

УДК 004.942

*Л.А. Хворова*

# **Оптимизация процесса структурно-параметрической идентификации моделей продуктивности агроэкосистем\***

*L.A. Khvorova*

## **Optimization of the Process of Structural and Parametric Identification of the Agroecosystems Productivity Models**

Рассматриваются теоретические аспекты формализации и оптимизации процедуры структурно-параметрической идентификации динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений методом двух критериев, которой позволяет разделить задачи идентификации на задачу параметрической идентификации отдельных блоков модели по точностным критериям и задачу структурно-параметрической идентификации модели по точности конечного результата.

**Ключевые слова:** агроэкосистема, идентификация, адаптация, структура, модель, продукционный процесс.

Theoretical aspects of the formalization and optimization procedures for structural and parametric identification of dynamic models of the production process of agricultural crops by two criteria are considered in this paper. Identification problem is separate into two problems: the problem of parametric identification of individual blocks using the accuracy criteria and the problem of structural-parametric identification of model that focuses on the accuracy of the final result.

**Key words:** agroecosystem, identification, adaptation, structure, models, production process.

Анализ обширной литературы по проблемам идентификации динамических систем и ее практическим приложениям [1–5] позволил выделить в развитии научного направления «идентификация систем» три уровня.

Первый, теоретический, уровень, или классическая теория идентификации [5], – это область теоретических исследований, в основном методологических и математических, нацеленных на создание фундаментальных основ теории идентификации автоматизированных систем, технологических процессов и на задачи их управления.

Второй уровень – теоретико-прикладные исследования, в процессе которых создаются и исследуются эталонные образцы применения результатов теоретических исследований первого уровня в процессе решения прикладных массовых задач [3].

В настоящее время формируются новые направления в теории идентификации систем, соответствующие третьему уровню [1, 2].

1. На первый план по актуальности выходят такие нетрадиционные для классической идентификации объекты управления, как социальные, экономические, экологические системы.

2. Формируется представление о структурной идентификации как особом типе научного исследования, где определяющую роль играют человек и имеющееся алгоритмическое обеспечение. В рамках научного направления «идентификация систем»

в России развивается неклассическая концепция структурной идентификации, ориентированная на создание необходимых условий для эффективного применения математических методов при решении прикладных задач.

Согласно новому неклассическому подходу идентификацией называется вся познавательная деятельность лица, принимающего решение, в результате которой создаются необходимые условия для практического использования формальных основ теории идентификации и управления при решении конкретных прикладных задач [1, 2].

3. Теория моделирования экологических, экономических и социальных систем развивалась параллельно теории идентификации автоматизированных систем. И к настоящему времени конкуренция идей моделирования процессов, происходящих в этих системах, сменилась на конкуренцию готовых моделей и их приложений к конкретным практическим задачам.

В области агроэкологических исследований продукционного процесса сельскохозяйственных растений к настоящему времени уже существует ряд моделей систем высокого уровня (AGROSIM, AGROTOOL, CERES, DSSAT, ELCROS, SIMCOT, SOYMOD, WOFOST), которые имеют свою специфическую структуру и реализуют конкретные цели разработчиков [4, 6]. Поэтому в период развитых информационных технологий, достаточного коли-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект №7.3975.2011 в Алтайском государственном университете).

чества разработанных информационных систем, информационных средств для принятия решений уже нет необходимости «с нуля» начинать конструирование (разработку) моделей. Этот постулат определил особенность третьего направления в теории идентификации – адаптация уже созданных моделей к целям исследования для решения конкретных прикладных задач.

Практика использования существующих моделей [7, 8] показывает, что, как правило, после проведения необходимой параметрической идентификации таких моделей по фактическим данным региона с помощью точностных критериев, результат не всегда оправдывает ожидания – остаются погрешности в конечном результате моделирования, которые устранить возможно только процедурой структурной идентификации, называемой в данной работе адаптивной идентификацией по точности конечного результата.

