

ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТЬ МОДЕЛИ AGROTOOL: АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ, ПРОБЛЕМЫ, ВЫВОДЫ¹

Л. А. Хворова, К. А. Немчинова

ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный университет»

Рассматриваются задачи адаптации модели продуктивности *Agrotool* к условиям Алтайского края: идентификация параметров модели по агрометеорологическим данным региона и исследование чувствительности модели к вариациям начальных данных и точности задания параметров. Анализируются результаты идентификации блоков водного режима, фенологического развития и продуктивности посева. Осуществлено исследование чувствительности к почвенно-гидрологическим параметрам и к вариации начального состояния модели. Сформулированы критерии точности задания области допустимых значений параметров модели.

Адаптация модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур – это процесс ее приспособления к почвенно-климатическим условиям региона, особенностям роста и развития культуры при помощи методов и технологий структурно-параметрической идентификации с сохранением базовой части модели [4]. Адаптация может осуществляться и в результате накопления информации о процессах, происходящих в агроэкосистеме, с целью улучшения качества модели и/или повышения адекватности описания процессов с привлечением новых фундаментальных исследований и данных натурального эксперимента. В процессе адаптации могут изменяться параметры и структура модели, алгоритм ее функционирования, управляющие воздействия и т.п.

Модель *Agrotool* [4] разработана в лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ (г. Санкт-Петербург) и представляет собой динамическую балансовую структуру блочного типа, описывающую систему «почва – растение – атмосфера».

Пусть $S(t+1) = L(X, S, P, \Sigma, t)$ – закон функционирования модельной системы на интервале $t_0 \leq t \leq t_n$, $x_i \in X$, $i = \overline{1, n_x}$, – 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 между переменными в модели (структура модели). Функция $L = \{L_1, \dots, L_{n_s}\}$ – разрешающий оператор совокупности математических соотношений, позволяющий по заданным входам $x_i \in X$, $i = \overline{1, n_x}$, находить функции $s_i \in S$, $i = \overline{1, n_s}$.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Благотворительного Фонда В. Потанина

Задача *параметрической идентификации* сводится к оцениванию параметров $p_i \in P, i = \overline{1, n_p}$. Решение поставленной задачи достигается с помощью методов глобальной оптимизации [3] и заключается в следующем:

$$Z(P^*) = \min_{P \in D} |S(P) - S_{real}|, \quad (1)$$

где P^* – вектор оптимальных значений параметров, $S(P^*)$ – переменные состояния модели, S_{real} – фактические значения переменных состояния.

Проблема численного решения задачи оптимизации (1) сопряжена со значительной размерностью вектора идентифицируемых параметров модели P , многоэкстремальностью и недифференцируемостью целевой функции (1). В результате проведенного исследования построена оптимизационная процедура параметрической идентификации блоков модели: динамики влажности почвы, фенологического развития и продуктивности посева [1–4].

Ниже представлены результаты идентификации блоков модели.

1. Блок влагопереноса в почве. В основу модели влагопереноса в *Agrotool* положено уравнение Ричардса:

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

где t – время; x – пространственная координата; θ – объемная влажность почвы; P_s – капиллярно-сорбционный потенциал почвенной влаги; $k^w(P_s)$ – функция влагопроводности: $k^w(P_s) = Kf \cdot (-P_s)^C$, Kf – коэффициент фильтрации (см/сут), C – эмпирический параметр; $f(x, t)$ – функция стока.

Коэффициент фильтрации Kf и показатель степени C определяются в процессе идентификации при помощи методов глобальной оптимизации. Целевая функция (1) принимает вид (2):

$$Z_1(Kf, C) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} |(\theta_{soil}(i, j) - \theta_{real}(i, j))| \rightarrow \min_{Kf, C \in P}, \quad (2)$$

где $\theta_{real}(i, j)$ – фактические значения влагозапаса; $\theta_{soil}(i, j)$ – расчетные значения; $i = \overline{1, m}$ – номер года; m – общее число лет, в течение которых производится компьютерный эксперимент; $j = \overline{1, k_i}$ – число фактических замеров влагозапаса в почве в течение m лет.

При идентификации параметров блока динамики почвенной влаги было выявлено, что среди почв с текстурой суглинок средний и суглинок тяжелый выделены почвы с текстурой суглинок, что существенно повысило качество идентификации. В совокупности при идентификации блока динамики почвенной влаги было проведено более 2500 вариантов расчетов для различных типов почв. Для тяжелосуглинистых почв минимальная погрешность 5% достигнута при $K_f = 5,9$ и $C = 1,1$. График средней относительной погрешности приведен на рисунке 1.

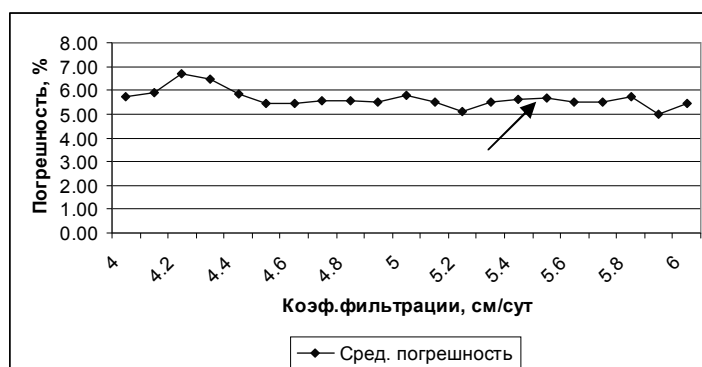


Рис. 1. График средней относительной погрешности вычисления запасов влаги в почве в зависимости от величины коэффициента фильтрации, $C = 1,1$ (суглинок тяжелый).

