

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВЛИЯНИЯ КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА РАЗВИТИЕ СОИ

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

*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: m.samsonova@spbstu.ru

Поступила в редакцию 20.10.17 г.

Разработаны новые нелинейные регрессионные модели зависимости длины периода «посев–всходы» и «всходы–цветение» сои от климатических факторов. Полученные регрессионные модели обладают большей точностью, чем имевшиеся ранее, однако имеют более сложное строение.

Ключевые слова: климатические факторы, соя, нелинейная регрессия, грамматическая эволюция, межфазные периоды.

В связи с наблюдающимся потеплением климата приобретает актуальность построение математической модели влияния климатических факторов на развитие культуры для количественной оценки возможности продвижения относительно теплолюбивых культур в северные регионы. Соя – одна из важнейших белково-масличных культур, ценная содержанием белка (37–44%) и масла (17–23%). Главные факторы, влияющие на развитие сои – температура, влагообеспеченность и длина дня. Имеющиеся в литературе математические модели прогнозирования фенологии сои в разных условиях и для разных целей используют разные наборы предикторов [1–4]. По результатам изучения образцов сои в условиях Северо-Запада Российской Федерации в работе [5] была построена регрессионная квадратичная модель зависимости продолжительности периодов «посев–всходы» и «всходы–цветение» от их средней температуры. Кроме того, в модель было включено количество осадков, рост которых ускоряет развитие в период «посев–всходы» в условиях весенней засухи и замедляет в период «всходы–цветение», часто будучи избыточным. Модели имели точность $R_{adj}^2 = 0,68$ и $R_{adj}^2 = 0,46$, где R_{adj}^2 – скорректированный на число степеней свободы коэффициент детерминации.

Задачей данного исследования являлось выявление климатических факторов и уточнение вида зависимости от них продолжительностей межфазных периодов «посев–всходы» и «всходы–цветение сои».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Образцы сои. Продолжительность межфазных периодов «посев–всходы» и «всходы–цветение» исследовалась в 1999–2013 гг. на опытном поле ВИР им. Н.И. Вавилова в г. Пушкин Ленинградской области для девяти скороспелых образцов различного происхождения. Варьирование сроков посева позволило расширить диапазон температур и исследовать влияние длины дня.

Метод грамматической эволюции. Метод, называемый «грамматическая эволюция» (Grammatical Evolution) [6,7], был недавно разработан для восстановления аналитического выражения функции по известным значениям. Используя формальный подход на основе грамматики, строятся N функций, для каждой используется слово длины L , построенное по правилам: *слово может быть именем признака (X) или операцией над выражениями из признаков; «+», «-», «*», «/» – разрешенные операции; X , $(X - Const)$, $1/(X - Const)$ – разрешенные выражения.* Регрессионная модель в результате будет представлять линейную комбинацию этих функций, построенную методом Лассо. Комбинация признаков определяется минимизацией методом разностной эволюции [8] целевой функции, которая представляет собой среднее по четырем реализациям значение ошибки модели. Коэффициенты определяли по обучающей выборке объемом 75%, а ошибку рассчитывали по неиспользованным при обучении данным.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Получены следующие зависимости длины периода «посев–всходы» $L_{п-в}$ и «всходы–цветение» $L_{в-ц}$ для совокупности 379 наблюдений:

$$L_{п-в} = 49,91 - 0,04 \cdot P_{5п5} - 0,36 \cdot T_{п-в} - 3,65 \cdot T_{20п} - 0,35 / (P_{5п} - 13,41) + 24,48 / (T_{20п} - 26,79) + 0,10 \cdot T_{20п}^2;$$

$$R_{adj}^2 = 0,74,$$

$$L_{в-ц} = 45,66 + 378,07 \cdot D_{40п} - 1,64 \cdot T_{50п} - 0,31 \cdot T_{в-ц} - 358,46 \cdot D_{в-ц} - 7,73 / (D_{50п} - 1,04) - 1,29 / (P_{60п} - 5,49) + 0,65 / (D_{40п} - 0,81); R_{adj}^2 = 0,60,$$

где $P_{5п5}$ – количество осадков за период 5 суток до и 5 суток после посева; $P_{5п}$ – количество осадков за период суток после посева; $P_{60п}$ – среднее количество осадков за 60 суток после посева; $T_{п-в}$ и $T_{в-ц}$ – средняя температура за периоды «посев–всходы» и «всходы–цветение»; $T_{20п}$ и $T_{50п}$ – средняя температура за периоды 20 и 50 суток после посева; $D_{в-ц}$ – средняя доля светлого времени суток за период «всходы–цветение»; $D_{40в}$ и $D_{50в}$ – средняя доля светлого времени суток за периоды 40 и 50 суток после всходов.

Полученные регрессионные модели обладают большей точностью, чем имевшиеся ранее, однако имеют более сложное строение и включают гиперболические функции.

В период «посев–всходы» гиперболическая зависимость позволила выявить, что развитие ускоряется с ростом средней температуры до 27°C, после которой развитие замедляется; резко ускоряли прорастание осадки более 13,4 мм в течение пяти суток после посева. Модель «всходы–цветение» показала замедление цветения с ростом длины дня, что не выявлялось

при использовании более простой модели [5], но характерно для растений короткого дня, к которым принадлежит соя. Рост осадков после всходов замедлял развитие, как и в модели [5], однако вид функции стал гиперболическим. Это согласуется с наблюдением, что резкое замедление цветения наступает при количестве осадков выше 4 мм/сут в период «всходы–цветение» [5].

Результаты работы были получены с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (<http://www.scc.spbstu.ru>).

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, задание № 1.8697.2017/БЧ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. J. Major, D. R. Johnson, J. W. Tanner, et al., *Crop Sci.* **15**, 174 (1975).
2. T. Hodges, V. French, *Agron. J.* **77**, 500 (1985).
3. Э. Бутсма, *Зерно*, № 4, 28 (2010). http://zerno-ua.com/wp-content/uploads/zerno_verstka_04_10.pdf [Электронный ресурс].
4. Э. Бутсма, *Зерно*, № 4, 18 (2010). http://zerno-ua.com/wp-content/uploads/zerno_verstka_04_10.pdf [Электронный ресурс].
5. И. В. Сеферова и Л. Ю. Новикова, *Труды по прикладной ботанике, генетике и селекции* **176** (1), 88 (2015).
6. F. Noorian, A. M. de Silva, and P. H. W. Leong, *J. Stat. Soft* **71** (1), 1 (2016).
7. M. O'Neill and C. Ryan, *IEEE Trans. Evol. Comp.* **5** (4), 349 (2001).
8. K. Kozlov, A. M. Samsonov, and M. Samsonova, *Peer J. Comp. Sci.* **2**, e74 (2016).

A Mathematical Model of the Impact of Climatic Factors on Soybean Development

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

*Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Polytekhnicheskaya 29, St. Petersburg, 195251

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

We developed new nonlinear regression models that predict the dependence of the length of time from soybean seed germination to seedling emergence and from soybean seedling emergence to flowering on climatic factors. The chosen regression models are more precise than previous ones and have become more complicated.

Keywords: climatic factors, soybean, nonlinear regression, grammatical evolution, interphase periods