

Л.А. Хворова, Н.В. Гавриловская

Адаптивная идентификация структуры динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений*

L.A. Khvorova, N.V. Gavrilovskaya

Adaptive Identification of the Dynamic Models Structure of the Agricultural Plants Production Process

Впервые рассматривается алгоритм структурной идентификации динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений, позволяющий эффективно изменять структуру модели в процессе ее адаптации к конкретным почвенно-климатическим условиям региона.

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

For the first time describes the algorithm for structural identification of dynamic models of production process of agricultural plants, in order to effectively change the structure of the model in the process of its adaptation to specific soil and climatic conditions in the region.

Key words: identification, adaptation, structure, model, production process.

1. Предпосылки разработки методов и алгоритмов адаптивной идентификации. Постановка задачи. К настоящему времени уже разработано достаточно много моделей продуктивности агроэкосистем, которые имеют свою специфическую структуру, реализующую конкретные цели разработчиков [1–3]. Однако в существующих моделях ряд процессов, происходящих в агроэкосистеме, описан на полупэмпирическом (или даже эмпирическом) уровне. Кроме того, появляются новые экспериментальные факты, которые не нашли отражения в ранее созданных моделях. Это означает, что процесс совершенствования моделей является непрерывным и свидетельствует об актуальности темы исследования, посвященной вопросам идентификации и адаптации имитационных динамических моделей продукционного процесса.

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. Поэтому в практике применения таких моделей возникают проблемы модификации структуры модели, отдельных ее блоков, включения в модель новых блоков, позволяющих реализовать практические цели пользователя, а также определения необходи-

мой агрометеорологической информации и параметров, входящих в модель, прямые измерения которых в данных условиях невозможны или затруднены. Процесс решения данных проблем можно отнести к процедуре *адаптивной идентификации*.

Структурная и параметрическая идентификация динамических моделей продуктивности и их адаптация к конкретным почвенно-климатическим условиям – главное условие их применимости, а вопросы теории и техники идентификации моделей делают эту проблему актуальной.

Необходимо отметить, что классическая теория идентификации рассматривает в основном автоматизированные системы, технологические процессы и задачи управления ими. *Предмет теории идентификации* – решение задачи построения математических моделей динамических систем по данным наблюдений за их поведением [4].

Вопросы структурной идентификации моделей и адаптивной идентификации являются новыми для математического моделирования продуктивности агроэкосистем. Сформулируем основные отличия методов адаптивной идентификации и агроэкосистем от методов классической теории идентификации и автоматизированных динамических систем, соответственно.

1. В классической теории идентификации задача идентификации формулируется следующим образом [5]. Задан объект, в процессе нормального функционирования которого одновременно (синхронно) могут быть измерены его входная x и выходная y переменные. По результатам измерения $x(t)$ и $y(t)$ необходимо построить модель заданного объекта, т.е. найти оператор, ставящий в соответствие выходную $y(t)$ и входную $x(t)$ функции.

* Работа выполнена при финансовой поддержке ведомственно-аналитической программы «Развитие научного потенциала Высшей школы 2009–2010 гг.» (проект №2.2.2.4/4278).

При идентификации агросистем невозможна одновременная фиксация значений $x(t)$ и $y(t)$, где $x(t)$ – набор агрометеорологической информации, $y(t)$ – набор выходных характеристик (урожайность сельскохозяйственной культуры, характеристики роста и развития культуры, характеристики почвы и т.п.). Результаты могут быть получены по прошествии определенного периода времени (вегетационного периода, который для яровых зерновых культур составляет в среднем для условий Алтайского края четыре месяца). Здесь можно говорить о некотором начальном состоянии вектора входной информации $x_0(t)$ (например, на дату сева), который, в принципе, не является достаточно информативным для предсказания значения $y(t)$. На величину $y(t)$ влияют постоянно изменяющиеся значения вектора $x(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_m(t))$, где m – число различных агрометеорологических факторов. Причем на определенных временных этапах (этапах вегетационного периода сельскохозяйственных культур) значимость отдельных из них для результирующей величины y постоянно меняется.

2. Модель в понимании многих представителей классической теории идентификации – это уравнение (в основном регрессионное) или система линейных, нелинейных алгебраических или дифференциальных уравнений. Модель агроэкосистемы имеет более сложную структуру (структуру блочного типа), включающую в себя описания множества подсистем (рис. 1, 2), каждая из которых может быть описана подобным образом.

