $\xi_t$  — вектор-функция входных воздействий за рассматриваемый промежуток времени функционирования системы ( $t = 0, T$ );  $a \in A$  — набор альтернатив во всех подсистемах МСХО;  $N$  — вектор нерегулируемых параметров системы;  $u$  — вектор-функция управлений системой;  $r$  — вектор ресурсов;  $W \in R_0^3$  — область трехмерного пространства, занимаемая системой.

В отличие от прежних подходов в рыночных условиях в качестве цели выступают не промежуточные показатели (водный режим, плодородие или урожай), а конечные цели более высокого экономико-экологического и социального иерархического уровня. Это приводит к необходимости перехода от расчетов отдельных подсистем с использованием целей функционального или технического уровня к согласованному выбору стратегий и альтернатив во всех подсистемах МСХО одновременно: типа, структуры, параметров мелиоративных систем и пропорций вложений в различные этапы их жизненного цикла (реконструкцию, контроль, управление, эксплуатацию), доз удобрений, средств защиты растений и их распределения по полям в соответствии с типами почв, видов и сортов культур, т.е. выбору севооборотов и интенсивности их выращивания, причем удовлетворяющих вектору целей: максимум доходов, минимум затрат, максимум охраны природы [1, 2]. Найденные таким образом согласованные одновременно по всем альтернативам, причем удовлетворяющие более общим экономико-экологическим целям решения в большинстве случаев будут принципиально отличаться от полагавшихся прежде «оптимальными» вариантов (дозы удобрений, водный режим, обеспечиваемый мелиорацией для получения максимального урожая, не согласованы с ориентированными на максимум прибыли).

При этом модель принятия решений значительно усложняется, так как в нее должны быть включены зависимости, описывающие воздействие на конечные цели всего комплекса выбираемых альтернатив в цепочке взаимосвязей: вариант структуры и параметров (тип и параметры мелиоративных систем, дозы удобрений и т.д.) — переменные состояния (водный, химический и другие режимы) во всех подсистемах (мелиоративная сеть, почва, растения) — выходные воздействия (урожай) — конечные цели (прибыль, охрана природы).

Следует отметить, что помимо альтернатив самих систем альтернативными являются и уравнения, используемые в оптимизационной модели для их выбора. При этом модель сама становится целеориентированной [1, 2] — оптимальной является та, которая удовлетворяет общим целям оптимизируемой системы, с учетом затрат на принятие решений, включая разработку модели, создание информационного обеспечения, и осуществление расчетов.

При оптимизации параметров в подсистеме мелиоративная сеть процессы динамики воды в грунте и водотоках могут описываться уравнениями различного типа: от эмпирических зависимостей типа «черного ящика», продолжая уравнениями с сосредоточенными параметрами и наиболее строгими, адекватными обычно имеющемуся уровню информационного обеспечения — уравнениями с распределенными параметрами (уравнениями Сен-Венана для мелиоративной сети и уравнениями Буссинеска для грунта). Дальнейшее усложнение уравнений в направлении еще более строгого описания процессов (например, использования для описания динамики воды в грунте уравнений влагопереноса или фильтрации двухкомпонентной водо-воздушной среды) не реально из-за сложности получения данных для их точного решения. Сбор информационного обеспечения является дорогостоящим, а для задач в сельском хозяйстве, связанных со случайными погодными-климатическими воздействиями, еще и требующим продолжительных лет проведения. В связи с этим оптимальная модель принятия решений зачастую определяется методом от противного — наличием уже имеющихся данных, необходимых для ее идентификации. В частности, это относится к наиболее проблемной составляющей задач оптимизации агропроизводства — уравнениям для определения величины урожаев, соответствующих водному режиму, рассчитанному для каждого из анализируемых вариантов параметров мелиоративной системы водного режима при различных дозах удобрений.

Строго теоретически модели продуктивности должны основываться на совместном решении уравнений нарастания биомассы отдельных растений с уравнениями, описывающими их взаимодействие между собой, а также с популяциями конкурентов, болезней и вредителей в зависимости

от рассчитанных для каждого анализируемого варианта пространственно распределенных характеристик воды, пищи, тепла и других факторов жизни в месте произрастания каждого из них.