Вполне объяснимо, что полностью адаптировать любую разработанную уже модель к условиям других регионов достаточно сложно, во-первых, без участия самих разработчиков, во-вторых, цели пользователей могут не совпадать с целями разработчиков моделей, в-третьих, необходимое информационное обеспечение моделей может отличаться от той агрометеорологической информации, которой владеет пользователь. К причинам, побуждающим изменять существующую модель, можно также отнести, например, изменение требований к точности описания отдельных процессов, потребность в расширении круга решаемых задач. Поэтому в практике применения таких моделей возникают проблемы модификации структуры модели, отдельных ее блоков, включения в модель новых модулей, позволяющих реализовать практические цели пользователя, а также определения необходимой агрометеорологической информации и параметров, входящих в модель, прямые измерения которых в данных условиях невозможны или затруднены. Процесс решения данных проблем автор относит к процедуре *адаптивной структурно-параметрической идентификации*. Структурная и параметрическая идентификация динамических моделей продуктивности и их адаптация к конкретным почвенно-климатическим условиям являются главными условиями их применимости, а вопросы теории и техники идентификации моделей делают эту проблему актуальной.

Формализуем задачу структурно-параметрической идентификации моделей агроэкосистем [7] с целью оптимизации ее решения.

Рассмотрим класс моделей  $\mathfrak{Z} = (\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2, \dots, \mathfrak{Z}_m)$ , представляющих собой динамические балансовые структуры блочного типа и описывающих систему «почва – растение – атмосфера». Причем каждая  $\mathfrak{Z}_i = \mathfrak{Z}_i(X, S, P, \Sigma, L)$ , где  $x_i \in X$ ,  $i = \overline{1, n_x}$  – совокупность входных переменных;

$s_i \in S$ ,  $i = \overline{1, n_s}$  – совокупность переменных состояния модели;

$p_i \in P$ ,  $i = \overline{1, n_p}$  – совокупность параметров модели;

$\sigma_i \in \Sigma$ ,  $i = \overline{1, n_\sigma}$  – совокупность внутренних связей в модели между переменными – структура модели.

Функция  $L = \{L_1, \dots, L_{n_s}\}$  есть не что иное, как разрешающий оператор совокупности математических соотношений, позволяющих по заданным входам (совокупности внешних воздействий)  $x_i \in X$ ,  $i = \overline{1, n_x}$  с той или иной определенностью находить функции  $s_i \in S$ ,  $i = \overline{1, n_s}$  на интервале  $t_0 \leq t \leq t_n$ :

$$s_1(t+1) = L_1(x_1, \dots, x_{n_x}, s_1, \dots, s_{n_s}, p_1, \dots, p_{n_p}, \sigma_1, \dots, \sigma_{n_\sigma}, t),$$

$$s_{n_s}(t+1) = L_{n_s}(x_1, \dots, x_{n_x}, s_1, \dots, s_{n_s}, p_1, \dots, p_{n_p}, \sigma_1, \dots, \sigma_{n_\sigma}, t)$$

или в короткой записи

$$S(t+1) = L(X, S, P, \Sigma, t). \quad (1)$$

Зависимость (1) называется законом функционирования модельной системы  $\mathfrak{Z}$ .

Необходимо из класса моделей  $\mathfrak{Z} = (\mathfrak{Z}_1, \mathfrak{Z}_2, \dots, \mathfrak{Z}_m)$  выбрать модель  $\mathfrak{Z}_i \subset \mathfrak{Z}$  с законом функционирования  $L^*: (\mathfrak{Z}^0) \rightarrow \mathfrak{Z}_i$  (скобки обозначают, что  $L^*$  – частично определенное отображение, т.е. не все черты состава и структуры оригинала  $\mathfrak{Z}^0$  отражаются моделью) таким, что  $S(t+1) = L^*(X, S, P, \Sigma, t)$ . Функциональное преобразование  $L^*$  может быть выбрано из условия

$$\|S(t+1) - L^*(X, S, P, \Sigma, t)\| \rightarrow \min_{\substack{p_i \in P \\ \sigma_i \in \Sigma}} \quad (2)$$