3. Различие в наборах входных данных (данных наблюдений). Если входные данные рассматриваемых в классической теории идентификации динамических систем можно представить в виде вполне обозримой матрицы небольшой размерности, то для качественной идентификации агроэкологических систем требуются многолетние ежедневные данные за 10–20 лет, содержащие агрометеорологическую информацию. То есть набор данных для идентификации агроэкосистем многомерен.

4. Особенностью функционирования моделей производственного процесса блочного типа является разделение информационных потоков на те, которые замыкаются внутри отдельных блоков, и те, которые передаются из блока в блок. Это обстоятельство, с одной стороны, обеспечивает простоту модификации блоков или их замену, а с другой – значительно усложняет процедуру выполнения этих операций (необходимые информационные потоки для других блоков не должны прерываться в результате модификации блока или его замены), а тем более комплексную адаптивную идентификацию структуры и параметров моделей к условиям конкретного региона.

5. Для идентификации автоматизированных систем и технологических процессов в классической

теории идентификации разработано достаточное количество методов и критериев оптимизации [4–9]: методы параметрического оценивания, непараметрические временные и частотные методы, рекуррентные методы и т.д. При решении же задачи структурной идентификации агроэкосистем и моделей их продуктивности исключительно важную роль играет человеческий фактор: интуиция и жизненный опыт исследователя [9].

6. Под *структурной идентификацией* будем понимать определение состава моделируемых процессов (совокупности внутренних связей и отношений, а также связей между агроэкосистемой и окружающей средой) и их параметрическую формализацию; под *адаптацией* – приспособление модели к новым условиям.

Содержание процесса идентификации в данном определении понимается значительно шире, чем построение математической модели объекта или процесса по априорной информации и апостериорным измерениям. Структурная идентификация агроэкосистем – это этап познавательной деятельности, связанной с поиском адекватной постановки прикладной задачи. В такой постановке задача идентификации является задачей научного познания различных объектов и явлений. Существенная особенность познавательных моделей заключается в том, что они обязательно должны отражать механизм объекта или явления в своей структуре, т.е. все причинно-следственные связи, имеющиеся у объекта и выявленные в процессе идентификации. В противном случае познавательная ценность модели существенно снижается.

7. Классическая теория идентификации в основном рассматривает тип задач, который связан непосредственно с потребностью управления объектом. Поэтому модель, созданная для целей управления, может и не отражать внутренних механизмов явления. Главное, чтобы она достаточно точно отражала качественные и количественные или только количественные соотношения между управляющими входными и управляемыми выходными, а также измеряемыми сигналами объекта в определенных условиях его функционирования. Математическое описание таких моделей строится по результатам исследования входных и выходных переменных объекта-оригинала, без учета его физической природы. В литературе по идентификации в основном рассматривается только этот класс моделей [4–9].

Необходимо отметить, что общих формальных подходов к решению задачи идентификации в широком смысле к настоящему времени не существует. Метод адаптивной идентификации моделей агросистем основан на рассогласовании между поведением реальной системы \mathfrak{Z}^0 и соответствующим поведением модельной системы с параметрами \mathfrak{Z} . Именно поэтому необходимо вводить в модель адаптирующие подмодели с целью вариации структуры модели и адекватного описания отдельных процессов, соответствующих, во-первых, целям

потенциальных пользователей и наличие необходимой агрометеорологической информации, а во-вторых, обеспечивающих качество идентификации и удовлетворительную величину погрешности.

Постановка задачи адаптивной идентификации. Рассмотрим класс моделей $\mathfrak{T}=(\mathfrak{T}_1, \mathfrak{T}_2, \dots, \mathfrak{T}_m)$, представляющих собой динамические балансовые структуры блочного типа и описывающих систему «почва–растение–атмосфера». Причем каждая $\mathfrak{T} = \mathfrak{T}(X, Y, \Sigma, F)$, где $x_i \in X, i = \overline{1, n_x}$ – совокупность входных воздействий на систему; $y_i \in Y, i = \overline{1, n_y}$ – совокупность выходных характеристик и переменных состояния системы; $\sigma_i \in \Sigma, i = \overline{1, n_\sigma}$ – структура системы, которая представляет собой множество математических соотношений, связывающих между собой входные переменные и переменные состояния модели:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \sigma_1(x_1, x_2, \dots, x_{n_x}, y_1, y_2, \dots, y_{n_y}), \\ \sigma_2 = \sigma_2(x_1, x_2, \dots, x_{n_x}, y_1, y_2, \dots, y_{n_y}), \\ \dots\dots\dots \\ \sigma_{n_\sigma} = \sigma_{n_\sigma}(x_1, x_2, \dots, x_{n_x}, y_1, y_2, \dots, y_{n_y}). \end{cases} \quad (1)$$