Уже только модели нарастания биомассы, основанные на учете динамики потоков воды, пищи, первичных ассимиляторов и т.д. в растениях, фотосинтеза и распределения биомассы по органам растений [3, 4] требуют идентификации нескольких десятков параметров, наблюдение которых не ведется и является высокзатратным и долговременным. Аналогично модели согласованного уровня точности для других заведомо сильно влияющих составляющих (динамика популяций конкурентов, сорняков, вредителей и т.п.), без одновременного использования которых невозможно получение надежных решений, сами по себе являются не менее сложными и плохо идентифицируемыми. В результате этого использование феноменологических моделей урожаев для реальных задач сельскохозяйственного производства не представляется возможным.

В этих условиях в зависимости от наличия мониторинговых данных по урожаям и влияющим на них показателям могут подбираться различного типа эмпирические зависимости. Их можно отнести к типу «серый ящик», так как известны физические (биологические) предпосылки направленности процессов: многофакторность зависимости урожайности, неаддитивный, а также в большинстве случаев заведомо нелинейный характер влияния на нее аргументов (в связи с двухсторонним требованием растений к факторам жизни и по недостатку, и по избытку), различные характерные времена их влияния на урожай (температура при заморозках — часы, уровни грунтовых вод — декады и т.п.). При этом следует подчеркнуть, что получаемые таким образом зависимости по определению не являются моделями урожая как такового, а представляют формальную аппроксимацию результатов экспериментов произвольно принятым видом функции (алгебраический полином, экспонента и т.п. — в общем случае из полиномов Чебышева) и показателем ее степени, определяющим число требующих идентификации коэффициентов, а также метрики, используемой для оценки близости измеренных и расчетных значений и т.д., получаемую с сугубо прагматической целью — использования в оптимизационных расчетах. Проблемой является необходимость их получения с точностью, достаточной для надежного решения задачи оптимизации.

Биологически более обоснованными будут зависимости урожая при учете большего числа влияющих процессов, причем с учетом не аддитивного их влияния, включении их в модель не осредненно за вегетацию, а за все более мелкие дискреты времени, что, однако, лимитируется при получении эмпирических зависимостей количеством имеющихся для идентификации независимых экспериментов (лет наблюдений урожаев). Это связано с тем, что каждый введенный дополнительный аргумент — характеристика процесса или его дискретизация во времени, равно как и принятие аппроксимирующей функции с большим числом членов (показателем степени), а также предварительная кластеризация эмпирических данных по некоторому аргументу (аргументам) для последующего подбора функций на сгруппированных более однородных наборах данных, увеличивает число подлежащих определению неизвестных коэффициентов. Как правило, это приводит к лучшему сглаживанию (росту коэффициента детерминации), но снижению надежности полученных коэффициентов в связи с малым числом используемых в их расчетах имеющихся независимых экспериментов. Это приводит к необходимости апробировать зависимости, использующие в качестве аргументов вместо переменных состояния все более опосредованно влияющие показатели — параметры (к примеру, не изменяющиеся в период вегетации концентрации элементов питания в почве, а применяемые дозы удобрений), и далее все более упрощая зависимости, вплоть до конечных связей — производственных функций  $Доход = f(Затрат)$ .

Для исключения необходимости фиксации множества частных характеристик (тип почвы, водно-воздушный, агрохимический режим и т.п.) из прагматических соображений целесообразно получение зависимостей урожайности в агрегированном виде, для конкретных участков (клеток, полей севооборотов и т.д.), используя только многолетние данные по урожайности, причем в связи со стохастичностью погодно-климатических условий — в форме кривой вероятности урожайностей и прибыли от них по годам.

Очевидно, что сравнительная надежность различных зависимостей не может определяться их коэффициентами детерминации, а только внешними независимыми критериями с тестированием на независимых выборках, в конечном итоге должна оцениваться точностью достижения экономических целей при их использовании в принятии решений.

Все вышеуказанное для моделей урожайности относится к получению и сравнительному анализу зависимостей и других сложных многофакторных процессов на основе полученных в результате наблюдения данных (испарения, стока и т.д.).

