

МОДЕЛЬНАЯ ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ВРЕМЕНИ ЦВЕТЕНИЯ ОБРАЗЦОВ СОИ

© 2018 г. Л.Ю. Новикова* **, И.В. Сеферова**, К.Н. Козлов*

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29

**Федеральный исследовательский центр Всероссийский институт генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова», 190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 42-44

E-mail: l.novikova@vir.nw.ru

Поступила в редакцию 20.07.18 г.

Разработаны регрессионная и имитационная модели цветения сои для девяти скороспелых образцов. На взаимодействия «генотип–среда» пришлось 6,3 и 15,9% вариабельности периодов «посев–всходы» и «всходы–цветение» соответственно. Имитационная модель регуляции развития температурными минимумами фенофаз подтвердила различия в скорости реакции сортов на изменения температуры. Ошибка аппроксимации модели ниже 10% говорит об адекватности модели и ее пригодности к прогнозированию.

Ключевые слова: климатические факторы, соя, нелинейная регрессия, грамматическая эволюция, имитационное моделирование.

DOI: 10.1134/S0006302918060170

Фенология интегрирует климато-биосферные взаимодействия и является индикатором изменений климата [1], на точности прогноза фенологии сои базируется точность прогноза ее урожайности [2]. Однако проблемой остается низкая точность фенологических моделей, обычными являются ошибки в две недели [3]. Стандартными методами моделирования фенологии являются расчет сумм температур выше температурного минимума и регрессионные модели [2,4,5]. Методом грамматической эволюции для девяти образцов нами была построена обобщенная модель изменения периодов «посев–всходы» и «всходы–цветение» под влиянием внешних факторов, показавшая более высокую точность, чем классические регрессионные методы [6]. Для повышения точности моделирования цветения было решено исследовать особенности индивидуальных образцов и применить методы имитационного моделирования. Решающим фактором регуляции фенологии периода «посев–цветение» оказался ход температурной кривой. Для сои известно, что разные фазы развития имеют разные температурные минимумы: прорастание – 5°C, всходы – 10–11°C, цветение – 15–18°C [7,8]. Нами была разработана имитационная модель регуляции развития растения системой температурных минимумов фенофаз [9].

Целью данного исследования было выявление различий реакции времени цветения сортов на изменение агроклиматических факторов методами грамматической эволюции и имитационного моделирования.

ОБРАЗЦЫ СОИ

Продолжительность межфазных периодов «посев–всходы» и «всходы–цветение» исследовали на опытном поле ВИР им. Н.И. Вавилова в г. Пушкине (Ленинградская область) в 1999–2013 гг. и на Кубанской опытной станции в 2004–2005 гг. для девяти скороспелых образцов различного происхождения (таблица). Варьирование сроков посева позволило расширить диапазон агроклиматических факторов и исследовать влияние длины дня.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВРЕМЕНИ МЕЖФАЗНЫХ ПЕРЕХОДОВ С УЧЕТОМ РАЗЛИЧИЙ ОБРАЗЦОВ

Модель строится как линейная комбинация N функций, построенная методом Лассо. Для определения зависимости влияния климатических факторов от образца вводятся бинарные переменные d_i^l , такие что $d_i^l = 1$, если растение i взято из образца l и $d_i^l = 0$ – в иных случаях.

$$y_i = \beta_0 + \sum_{n=0}^{N-1} \beta_{n+1} F_n(X_i) + \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{l=1}^L \zeta_{lN+n} F_n(X_i) d_l^i + \varepsilon_i,$$

где y_i – моделируемый фенотип, для каждого растения i , β_n – коэффициенты, X_i – вектор агроклиматических факторов и ε_i – стандартная ошибка. Регрессионные коэффициенты ζ_{lN+n} определяют влияние функции F_n на растения образца l . Аналитический вид функции, комбинацию признаков и коэффициенты определяли аналогично процедуре, описанной в работе [6].

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ЦВЕТЕНИЯ

Полученный коэффициент детерминации регрессионной модели 0,65 заставил искать альтернативные пути в виде имитационной модели цветения. Основные положения имитационной модели:

1. Состояние растения может быть описано температурой, к которой растение в данный момент наиболее адаптировано (T_{in}). Оно совпадает с температурой воздуха (T_{out}) при медленном изменении внешней температуры, но запаздывает при быстром росте.