в некотором пространстве выбранного класса функций  $L^*$  или чтобы минимизировать некоторый критерий рассогласования модельной системы и системы-оригинала (критерий качества модели):

$$\mathfrak{R}_L^* \rightarrow \min_{L \in \mathcal{L}}.$$

Выбор функционального преобразования  $L^*$  во многом субъективен и не поддается строгой формализации. Процесс определения структуры оператора модели  $L^*$ , т.е. выбор класса операторов  $L$ , в котором будет осуществляться поиск приемлемого оператора, называется структурной идентификацией. После определения структуры оператора  $L^*$ , т.е. его вида с точностью до коэффициентов  $p_i \in P$ ,  $i = \overline{1, n_p}$ , процесс идентификации сводится к оцениванию этих коэффициентов (параметров). Такая задача называется задачей параметрической идентификации.

Необходимость в описании представительного набора основных взаимодействующих абиотических и биотических процессов, обладающих различными временными и пространственными характеристиками, привела к декомпозиции моделируе-

мой системы, в результате чего модели этих систем представляют собой совокупность динамических модулей (блоков), взаимодействующих друг с другом, а компоненты вектора состояния непрерывно изменяются в процессе функционирования отдельного блока.

Динамика рассматриваемых процессов описывается линейными и нелинейными обыкновенными дифференциальными уравнениями или уравнениями в частных производных. Эти задачи могут быть представлены в виде:  $A\varphi = f$ , где  $\varphi$  и  $f$  – функции одной или двух переменных;  $A$  – дифференциальный оператор.

Решение  $\varphi(x, t)$  ищется в одно- или двумерной области  $G$ , на границе которой  $\gamma$  задаются краевые условия вида  $B\varphi = g$  и начальное условие  $\varphi_0 = q(x)$  (для нестационарных задач). В одномерном случае общий вид дифференциальных операторов  $A$  и  $B$  представляется следующим образом:

$$A\varphi = A_1 \frac{\partial A_2 \varphi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( A_3 \frac{\partial \varphi}{\partial x} - A_4 \varphi - A_5 \right) + A_6 \varphi; \quad (3)$$

$$B\varphi = B_1 \frac{\partial \varphi}{\partial x} + B_2 \varphi. \quad (4)$$

В зависимости от вида коэффициентов  $A_i$ ,  $i = \overline{1, 6}$ , и  $B_j$ ,  $j = \overline{1, 2}$  получают уравнения с переменными коэффициентами ( $A_i$ ,  $B_j$  – заданные функции от  $x$  и  $t$ ) или нелинейные уравнения ( $A_i$ ,  $B_j$  зависят от решения  $\varphi(x, t)$ ).

**Обоснование и выбор метода адаптивной структурно-параметрической идентификации.** Сложность одновременного нахождения оптимальных значений неизвестных параметров  $p_i \in P$ ,  $i = \overline{1, n_p}$ , моделей обусловлена как раз тем, что рассматриваемый класс моделей  $\mathfrak{Z}$  имеет блочную структуру, и выходные параметры (переменные состояния)  $s_i \in S$ ,  $i = \overline{1, n_s}$  моделей в общем случае могут быть получены только путем последовательного численного решения оптимизационных задач, которые не имеют аналитического выражения. Кроме того, необходимость в решении проблемы разработки оптимального алгоритма структурно-параметрической идентификации моделей связана с наличием в них при адаптации к условиям других регионов или других культур неустранимых погрешностей, возникающих из-за привлечения приближенных значений некоторых параметров, заимствованных из литературных источников, вследствие использования разработчиками триггерных схем в описании отдельных процессов модели, полуэмпирического или даже эмпирического описания части процессов, или полное отсутствие блока, принципиально важного для адекватного функционирования модели. В этой ситуации стандартные подходы к процедуре идентификации малоэффективны.

Решение поставленной задачи достигается в результате многоэтапной оптимизации процесса адап-

тивной структурно-параметрической идентификации методом двух критериев, которой позволяет разделить задачи идентификации.

**Задача I.** Параметрическая идентификация отдельных блоков модели по точностному критерию.

**Задача II.** Структурно-параметрическая идентификация модели по точности конечного результата.

Алгоритм метода двух критериев заключается в следующем.