Таким образом, очевидно, что система принятия решений требует осуществления множества типов вычислений с различными исходными данными: многовариантного расчета прямых прогнозных задач, обратных задач идентификации вида и параметров различных типов используемых зависимостей, задания стохастических входных воздействий и т. д. Причем с течением времени расчеты должны повторяться для оценки эффективности системы и при необходимости выбора новых альтернатив.

Для эффективной реализации этого требуется создание адекватной системы информационного обеспечения. Основой его является агромониторинг, задача которого именно так и может быть однозначно определена: информационное обеспечение принятия решений. При этом мониторинг является не самоцелью, а ориентирован на конечные цели самой оптимизируемой системы — обеспечение выбора максимально эффективных вариантов агропроизводства, причем с учетом в том числе и затрат на его осуществление.

В силу затратности агромониторинга выбор его состава, пространственно-временной частоты и продолжительности желательно осуществлять не под каждую конкретную задачу, а с максимально широким использованием для множества возможных задач. При этом по видам задач для различных этапов жизненного цикла МСХО мониторинг подразделяется на: исследовательский (для изучения процессов и синтеза новых зависимостей для их количественного описания), проектный (для оптимизации проектирования и планирования систем при их первоначальном создании и реконструкции-переспециализации), эксплуатационный (для выбора локальных управлений, ухода, контроля, диагностики). Это требует осуществления наблюдения характеристик, имеющих различные характерные времена протекания: структуры и параметров МСХО, переменных состояния (процессы в МСХО), входных воздействий (погодно-климатические показатели, цены), выходных переменных (урожаи), использование каждой из которых более эффективно при принятии решений на различных этапах жизненного цикла. При этом очевидно, что осуществление мониторинга изначально должно планироваться на хранение его результатов в автоматизированной системе, которая должна обеспечивать возможность формирования из них структур данных, необходимых для различных расчетов с использованием разрабатываемых специализированных моделей, а также стандартных статистических и других пакетов.

Важнейшей особенностью мониторинга любых показателей является то, что он осуществляется во времени в пространственно распределенных точках. Основную сущность информационной модели мониторинга составляют: виды измерений (что), места измерений (где), моменты времени измерений (когда) и результаты измерений, а так же чем они осуществлялись, кем производились, заносились и редактировались в информационной системе.

Таким образом, результат измерения любого показателя представляется ячейкой многомерной матрицы, причем каждая ось которой (вид, место, время) в свою очередь имеет многомерную иерархическую структуру (к примеру, время: год — месяц — день — час), к тому же с различными возможными вариантами представления (календарные годы, скользящие гидрологические годы и т.д.). Проблема формирования структур данных, необходимых для различных моделей, заключается в необходимости «проецирования» гиперкуба (в терминологии DATA mining) данных на обычно используемые в вычислительных моделях и базах данных таблицы двумерной структуры. Это приводит к необходимости избыточности хранимых данных.

При этом в используемых двумерных таблицах для обеспечения возможности последующего переструктурирования данных (транспонирование, сортировка и т.д.) должна быть обеспечена атомарность столбцов и строк, а также использование атомарных сущностей в именах столбцов.

В соответствии с тем, что определяющие эффективность агропроизводства и экологическое состояние мелиорированных земель процессы являются пространственно распределенными и изменяющимися во времени (на протяжении периода вегетации и по годам), информационная система агромониторинга реализована в виде пространственно-временной геореляционной базы данных [5], состоящей из разработанной специализированной базы данных временных рядов [6] и геоин-



формационной системы, дополненной разработанными утилитами, обеспечивающими связь с БД и реализующими другие необходимые для рассматриваемой задачи процедуры. Система реализует важнейшее требование к мониторингу — хранение данных непосредственно осуществляемых срочных и точечных замеров (первичных данных), так как их осреднение до ввода в систему ведет к потере информативности. Последующая генерализация исходных данных для различных типов задач обеспечивается процедурами агрегирования исходных замеров до любого необходимого уровня крупности в пространстве (точка — элементарный участок — осушаемый выдел — поле севооборота — хозяйство — район и т.д.) и времени (час — сутки — декада — месяц — период вегетации — год и т.д.). Реализованы процедуры и приложения для отображения данных мониторинга во всех возможных представлениях (табличном, графическом, функциональном), осуществления внутритабличных и межтабличных (межвидовых) операций.