Функция $F = \{F_1, \dots, F_{n_y}\}$ есть не что иное, как разрешающий оператор совокупности математических соотношений (1), позволяющих по заданным входам $x_i \in X, i = \overline{1, n_x}$ с той или иной определенностью находить функции $y_i \in Y, i = \overline{1, n_y}$ на интервале $t_0 \leq t \leq t_n$:

$$\begin{aligned} y_1(t) &= F_1(x_1, \dots, x_{n_x}, y_1^0, \dots, y_{n_y}^0, t), \\ \dots\dots\dots \\ y_{n_y}(t) &= F_{n_y}(x_1, \dots, x_{n_x}, y_1^0, \dots, y_{n_y}^0, t) \end{aligned}$$

или в короткой записи

$$Y(t) = F(X, \Sigma, t), \quad (2)$$

удовлетворяющие уравнениям связи (1) и некоторым заданным начальным условиям $y_i(t_0) = y_i^0, \dots, y_{n_y}(t_0) = y_{n_y}^0$. Зависимость (2) называется законом функционирования модельной системы \mathfrak{T} .

Необходимо из класса моделей $\mathfrak{T} = (\mathfrak{T}_1, \mathfrak{T}_2, \dots, \mathfrak{T}_m)$ выбрать модель $\mathfrak{T}^* \subset \mathfrak{T}$ с законом функционирования $F^*: (\mathfrak{T}^0) \rightarrow \mathfrak{T}^*$ (скобки обозначают, что F^* – частично определенное отображение, т.е. не все черты состава и структуры оригинала \mathfrak{T}^0 отражаются моделью) таким, что $Y(t) = F^*(X, \Sigma, t) + \varepsilon$, ε – вектор погрешностей модели. Функциональное преобразование F^* может быть выбрано из условия $\|Y(t) - F^*(X, \Sigma, t)\| < \varepsilon^*$ в некотором пространстве выбранного класса функций F^* или чтобы минимизировать некоторый критерий рассогласования модельной системы и системы-оригинала (критерий качества модели): $\mathfrak{R}_F \xrightarrow{F^* \in F} \min$.

2. Анализ структурно-функционального строения моделей продуктивности. Независимо от целей и задач моделирования можно выделить основные блоки, которые в той или иной мере представлены в каждой модели (рис. 1).

1. *Блок погоды* – на основе исходных метеоданных вырабатывает параметры погодных условий, необходимые для работы других блоков.

2. *Блок водного режима* – рассчитывает водный режим почвы и растительного покрова, включая поглощение воды корнями и транспирацию растений.

3. *Блок теплового режима* – определяет температурный режим почвы, рассчитывает параметры, служащие исходной информацией для блоков водного режима, роста и развития растений.

4. *Блок роста и развития* – описывает прирост биомассы отдельных органов (как правило, за счет ассимилированного в процессе фотосинтеза углерода). При вычислении биомассы наземной части и корней определяется площадь листовой поверхности и поглощающей поверхности корня.

5. *Блок микроклимата* – вычисляет распределение температуры и влажности воздуха, ветра, радиации по высоте растительного покрова, профиль поглощаемой интегральной радиации и ФАР в зависимости от интенсивности приходящей радиации и архитектуры почвы.

6. *Блок питания* – обычно включает в себя модели динамики минеральных и органических веществ в почве, поглощение питательных веществ корнями растений.

Рассмотрим некоторые известные динамические имитационные модели.

Имитационная модель EPIC [3] – Erosion-Productivity Impact Calculator, разработана Техасской сельскохозяйственной научно-исследовательской лабораторией (США).

Модель состоит из десяти блоков: погода, гидрология, эрозия, питание, пестициды, температурный режим почвы, обработка земли, рост культуры, управление культурой и почвой, экономика (пакет бухгалтерского учета для вычисления затрат на посев и предполагаемой выручки).