Если существует вектор параметров  $P^*$  такой, что

$$|S(P^*) - S_{real}| \rightarrow \min_{P^* \in P}, \quad (5)$$

где  $S(P^*)$  – переменные состояния модели, зависящие от настраиваемых параметров  $P^*$ ;  $S_{real}$  – фактические значения переменных состояния, то критерием идентификации каждого блока модели, содержащего соответствующие переменные, является точностный критерий. Модельная система из состояния  $(X, S, P, \Sigma)$  переходит в состояние  $(X, S, P^*, \Sigma)$ .

Если такого вектора параметров  $P^*$ , при котором (5) выполняется для всех переменных состояния, не существует, то несовершенство модели может быть компенсировано модификацией ее структуры за счет включения в базовую модель моделей процессов, существенно влияющих на адекватное функционирование объекта моделирования, с целью достижения точности конечного результата. При этом осуществляется следующий переход состояний модельной системы:

$$(X, S, P, \Sigma) \rightarrow (X, S, P^1, \Sigma) \rightarrow (X, S, P^1, \Sigma^1) \rightarrow$$

$$\begin{array}{ccc} \text{по точностному критерию} & \text{по точности конечного результата} & \\ \rightarrow \dots \rightarrow (X, S, P^*, \Sigma^*) & & \end{array} \quad (6)$$

оптимальная модельная система

Таким образом, процедура построения оптимального алгоритма для проведения структурно-параметрической идентификации рассматриваемых моделей производственного процесса при их адаптации к конкретным почвенно-климатическим условиям согласно теории оптимизации больших систем должна содержать два концептуальных этапа, точнее – решаться по частям.

Принцип формального описания системы в виде модельной структуры (1) позволяет анализировать и оптимизировать процедуру структурно-параметрической идентификации. В рассматриваемом подходе совокупность связей  $\Sigma$  между входными переменными  $x_i \in X$ ,  $i = \overline{1, n_x}$ , и переменными состояниями  $s_i \in S$ ,  $i = \overline{1, n_s}$  не описывается в конкретной форме, так как это представляет определенные сложности (явные выражения для  $\Sigma = \Sigma(X, S, P, t)$  возможно выписать, если осуществлен выбор конкретной модели  $\mathfrak{Z}_i \subset \mathfrak{Z}$  с законом функционирования  $L$ ). Фрагмент описания в моделях процессов энерго- и массообмена представлен формулами (3)–(4). Полная же система представляет собой совместное решение

следующих задач: радиационного режима посева, аэродинамического режима посева, турбулентного тепло- и влагопереноса в посеве, водного транспорта в почвенно-растительном комплексе, теплового режима почв, переноса элементов питания (нитратов) в почвенно-растительном комплексе [4].

Структурно-параметрическая идентификация и адаптация выбранной модели – процесс итеративный, т.е. для получения наилучшей модельной структуры в общем случае будет построена последовательность модельных структур  $\mathfrak{Z}^*_1, \mathfrak{Z}^*_2, \dots, \mathfrak{Z}^*_k$ , принадлежащих классу моделей  $\mathfrak{Z}$ , и выбрана оптимальная модельная структура (6)  $\mathfrak{Z}^*_{\text{опт}}$  с оптимальным разрешающим оператором  $L^*_{\text{опт}} = \arg \min_{L_{\text{опт}} \in L} \mathfrak{R}$ , наилучшим образом удовлетворяющая

как целям исследования, так и наличию исходной информации для адаптации модели к конкретным условиям региона.

Рассмотрим решение задачи I на примере оптимизационной процедуры параметрической идентификации блока динамики влажности в почве модели AGROTOOL. За основу моделирования влагопереноса в почве принято уравнение Ричардса, объединяющее в себе уравнение материального баланса и закон Дарси для скорости движения влаги по почвенному профилю [4]:

$$\frac{\partial \theta(x, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k^w(P) \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} - 1 \right) - f(x, t), \quad (7)$$

где  $t$  – время;  $x$  – пространственная координата по направленной вертикально вниз оси, имеющей начало на границе почва – приземный слой атмосферы;  $\theta$  – объемная влажность почвы;  $P$  – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги;  $k^w(P)$  – функция влагопроводности (гидравлической проводимости) почвы;  $f(x, t)$  – функция стока, характеризующая скорость поглощения воды корнями. Для замыкания задачи к этому соотношению надо добавить начальные и граничные условия.