Организационно система оптимизации агропроизводства и ее ядро — структура информационного обеспечения на основе комплексного мониторинга должны формироваться именно для субъектов непосредственно экономически мотивированных в ее использовании — хозяйств-землепользователей. Это не исключает создания информационных систем на обеспечивающих различные составляющие агропроизводства предприятиях (мелиорация, агрохимия и т.д.), но более узких по профилю их деятельности.

При этом в силу большой затратности проведения мониторинговых наблюдений создаваемая система — «автоматизированная книга агро-гидро-эколого-экономической истории полей хозяйства» — должна максимально задействовать уже имеющиеся массивы мониторинговых наблюдений, осуществляемых как самим хозяйством, так и другими организациями. Непосредственно самим хозяйством должен осуществляться мониторинг наиболее важной составляющей — урожайности культур, вносимых доз удобрений, средств защиты и других затрат по полям севооборотов. Этот не требующий больших затрат учет фактически ведется для бухгалтерности, но в силу отсутствия информационной системы теряется и не используется в последующих принятиях решений. Другие необходимые массивы информации должны получаться из различных ведомств, ведущих соответствующий мониторинг: данные по урожайности сортов системы сортоиспытания, погодно-климатические данные гидрометслужбы, данные по турам агрохимических и почвенных обследований агрохимслужбы, данные по мелиоративной сети и результатам проектных изысканий мелиоративных организаций, рельефно-картографические данные геодезических и мелиоративных организаций, интегрирование которых обеспечивается созданной системой мониторинга. Желательна типизация форматов структуры хранения данных этими организациями в соответствии с разработанной системой мониторинга. В условиях отсутствия этого для использования этих данных реализованы специальные процедуры конвертации, обеспечивающие автоматизированный ввод данных в разработанную систему.

Используя созданную систему, создано полномасштабное информационное обеспечение сельхозпредприятия на мелиорированных землях ОАО «Журавлиное» Пружанского района, включающее несколько десятков тематических слоев, более 10 млн данных по всем агро-гидро-экономико-экологическим показателям, на основе сбора и упорядочивания информации из выше упоминавшихся источников и специально проводимого мониторинга мелиорированных земель водосбора р. Ясельда на Пружанском стационаре.

Созданная система реализует возможность раздельного учета мелиорированных, немелиорированных и прилегающих земель и обеспечивает информационное решение разнообразных задач оценки эффективности агропроизводства, оптимизации сельхозиспользования и реконструкции мелиоративных систем в динамически изменяющихся экономических условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Вахонин Н.К. Системный подход в экологии больших мелиоративных систем // Мелиорация и экология: аспекты рационального использования водных и земельных ресурсов. — Мн.: БелНИИМиВХ, 1991. — С. 60–75.
2. Вахонин Н.К. Мониторинг как информационное обеспечение принятия экономико-экологически эффективных решений на мелиорированных землях // В кн.: Мелиорация переувлажненных земель: Сб. науч. работ БелНИИМиЛ, т. XLVIII. — Мн., 2001. — С. 61–81.

3. Ф.В.Г. Пеннинг де Фриз и соавт. Моделирование роста и продуктивности сельскохозяйственных культур. — Л.: Гидрометиздат, 1986. — 320 с.
4. Полевой А.Н. Прикладное моделирование и прогнозирование продуктивности посевов. — Л.: Гидрометиздат, 1988. — 319 с.
5. Вахонин Н.К. Георегиональная организация данных результатов мониторинга водосборов для принятия решений на немелиорированных землях // В кн.: Современные проблемы сельскохозяйственной мелиорации, БелНИИМиЛ. — Мн., 2001. — С. 41–50.
6. Вахонин Н.К., Сороговец Ю.В. База данных мониторинговых наблюдений для информационного обеспечения принятия решений // В кн.: Мелиорация переувлажненных земель: Сб. науч. работ БелНИИМиЛ НАН Беларуси, т. XLIX. — Мн., 2002. — С. 179–186.