

эрозионными и другими динамическими процессами. Согласно экспериментальной классификации типов фитоценозов на территории Алтайского края выделены следующие фитоценозы: водоемы (107,63 км²), травяной тип растительности (1115,49 км²), леса (225,055 км²), населённые пункты (508,82 км²). С помощью ArcGIS 10.2 вычислена площадь основных типов фитоценоза: хвойный лес (444, 25 км²), мелколиственный лес (69, 31 км²), травяной тип растительности (1429, 26 км²), Площадь населенных пунктов (63, 66 км²), Площадь водоёмов (26, 75 км²). Построена карта растительного покрова Третьяковского района и его отдельных структурно-функциональных характеристик масштаба 1:400 000.

Библиографический список

1. Базилевич Н.И. Почвы Алтайского края. – М., 1959. – С. 31–46.
2. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. – М.: Изд. Центр Академия, 2004. – 336 с.
3. Кравцова В.И. Космические методы исследования почв. – М.: Аспект Пресс, 2005. – 190 с.
4. Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. – М.: Аспект Пресс, 2004. – 184 с.

УДК 004.942

Теоретические и прикладные аспекты анализа динамических моделей продуктивности агроэкосистем на чувствительность

К.А. Немчикова
АлтГУ, г. Барнаул

Модель продукционного процесса сельскохозяйственных культур AGROTOOL разработана коллективом лаборатории математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ (г. Санкт-Петербург) и представляет собой динамическую балансовую структуру блочного типа, описывающую систему «почва – растение – атмосфера» [1, 2]. Модель прошла адаптацию во многих регионах России и за рубежом.

При переносе модели в различные почвенно-климатические условия требуется идентифицировать ряд параметров, характеризующих условия региона и особенности культуры [3, 4]. Не секрет, что значения многих параметров модели носят приближенный характер. Это связано с неточностью их измерения, использования приближенных значений, взятых из справочников или усредненных. Поэтому необходимым условием применимости модели, ее устойчивости к погрешности задания тех или иных параметров, является исследование чувствительности модели к вариациям входящих в нее параметров.

Методы исследования чувствительности и идентификации параметров динамических моделей

На практике такие модели реализуются в виде компьютерных программ с дискретным описанием (в виде системы конечно-разностных уравнений):

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

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; $y_i \in Y, i = \overline{1, n_y}$ – совокупность выходных переменных 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; $L = \{L_1, \dots, L_{n_s}\}$ – разрешающий оператор совокупности математических соотношений, позволяющих по заданным входам $x_i \in X, i = \overline{1, n_x}$, с той или иной определенностью находить функции $s_i \in S, i = \overline{1, n_s}$, на интервале $t_0 \leq t \leq t_n$.

Модель задается с помощью конечного набора численных характеристик, или параметров, которые, как уже отмечалось, не могут быть определены с достаточной степенью точности из знания физической природы системы. Поэтому для нахождения этих параметров приходится прибегать к процедурам оценивания. Такая задача называется *параметрической идентификацией*. В качестве критерия выступает суммарное рассогласование экспериментально полученных и расчетных данных [5–7]:

$$\xi(a) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{k_i} (s_{\text{mod}}(i, j) - s_{\text{real}}(i, j))^2 \rightarrow \min_a. \quad (2)$$

s_{mod} – расчетные значения вектора состояния модели, s_{real} – фактические данные вектора состояния модели, i – номер эксперимента, m – общее число экспериментов, j – порядковый номер фактических данных в эксперименте, k_i – число фактических данных в одном эксперименте.

Основная задача исследования – формулировка требований к точности задания тех или иных параметров модели. Для этого необходимо исследовать чувствительность модели к вариации данных параметров. В случае, если окажется, что выход модели слабо зависит от вариаций определенного параметра, его величина может быть оценена приближенно. С другой стороны, при высокой чувствительности модели к вариации некоторого параметра к его определению должны быть предъявлены повышенные требования [2].

Обозначим варьируемую составляющую вектора P через p , p^1 – неизменяемые параметры вектора P . Тогда соотношения (1) переписутся в виде:

$$\begin{aligned} S((k+1), p) &= L(X(k), S(k, p), Y(k), p^1, p, \Sigma, t), \\ S(0) &= S_0(p), k = 0, 1, \dots, T. \end{aligned} \quad (3)$$

Продифференцируем обе части равенства (3) по параметру p :

$$\begin{aligned} \frac{\partial S((k+1), p)}{\partial p} &= \frac{\partial L}{\partial S} \cdot \frac{\partial S(k, p)}{\partial p} + \frac{\partial L}{\partial p}, \\ \frac{\partial S(0)}{\partial p} &= \frac{\partial S_0}{\partial p}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $\frac{\partial L}{\partial S} = \left(\frac{\partial L_i}{\partial S_j} \right)_{i,j=1,\dots,n}$ – матрица размера $m \times n$; $\frac{\partial S}{\partial p}$, $\frac{\partial L(k, p)}{\partial p}$, $\frac{\partial S(0)}{\partial p}$ – n -мерные вектора.