Начальное условие  $\theta(x, 0) = w(x)$  – это распределение воды по почвенному профилю в начале счета, которое должно быть измерено экспериментально или оценено исходя из тех или иных соображений.

Граничное условие на поверхности почвы (при  $x = 0$ ) записывается в виде

$$q(0, t) = \begin{cases} Pr, & \text{если } Pr > 0, \\ -Es, & \text{если } Pr = 0, \end{cases}$$

где  $Pr$  – величина атмосферных осадков, см/сут;  $Es$  – физическое испарение влаги в тех же единицах;  $q(0, t)$  – поток воды на верхней границе расчетного слоя почвы.

Граничное условие на нижней границе расчетного слоя ( $x = H_s$ ) при глубоком залегании грунтовых вод (5 м и ниже) в модели отражает то обстоятельство, что вода из расчетного слоя почвы может стекать в основном за счет гравитации:

$$\left. \frac{\partial P}{\partial x} \right|_{x=H_s} = 0.$$

Уравнение (7) описывает динамику влажности почвы и потенциала почвенной влаги, между которыми имеется однозначная связь. Эта связь задается так называемыми педотрансферными функциями [9], вид и параметры которых определяются в основном гранулометрическим составом почвы. Для каждого типа почвы должны быть определены значения следующих агрогидрологических характеристик: МГ – максимальная гигроскопичность почвы; ВЗ – влажность устойчивого завядания; НВ – наименьшая влагоемкость почвы; ПВ – полная влагоемкость почвы. С использованием этих характеристик определяются соответствующие параметры педотрансферных функций:

$$\theta(P) = \text{МГ} + \frac{\text{ПВ} - \text{МГ}}{1 + b(-P)^a}; \quad k^w(P) = Kf \cdot (-P)^C,$$

где  $\theta$  – объемная влажность почвы, см<sup>3</sup>/см<sup>3</sup>;  $P$  – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги, см вод. ст.;  $Kf$  – коэффициент фильтрации, см/сут;  $a, b$  и  $C$  – эмпирические параметры.

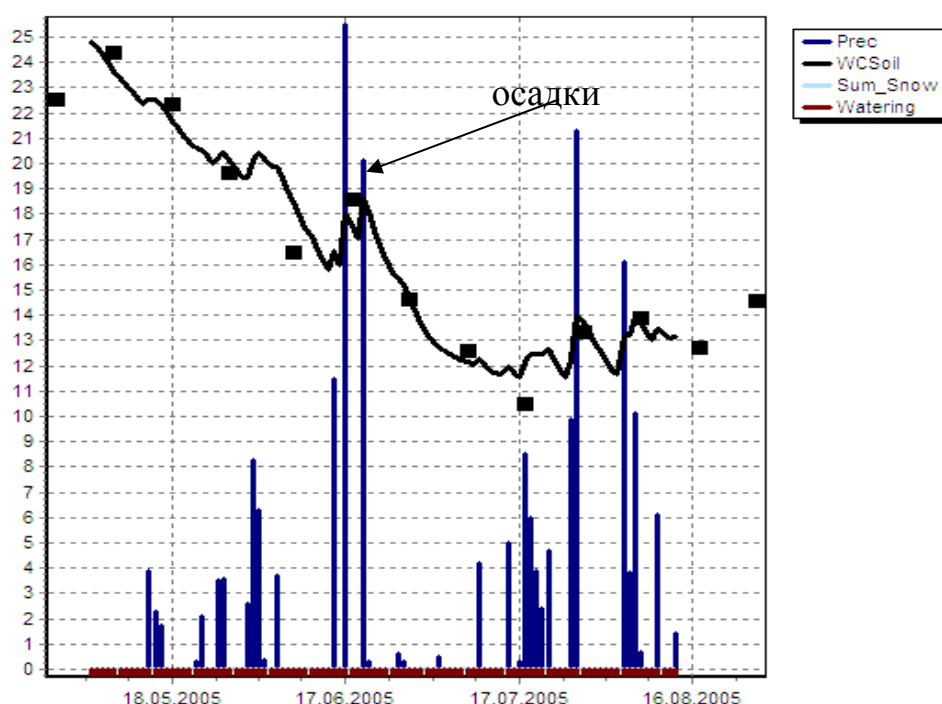
Первая функция представляет собой соотношение для кривой водоудерживающей способности почвы, а вторая выражает зависимость влагопроводности почвы от капиллярно-сорбционного потенциала почвенной влаги.