Результаты тестирования модели биопроductивности EPIC показали, что параметрами, наиболее влияющими на биомассу растений, являются приходящая солнечная радиация, температура воздуха и почвы, осадки.

1. Тестирование блока радиации. Расчеты приходящей солнечной радиации проводились для Барнаула, Тобольска Тюменской области, Коченёво Новосибирской области. Наблюдаются существенные расхождения между экспериментальными данными и рассчитанными по EPIC. Изучение блока радиации модели EPIC показало, что при отсутствии экспериментальных данных (а данные по суммарной радиации измеряются не всеми метеостанциями) исходный блок модели EPIC позволяет найти только максимальную суммарную приходящую радиацию. При отсутствии данных по облачности

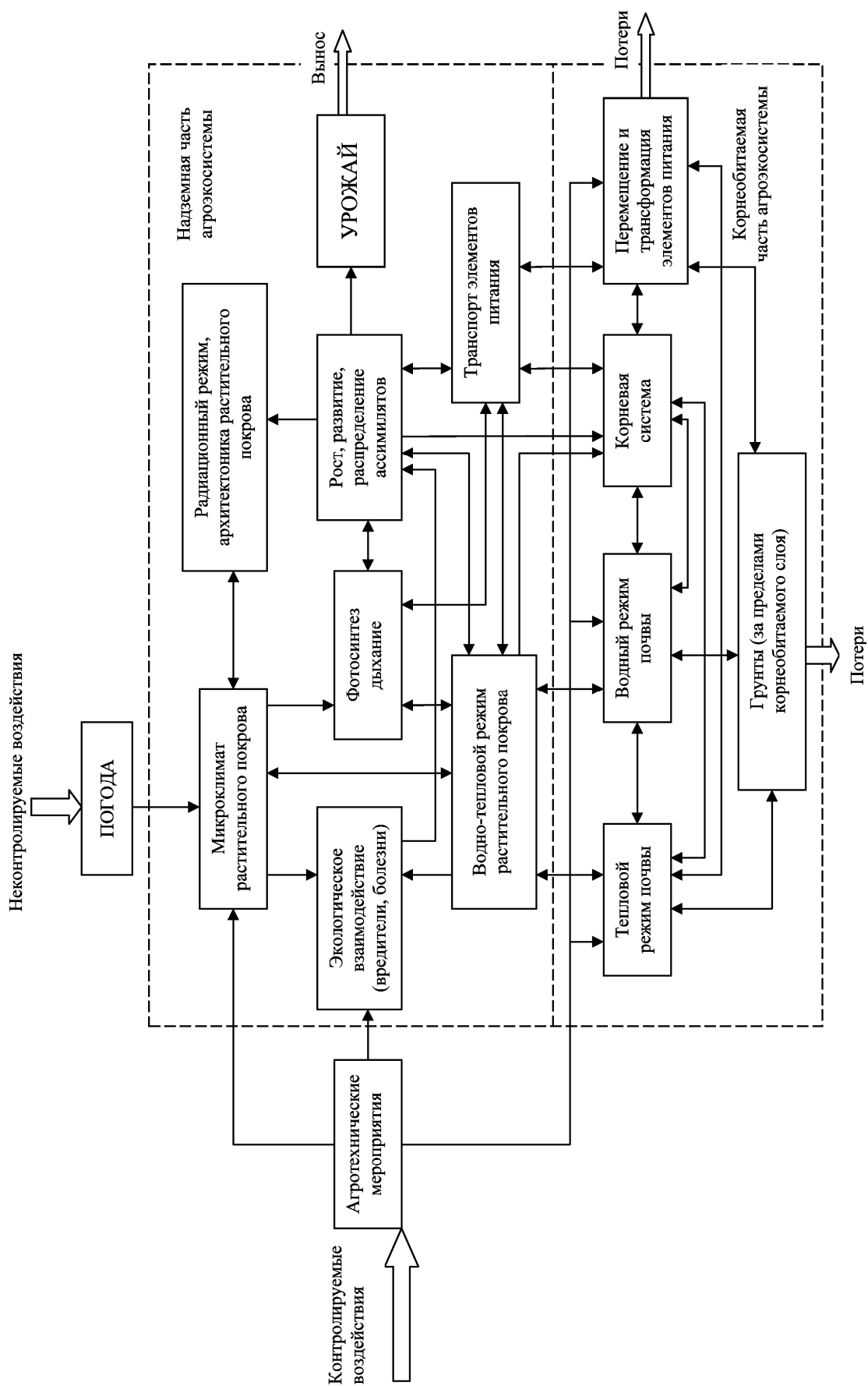


Рис. 1. Структурно-функциональная схема динамических моделей агроэкосистемы

или продолжительности солнечного сияния ослабление приходящей радиации производится следующим образом: если количество осадков больше нуля, то суммарная радиация уменьшается в два раза, что практически неверно и приводит к большим ошибкам в расчетах.