2. В период «посев–цветение» скорость изменения T_{in} тем выше, чем больше состояние растения отстает от внешней температуры, т.е. чем больше разность ($T_{out} - T_{in}$), при константе q скорости реакции на повышение температуры. При понижении температуры развитие не может пойти обратно:

$$\begin{cases} \frac{dT_{in}}{dt} = q(T_{out} - T_{in}), T_{out} > T_{in}, \\ \frac{dT_{in}}{dt} = 0, T_{out} \leq T_{in}. \end{cases}$$

3. Началом очередной фенофазы считается моменты достижения T_{in} соответствующего температурного минимума T_{min} . Расчет выполняли с суточным шагом и останавливали при выполнении условия $T_{in} = T_{min}$. Ошибку аппроксимации модели вычисляли как модуль разности произведенного числа шагов и фактического количества дней «посев–цветение». Параметры модели подбирали минимизацией ошибки аппроксимации по обучающей выборке данных по ранним посевам в середине мая в г. Пушкине. Расчет производили полным перебором по сетке параметров T_{min} в диапазоне 10–25°C с шагом 1°C и величиной q от 0,01 до 0,05 с шагом 0,001. Тестирование проводили на данных посевов в конце мая. Расчеты проводили в программе Plant-TS [10], разработанной в среде Delphi 2.6.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Методом грамматической эволюции получены следующие зависимости длины периода «посев–всходы» $L_{п-в}$ и «всходы–цветение» $L_{в-ц}$ для совокупности 387 наблюдений:

$$\begin{aligned} L_{п-в} &= -0,64 \cdot (T_{10} - 5,86) - 0,08 \cdot P_{5п5} + \\ &+ 8,76 \cdot (1/(T_{10} - 1) + 2) - \\ &- 0,01 \cdot [\text{Fiskeby1040-4-2}] \cdot (T_{10} - 5,86) - \\ &- 0,01 \cdot [\text{Светлая}] \cdot (T_{10} - 5,86) - \\ &- 0,0008 \cdot [\text{Светлая}] \cdot P_{5п5} + 0,01 \cdot [\text{КГ20}] \cdot P_{5п5} - \\ &- 0,01 \cdot [\text{ПЭП2}] \cdot (T_{10} - 5,86) - 0,01 \cdot [\text{ПЭП18}] \cdot P_{5п5} + \\ &+ 0,01 \cdot [\text{ПЭП28}] \cdot P_{5п5}, R^2 = 0,65; \\ L_{в-ц} &= 0,38 \cdot (T_{20} + 2) + 0,06 / (D_{ц} - 0,34) - 0,3 \cdot P_{40} - \\ &- 3,36 \cdot (T_{40v} - 22,41) + 0,93 \cdot (T_{40v} + 2) + \\ &+ 0,14 \cdot [\text{Fiskeby1040-4-2}] \cdot (T_{20} + 2) + \\ &+ 0,18 \cdot [\text{Окская}] \cdot (T_{40v} + 1) - \\ &- 0,01 \cdot [\text{Светлая}] \cdot (T_{40v} + 1) + \\ &+ 0,38 \cdot [\text{Алтом}] \cdot (T_{40v} + 1) - 0,21 \cdot [\text{КГ20}] \cdot (T_{20} + 2) - \\ &- 0,78 \cdot [\text{КГ20}] \cdot P_{40} + 0,87 \cdot [\text{КГ20}] \cdot (T_{40v} + 1) + \\ &+ 0,05 \cdot [\text{ПЭП27}] \cdot (T_{20} + 2) - 0,52 \cdot [\text{ПЭП28}] \cdot (T_{20} + 2) + \\ &+ 0,43 \cdot [\text{ПЭП28}] \cdot (T_{40v} + 1), R^2 = 0,65, \end{aligned}$$

где $P_{5п5}$, P_{40} – среднее количество осадков за период 5 суток до и 5 суток после посева, 40 суток после посева; T_{10} , T_{20} – средняя температура за период 10 и 20 суток после посева; T_{40v} – средняя температура за период 40 суток после всходов; $D_{ц}$ – доля светлого времени суток в день цветения. Названия образцов в квадратных скобках обозначают переменные d .

Анализ выявил различия во влиянии температуры и количества осадков на длины периода «посев–всходы» и «всходы–цветение» для различных образцов. Сравнение суммы квадратов ошибок моделей без и с учетом взвешенной суммы попарных произведений функций влияния и бинарных переменных выявило, что на взаимодействия «генотип–среда» приходится 6,3 и 15,9% вариабельности периодов «посев–всходы» и «всходы–цветение» соответственно.

Для повышения точности прогнозирования была исследована возможность имитационного подхода к моделированию цветения.