Для описания влагопереноса в почве в моделях, как правило, используется механистический подход, основанный на теоретических представлениях о динамике почвенной влаги. Поэтому этот блок не требует специальной настройки, а для определения конкретных параметров блока необходимо использовать только экспериментальные данные об агрофизических характеристиках почвенного покрова. Однако для определения функции влагопроводности требуется задать еще две величины – коэффициент фильтрации  $Kf$  и показатель степени  $C$ . Эти два параметра определяются в процессе идентификации в два этапа. На первом этапе накапливается статистика по динамике влагозапаса в метровом слое почвы в течение вегетационного периода системой поливариантных расчетов за несколько лет вегетации при помощи программ организации компьютерного эксперимента, а именно – значения  $W_{\text{soil}}(i, j)$ , где  $i = \overline{1, m}$  – номер года;  $m$  – общее число лет, за которые производится компьютерный эксперимент;  $j = \overline{1, k_i}$  – число фактических замеров влагозапаса в метровом слое почвы в течение  $m$  лет. Находятся предварительные интервалы изменения коэффициента фильтрации.

На втором этапе решается задача оптимизации оценок векторов  $Kf$  и  $C$ , исходя из условий минимизации вариации величин  $W_{\text{soil}}(i, j)$  для каждой даты замера влагозапаса в течение  $m$  лет:

$$V(Kf, C) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} (W_{\text{soil}}(i, j) - W_{\text{real}}(i, j))^2 \rightarrow \min_{Kf, C \in P}, \quad (8)$$

где  $W_{\text{real}}(i, j)$  – фактические значения влагозапаса.



Динамика влагозапасов в слое почвы 0–100 см под посевом яровой пшеницы (ОПХ им. Докучаева, 2005 г.): сплошная линия – влагозапас, рассчитанный по модели; ■ – экспериментальные значения

Для иллюстрации точности расчетов, достигнутых в результате оптимизационной процедуры (8), на рисунке представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных по динамике влагозапаса в метровом слое почвы под посевом яровой пшеницы в 2005 г. по имитационно-моделирующему комплексу AGROTOOL [4].

**Заключение.** Предложена концепция адаптивной структурно-параметрической идентификации динамических моделей продуктивности агроэко-

стем, ориентированная на создание необходимых условий для их эффективного применения в различных почвенно-климатических условиях при решении актуальных прикладных задач. Потенциальные возможности предлагаемого метода двух критериев апробированы при структурно-параметрической идентификации моделей EPIC [6, 7] и AGROTOOL [4, 8] при их адаптации к почвенно-климатическим условиям регионов Западной Сибири.

## Библиографический список

1. Гинсберг К.С. Неклассические задачи теории структурной идентификации // Идентификация систем и задачи управления: тр. междунар. конф. – М., 2000.
2. Гинсберг К.С. Основы системного моделирования реального процесса структурной идентификации // АиТ. – 1998. – №8.
3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М., 1991.
4. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. – СПб., 2006.
5. Современные методы идентификации систем / под ред. П. Эйкхофа. – М., 1983.
6. Williams J.R. The EPIC Model. U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, 1984.
7. Гавриловская Н.В., Хворова Л.А. Адаптивная идентификация структуры динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений // Известия АлтГУ. – 2010. – №1/2.
8. Хворова Л.А., Топаж А.Г. Построение моделей агроэкосистем и их адаптация к конкретным условиям // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – №1(115).
9. Шеин Е.В. Курс физики почв. – М., 2005.