Частные производные $\frac{\partial S(k, p)}{\partial p}$ носят название **функций чувствительности**. Введем обозначение $\frac{\partial S(k, p)}{\partial p} = v(k, p)$. Тогда (4) запишется в виде:

$$v(k+1, p) = \frac{\partial L}{\partial S} \cdot v(k, p) + \frac{\partial L}{\partial p}, \quad v(0, p) = \frac{\partial S_0}{\partial p}, \quad k=0, 1, \dots, T. \quad (5)$$

Соотношения (5) называются **уравнениями чувствительности**. В компьютерном эксперименте функции чувствительности могут быть получены при многократном прогоне модели при различных значениях варьируемого параметра. Поскольку мы исследуем чувствительность компьютерной версии модели, то производные в соотношении (5) могут быть заменены конечными приращениями, т.е. вместо $v(k, p)$ будут вычисляться величины, характеризующие относительные приращения:

$$\frac{\Delta s}{s_0} = R \frac{\Delta p}{p_0}. \quad (6)$$

s – произвольная характеристика посева или другая составляющая модели; s_0 и p_0 – базовые значения исследуемой переменной и параметра; Δp – вариация (приращение – положительное или отрицательное) параметра; Δs – изменение исследуемой величины, вызванное вариацией параметра p ; R – безразмерный коэффициент, характеризующий чувствительность.

Анализ чувствительности модели к входящим в нее параметрам осуществляется после процедуры параметрической идентификации модели к почвенно-климатическим условиям региона.

В результате проведенного исследования разработана оптимизационная процедура параметрической идентификации блоков модели AGROTOOL: динамики влажности почвы, фенологического развития и продуктивности посева, т.е. модель прошла стадию идентификации [8–10].

По результатам проведенной идентификации были сделаны 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.

Исследование чувствительности к почвенно-гидрологическим параметрам

Гидрофизические свойства почвы характеризуются параметрами, максимальной гигроскопичностью (МГ), влажностью завядания (ВЗ), наименьшей влагоемкостью (НВ) и влажностью насыщения (ПВ).

На рисунке 1 приведены результаты расчета динамики почвенной влаги при вариации наименьшей влагоемкости почвы. Данные на графиках относятся к модели яровой пшеницы (2002 год, АНИИСХ им. В.В. Докучаева, Алтайский край). Траектории соответствуют базовому значению НВ и значению, измененному на $\pm 10\%$.



Рисунок 1 – Влияние изменения НВ почвы на динамику влагозапаса: 1 – влагозапас при базовом значении НВ; 2 – влагозапас при НВ, увеличенной на 10%; 3 – влагозапас при НВ, уменьшенной на 10%

Из рисунка видно, что увеличение НВ приводит к росту влагозапасов в метровом слое почвы в начальный период вегетации, которое постепенно сглаживается к концу этого периода. Уменьшение этого параметра приводит к уменьшению влагозапасов в течение всего вегетационного периода.

При увеличении НВ заметно уменьшаются биомассы стеблей и зерна (рисунок 2). По результатам расчетов биомассы корней и листьев практически не изменяются.

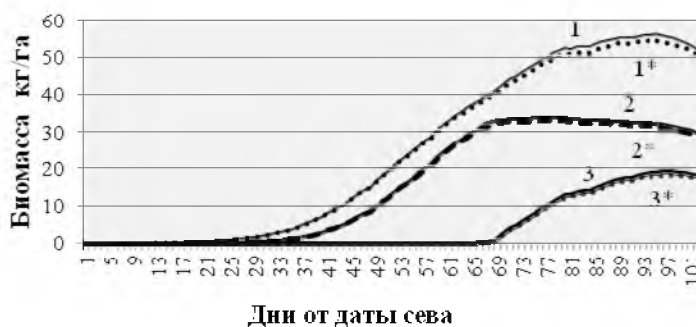


Рисунок 2 – Влияние величины НВ почвы на биомассу: 1 – суммарная биомасса; 2 – биомасса стеблей; 3 – биомасса зерна; * – биомасса, полученная при увеличении НВ на 10%

На рисунке 3 приведено влияние величины начального влагозапаса на урожайность.

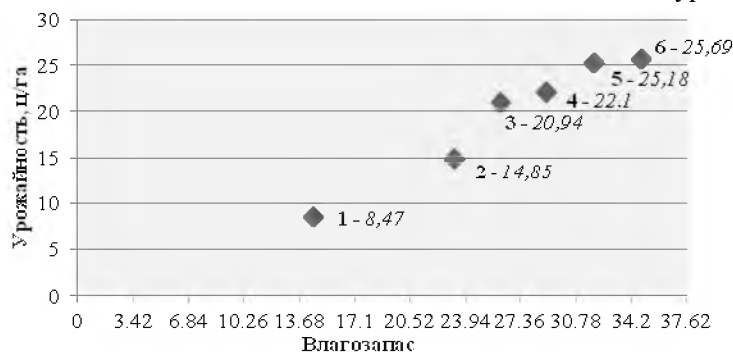


Рисунок 3 – Влияние величины начального влагозапаса на урожайность
Соответствие цифры на рисунке величине начального влагозапаса:
1 – 13,7 (урожайность 8,5 ц/га); 2 – 23,2 (урожайность 14,9 ц/га); и т.д.