Для *суглинистых почв* минимальная погрешность составила 7% при оптимальных значениях $K_f = 61,2$ и $C = 1,4$. Для *среднесуглинистых почв* минимальная погрешность составила 8% при оптимальных значениях $K_f = 48$ и $C = 1,7$.

Определение допустимых границ изменения параметров блоков осуществлялось с помощью методов теории чувствительности [2]. Установлено, что для *тяжелосуглинистых почв* допустимый интервал изменения $K_f - (4,0-6,0)$; значения C оказывают существенное влияние не только на динамику влажности почвы, но и на величину урожая, и поэтому требования к величине C являются достаточно жесткими: $C = 1,1$. Аналогичная ситуация наблюдается и для *суглинистых почв*: $K_f - (40-65)$, $C = 1,4$, и для *среднесуглинистых почв*: $K_f - (40-50)$. Анализ на чувствительность модели осуществлен также относительно других гидрофизических параметров почвы и начального состояния модели.

2. Блок фенологического развития. Задачей данного блока является расчет так называемого «физиологического времени», измеряемого в градусоднях, и сроков наступления фенологических фаз.

При идентификации пороговых значений смены фаз развития определялось минимальное расхождение между расчетными и фактическими датами наступления фенофаз. Для нахождения минимальных расхождений между фактическими и модельными значениями биологических порогов составлена дополнительная таблица – расхождения в датах по всем годам. Фиксировались те значения биологических порогов, которые давали наименьшее расхождение (как в сторону ранних сроков, так и поздних). Разброс в сроках от -3 до $+3$ считается приемлемым. Это объясняется установленной процедурой фиксации сроков наступления фенологических фаз: на практике за полное наступление фазы принимается тот день, в который данная фаза наступает не менее чем у 50% учтенных растений. Поэтому, как следует из расчетных данных, определение биологических порогов для смены фаз развития можно признать достаточно качественным [1].

Оптимальный вариант содержит большие расхождения в четырех случаях из 88, поэтому результаты можно признать приемлемыми.

3. Идентификация блока продуктивности растений. Результатом окончательной идентификации параметров модели является величина урожай-

ности культуры, которая зависит от трех настраиваемых параметров. Оптимальные значения параметров определялись по минимальному расхождению между расчетными и фактическими значениями урожайности яровой пшеницы. Средняя относительная погрешность расчетной величины урожайности составила 12%.

По результатам проведенной идентификации можно сделать следующие *выводы*: блоки динамики почвенной влаги и фенологического развития модели *Agrotool* достаточно хорошо идентифицируются по данным региона. Блок продуктивности растений требует модификации. Необходимо осуществлять оценку урожайности в зависимости от типа почв и сорта культуры.

Численные эксперименты с использованием оптимизационных процедур поиска глобального минимума в задаче идентификации параметров модели и анализа на чувствительность позволили разработать критерии точности задания областей допустимых значений параметров и выявить особенности настройки параметров блоков модели.

Результаты проведенного исследования продемонстрировали эффективность описанного подхода и позволили дать высокую оценку применению модели *Agrotool* для прогноза урожайности зерновых культур в условиях Алтайского края.

Литература

1. Хворова Л. А. Идентификация параметров модели фенологического развития зерновых культур в условиях Алтайского края // *Обозрение прикладной и промышленной математики*. 2010. Т. 17. Вып. 3. С. 470–472.
2. Хворова Л. А. Методы исследования чувствительности моделей продуктивности агроэкосистем // *Известия АлтГУ*. 2013. № 1. С. 128–132.
3. Хворова Л. А. Оптимизация процесса структурно-параметрической идентификации моделей продуктивности агроэкосистем // *Известия АлтГУ*. 2012. № 1. С. 171–175.
4. Хворова Л. А., Топаж А. Г. Построение моделей агроэкосистем и их адаптация к конкретным условиям // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2011. № 1. С. 99–105.

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОДУКТИВНОСТИ ЯРОВОЙ ПШЕНИЦЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ НАБЛЮДАЕМЫХ И ОЖИДАЕМЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КЛИМАТА В СТЕПНОЙ ЗОНЕ РОССИИ И КАЗАХСТАНА

В. Н. Павлова, С. Е. Варчева

ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт сельскохозяйственной метеорологии»

Согласно прогностическим оценкам ФАО, для удовлетворения ожидаемого спроса средняя урожайность зерновых культур в мире должна возрасти к 2020 году с современных 2,9 до 5 тонн с гектара. В настоящее время средняя урожайность в большинстве стран азиатского региона не превышает 1,5 тонн зерна с гектара (Шиятый, Голиков, 2010).