2. В модели большое влияние на рост и развитие растений оказывает температура на поверхности почвы, которая в блоках не рассчитывается. При ее отсутствии в экспериментальных данных происходит грубая замена смоделированными данными.

3. Содержание минеральных веществ в почве, в частности азота, не оказывает существенного влияния на величину биомассы.

При тестировании остальных блоков выявлен адекватный отклик модели на изменение параметров. Модель адекватно реагирует на стрессовые ситуации: недостаток или избыток влаги, низкую или высокую кислотность почвы, содержание гумуса в почве. В результате глобальных стрессов (засуха, переувлажнение) не происходит гибели растения, а лишь приостановка его развития. Величина урожая в модели зависит от сроков сева.

Исходя из вышесказанного можно сделать следующие выводы о применимости модели EPIC для прогноза урожайности на территории Западной Сибири.

1. EPIC предоставляет возможность проводить расчеты урожайности для различных сельскохозяйственных культур как по ежесуточным данным, так и по среднемесячным данным.

2. Адекватную реакцию на изменение агро- и метеофакторов показывают блоки роста растения, испарения, водного режима почвы.

3. Модель содержит большое количество параметров в блоках теплового режима почвы, непосредственное наблюдение за которыми приводит к существенным экономическим и временным затратам. А настройка этих параметров не позволяет добиться улучшений в расчетах.

4. В модели некорректно разработан блок радиационного режима, что приводит к большим погрешностям в расчетах при отсутствии экспериментальных данных по приходящей солнечной радиации.

Учитывая все вышесказанное, можно сделать вывод о том, что модель EPIC в «чистом» виде не может быть использована для прогноза урожайности на территории Западной Сибири. Однако она может послужить основой при разработке вычислительного комплекса прогнозирования урожайности. Для этого необходимо сохранить те блоки модели, которые хорошо идентифицируются на данных по Западной Сибири, и модифицировать блоки радиации, теплового режима почвы с использованием исследований радиационного режима атмосферы и теплового режима почвы.

Имитационная система AGROTOOL [1]. Основной системы является динамическая модель, которая описывает продукционный процесс полевых культур. Она имеет блочную структуру и включает описание процессов, имеющих место в системе «почва–растительный покров–приземный слой воздуха» (рис. 2).