Из рисунка следует, что увеличение начального влагозапаса положительно влияет на урожайность яровой пшеницы, что является, бесспорно, известным фактом и лишь подтверждает адекват-

ность модели. Но с другой стороны, погрешность в задании величины начального влагозапаса может привести к неверным прогнозным значениям величины урожая.

Исследование показало, что из всех почвенно-гидрофизических параметров наибольшее влияния на продуктивность яровой пшеницы оказывает параметр НВ. Это означает, что к экспериментальному определению параметра НВ необходимо предъявлять наиболее строгие требования.

Процедура анализа на чувствительность была осуществлена и к вариациям начальных значений параметров модели. На рисунке 4 приведено влияние даты сева на урожайность пшеницы. Практическая значимость данного исследования заключается в том, что по результатам исследования можно определить оптимальную дату сева с целью получения наивысшей урожайности в условиях региона.

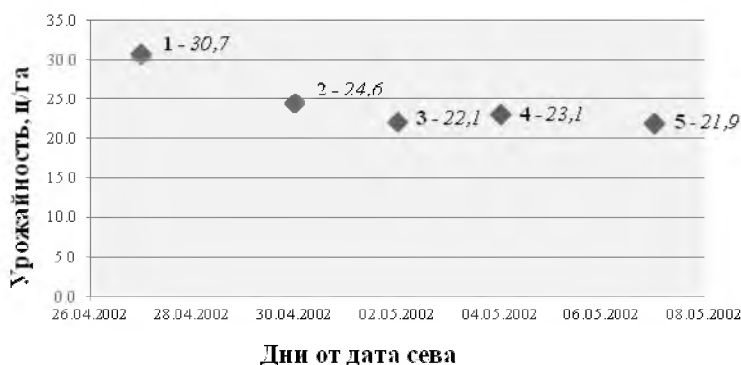


Рисунок 4 – Влияние даты сева на урожайность пшеницы (2002 г.).

Соответствие цифры на рисунке дате сева: 1 – 28.04 (урожайность 30,7 ц/га); 2 – 30.04 (урожайность 24,6 ц/га); и т.д.

Важной практической задачей в процедуре исследования чувствительности модели к вариации входящих в нее параметров является задача определения допустимых границ изменения параметров блоков. Для блока водного режима показано, что для тяжелосуглинистых почв допустимый интервал изменения K_f – (4,0–6,0); значения C не только сильно влияют на динамику влажности почвы, но и на величину урожая и поэтому требования к величине C достаточно жесткие: $C = 1,1$. Аналогичная ситуация наблюдается и для суглинистых почв: K_f – (50–65), $C = 1,4$ и для среднесуглинистых почв K_f – (40–50), $C = 1,7$. Для блока фенологического развития допустимой является погрешность в установлении факта смены фенофаз до двух – трех дней.

Библиографический список

1. Медведев С.А. Разработка и применение системы поливариантного анализа динамических моделей продукционного процесса культурных растений: дис. на соиск.уч.ст. к.с.-х.н. – СПб: АФИ, 2014. – 161 с.
2. Полуэктов Р.А., Топаж А.Г., Бакаленко Б.И. Информационное обеспечение модели. – СПб: АФИ, 2007. – 34 с.
3. Хворова Л.А., Гавриловская Н.В. Адаптивная идентификация структуры динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений // Известия Алтайского государственного университета. – 2010. – № 1/2. – С. 139–144.
4. Немчинова К.А., Хворова Л.А. Решение задачи параметрической идентификации динамических моделей продуктивности агроэкосистем // МАК-2014: сб. трудов XVII регион. конф. по математике. – Барнаул, 2014. – С. 126–133.
5. Хворова Л.А. Оптимизация процесса структурно-параметрической идентификации моделей продуктивности агроэкосистем // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. – № 1/1. – С. 171–175.
6. Немчинова К.А., Хворова Л.А. Идентифицируемость модели Agrootool: анализ результатов, проблемы, выводы // Математические модели в теоретической экологии и земледелии : матер. междунар. семинара. – СПб, 14–16 окт. 2014. – С. 16–19.
7. Хворова Л.А., Немчинова К.А., Ломиворотов Д.П. Поиск глобального минимума в задачах параметрической идентификации // Известия Алтайского государственного университета. – Барнаул, 2014. № 1/2 (81). – С. 130–134.
8. Немчинова К.А., Хворова Л.А. Адаптация модели продуктивности сельскохозяйственных культур AGROTOOL к условиям Алтайского Приобья // Информация и образование: границы коммуникаций. 2014. № 6(14). – С. 158–162.
9. Хворова Л.А. Адаптация моделей продуктивности сельскохозяйственных культур к условиям Западной Сибири // Теоретические и прикладные проблемы агропромышленного комплекса. – 2013. – № 2(15). – С. 24–27.
10. Хворова Л.А. Идентификация параметров модели фенологического развития зерновых культур к условиям Алтайского края // Обозрение прикладной и промышленной математики. – 2010. – Т. 17. – № 3. – С. 470–472.