Имитационная модель была построена для периода «посев–цветение», так как температуры посевов и всходов в основном превышали соответствующие температурные минимумы. Начальное состояние растений в момент посадки описывалось температурным минимумом прорастания 5°C. Полученные температурные минимумы цветения составили 15–17°C, скорости

Параметры модели для исследованных сортов сои

Образец	T_{\min} , °C	q , сут ⁻¹	Ошибка аппроксимации, сут	Ошибка прогноза, сут	Ошибка прогноза, %
ПЭП 28	16	0,039	3,6	4,0	8,7
Светлая	15	0,033	3,7	3,9	8,6
ПЭП 2	16	0,044	2,8	4,1	5,3
ПЭП 18	16	0,044	2,8	5,9	4,9
ПЭП 27	16	0,039	3,1	3,9	5,0
Fiskeby 1040-4-2	16	0,038	3,0	3,6	4,7
Окская	16	0,037	2,3	5,6	6,7
Алтом	16	0,033	2,0	8,0	7,1
KG-20	17	0,049	6,5	7,4	10,0
Среднее значение				5,2	6,8

Примечание. T_{\min} – температурный минимум цветения, q – скорость реакции на повышение температуры.

реакции на рост температуры – 0,033–0,049 сут⁻¹ (см. таблицу).

Ошибка аппроксимации модели составила 2–7 суток, валидации – 4–8 суток, или 4,7–10,0%, что говорит об адекватности модели и ее пригодности к прогнозированию. Наблюдалось различие сортов по температурным минимумам. Большинство образцов имели температурный минимум цветения 16°C, ранний сорт Светлая – 15°C, более поздний сорт KG-20 – 17°C. Наименьшую точность имели модели наиболее позднего из исследованных сорта KG-20, возможно, из-за его зависимости от множества факторов, как показал метод грамматической эволюции.

ВЫВОДЫ

Метод грамматической эволюции позволил построить индивидуальные модели для девяти исследованных образцов сои. Выявлена различная чувствительность образцов к разным факторам среды. Рассчитано, что на взаимодействия «генотип–среда» приходится 6,3 и 15,9% варибельности периодов «посев–всходы» и «всходы–цветение» соответственно.

Построенная имитационная модель регуляции развития температурными минимумами фенофаз подтвердила различия в скорости реакции сортов на изменения температуры и выявила различия в температурных минимумах начала цветения в диапазоне 15–17°C. Ошибка аппроксимации модели составила 2–7 суток, валидации – 4–8 суток, или 4,7–10,0%, что го-

ворит об адекватности модели и ее пригодности к прогнозированию.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы (проект № 14.575.21.0136). Вычисления были проведены в Суперкомпьютерном центре «Политехнический» СПбПУ и кластере Университета Южной Калифорнии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. T. Morissette, A. D. Richardson, A. K. Knapp, et al., *Frontiers in ecology and the environment* 7 (5), 253 (2009).
2. P. Pedersen, K. J. Boote, J. W. Jones, and J. G. Lauer, *Agron. J.* 96, 556 (2004).
3. A. D. Richardson, R. S. Anderson, M. A. Arain, et al., *Global Change Biology* 18, 566 (2012).
4. T. D. Setiyono, A. Weiss, J. E. Specht, et al., *Agronomy & Horticulture – Faculty Publications*. <http://digitalcommons.unl.edu/agronomyfacpub/112> (2007).
5. D. J. Major, D. R. Johnson, J. W. Tanner, and I. C. Anderson, *Crop Sci.* 15, 174 (1975).
6. K. N. Kozlov, L. Yu. Novikova, I. V. Seferova, and M. G. Samsonova, *Biophysics* 63 (1), 136 (2018).
7. В. А. Золотницкий, *Соя на Дальнем Востоке*, под ред. Е. А. Старостина (Хабаровское кн. изд-во, Хабаровск, 1962).
8. В. Н. Степанов, *Известия ТСХА* 2, 5 (1957).
9. Л. Ю. Новикова и Л. Г. Наумова, *Агрофизика* 2, 46 (2018).
10. Л. Ю. Новикова, Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ «Программа для предсказания влияния изменяющихся условий среды на хозяйственно ценные признаки сои» № 2018612555. Дата гос. регистрации в реестре программ для ЭВМ 20 февраля 2018 г.

Model Parameterization: the Timing of Flowering in Soybean Accessions

L.Yu. Novikova* **, I.V. Seferova, and K.N. Kozlov***

**Peter the Great St. Petersburg Polytechnical University, Polytechnicheskaya ul. 29, St. Petersburg, 195251 Russia*

***Federal Research Center N.I. Vavilov All-Russian Institute of Plant Genetic Resources,
Bolshaya Morskaya ul. 42-44, St. Petersburg, 190000 Russia*

We developed regression and imitation models capable of predicting the timing of flowering in 9 early maturing soybean accessions. Genotype-environment interactions on emergence proportion, “sowing time-seedling”, and time to flowering “seedling emergence-flowering”, were 6.3% and 15.9%, respectively. A simulation model for the development of phenophases under low temperature conditions showed the differences in the response of soybean yield to temperature change. The approximation error less than 10% is acceptable indicating that the model is valid and can be used for crop yield forecasting.

Keywords: climatic factors, soya, nonlinear regression, grammatical evolution, imitation modeling