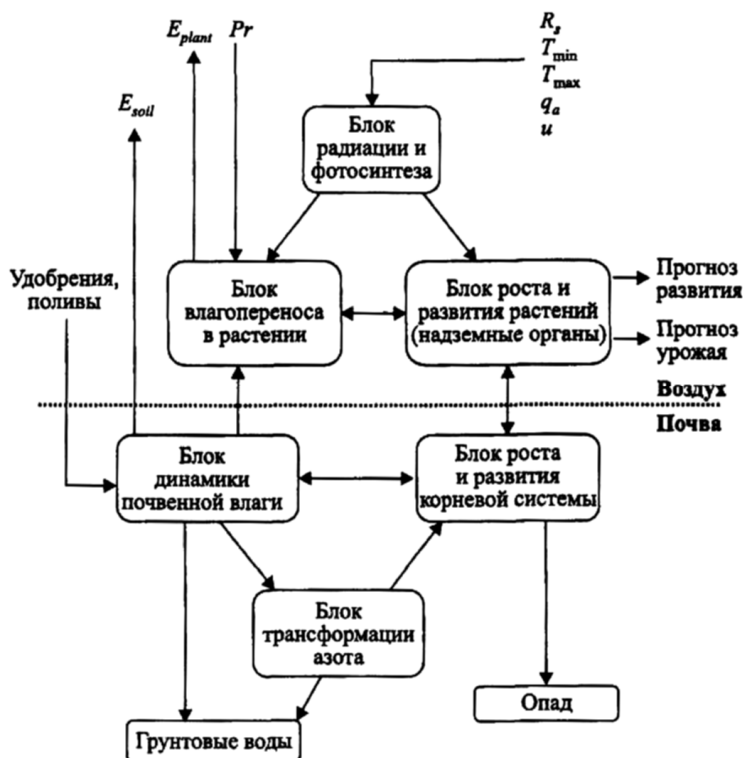


Рис. 2. Блок-схема модели AGROTOOL

Система AGROTOOL включает в себя собственно модель и управляющую программу. Вызываемая из оболочки модель производит расчет динамики формирования урожая, начиная с посева и заканчивая уборкой.

Существующие модели охватывают набор ограниченного состава культур и верифицированы лишь в отдельных локальных регионах страны. Возможно, проверки работы моделей на материале других локальных мест и подтвердили их адекватность и дали удовлетворительную точность, полной гарантии того, что модель сможет работать в любой географической точке страны, в настоящее время дать невозможно. Кроме того, возникает необходимость пополнения системы моделирования новыми культурами, а также учета особенностей сортов, районированных в разных почвенно-климатических зонах. Наконец, третья группа задач сводится к оценке влияния на динамику формирования урожая тех сопутствующих факторов, которые не отражены в модели. Это относится, например, к наличию сильного стока на полях (что не позволяет адекватно моделировать водный режим почвы), симбиотической фиксации атмосферного азота клубеньковыми тканями корней бобовых культур (что не позволяет учесть действие процесса азотфиксации на физиологию растений, плодородие почвы), влиянию сорняков, болезней и вредителей, которые объединяются понятием «фитосанитарное состояние посева».

3. Метод и алгоритмическая схема решения задачи адаптивной идентификации моделей.

1. Определение цели применения модели; конкретизация оперативных производственных задач, которые необходимо решить в процессе эксплуатации модели.

2. Выделение основных процессов в агроэкосистеме.

3. Выбор объекта идентификации – некоторой модельной системы \mathfrak{Z} (базовой модели).

4. Обоснование структуры информационного обеспечения модели, анализ доступных для решения задачи адаптивной идентификации структуры данных.

5. Проведение адаптивной структурно-параметрической идентификации модели согласно целям и задачам эксплуатации модели на основе имеющейся агрометеорологической информации. На данном этапе производится тестирование модели, делается вывод о возможности ее адаптации и применения в условиях региона, принимается решение об изменении структурно-функционального строения, определяется набор адаптирующих подмоделей, осуществляется их разработка и включение в базовую модель.

6. Оценка адекватности проведенной адаптивной структурно-параметрической идентификации модели.

Адаптивная идентификация структуры 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 $\mathfrak{Z}_{\text{опт}}^*$ с оптимальным разрешающим оператором $F_{\text{опт}}^* = \arg \min_{F_{\text{опт}}^* \in F} \mathfrak{R}$, наилучшим образом удов-

летворяющая целям исследования, наличию исходной информации для адаптации модели к конкретным условиям региона.

Заключение. Предложена концепция адаптивной идентификации структуры динамических моделей продуктивности агроэкосистем, ориентированная на создание необходимых условий для их эффективного применения в различных почвенно-климатических условиях при решении актуальных прикладных задач. Потенциальные возможности предлагаемого подхода апробированы при структурной идентификации моделей EPIC и AGROTOOL при их адаптации к почвенно-климатическим условиям регионов Западной Сибири.

Библиографический список

1. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур. СПб., 2006.
2. Penning de Vries F.W.T., Jensen D.M., ten Berge H.F.M., Baketa A.H. Simulation of ecophysiological processes of growth of several annual crops. – Wageningen, 1989.
3. Williams J.R. The EPIC Model / U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Temple, 1984.
4. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М., 1991.
5. Райбман Н.С. Что такое идентификация? – М., 1970.
6. Гроп Д. Методы идентификации систем. – М., 1979.
7. Современные методы идентификации систем / под ред. П. Эйкхоффа. – М., 1983.
8. Гинсберг К.С. Основы системного моделирования реального процесса структурной идентификации // АиТ. – 1998. – №8.
9. Гинсберг К.С. Неклассические задачи теории структурной идентификации // Идентификация систем и задачи управления: тр. междунар. конф. – М., 2000.