

Ю.Б. Лямкина

Моделирование продукционного процесса бобовых растений на примере сои

Ключевые слова: симбиоз, симбиотическая фиксация азота, бобовые культуры, продукционный процесс, модель.

Key words: symbiosis, symbiotic fixing of nitrogen, bean cultures, production process, model.

Цель исследования – построение динамической модели, описывающей продукционный процесс бобовых культур на примере сои от момента сева до полного созревания и дающей прогноз урожайности. Практическая значимость и актуальность работы обусловлены тем, что одним из основных элементов интенсификации земледелия в Алтайском крае станет широкое использование биологизации зернового производства с посевами азотфиксирующих бобовых трав и зернобобовых культур. Вступая в симбиоз с клубеньковыми бактериями, соя приобретает свойство ассимилировать молекулярный азот воздуха.

В период интенсификации земледелия в Алтайском крае актуальным становится вопрос о широком использовании уникальной способности бобовых растений и микроорганизмов к связыванию молекулярного азота атмосферы. В связи с этим задачами исследования являются:

- систематизация научных знаний и исследований в области симбиотической фиксации азота, ее роли в азотном питании растений и повышении плодородия почв;
- разработка блока минерального питания сои и моделирование процесса симбиотической фиксации азота;
- создание на базе имитационно-моделирующего комплекса AGROTOOL, разработанного в Агрофизическом НИИ РАСХН (г. Санкт-Петербург), прикладной модели продукционного процесса сои;
- адаптация данной модели к конкретным почвенно-климатическим условиям Алтайского края.

В рамках данной статьи рассмотрен один из аспектов моделирования продукционного процесса сои – разработка модели симбиотической фиксации азота.

Соя – растение семейства бобовых, родиной которого является восточная Азия. Семена сои, иногда называемые соевыми бобами, – широко распространенный продукт питания благодаря высокому содержанию растительного белка, в среднем составляющего около 40% от массы семени, а у отдельных сортов достигающему 48–50%, во многом аналогичного животному. Белок содержит все незаменимые аминокислоты и легко усваиваем. В зерне сои находится 20–25% масла с благоприятным жир-

но-кислотным составом, большой набор минеральных веществ и витаминов. Вследствие этого соя входит в состав некоторых кормов для животных. В мировом производстве растительного масла соя занимает первое место среди всех масличных растений, а по сборам белка лидирует среди всех зерновых и зернобобовых культур [1].

Попытки освоения сои в Западной Сибири, в том числе и на Алтае, неоднократно предпринимавшиеся учеными и производственниками, из-за отсутствия соответствующих местным условиям скороспелых сортов в большинстве случаев заканчивались неудачей.

В настоящее время обстановка существенно изменилась. В результате многолетней кропотливой работы селекционеров были созданы скороспелые сорта сои сибирского экотипа, позволяющие получать до 25–30 ц/га зерна сои [2]. В марте 1995 г. Коллегией Главного управления сельского хозяйства и продовольствия администрации Алтайского края одобрена краевая научно-техническая программа «Соя», включающая вопросы производства, переработки, реализации и использования сои и соевых продуктов [3].

Выращивая бобовые культуры, активно фиксирующие азот воздуха, можно решить проблему сохранения и даже расширенного воспроизводства естественного плодородия почвы [4]. Симбиотическая азотфиксация играет существенную роль в обеспечении бобовых культур, связанных азотом. Азотфиксирующая система – сложная динамическая система, а сам процесс симбиотической фиксации является результатом действия большого числа процессов. Первая в отечественной литературе модель симбиотической фиксации азота соей разработана В.И. Чуприниным [5]. Используя теоретические основы, заложенные в [5], была разработана модель симбиотической фиксации азота клубеньковыми тканями корней люцерны [6]. Наиболее полная схема, учитывающая большое количество биотических и абиотических факторов, влияющих на эффективность бобово-ризобального симбиоза в отношении азотфиксации и урожайности бобовых растений, приведена на рисунке 1 [7].

Для формализации задачи о симбиотической фиксации азота клубеньковыми тканями корней растений в [5] приняты следующие обозначения: $Y(t)$ – текущее количество клубеньков; M_r – масса корней растения; $J_1(\tau)$ – количество связанного азота; $X(\theta, \tau)$ – масса клубенька; X_{\max} – предельная масса клубенька; X_0 – масса клубенька в мо-

мент его образования; $\mu(\tau)$ – общая биомасса клубеньков к произвольному моменту $\tau \in [t_0, t]$; ρ – средняя плотность клубеньковой ткани, приближенно постоянная во времени; $\gamma(\tau)$ – удельная скорость азотфиксации; $Y_m(\tau)$ – количество клубеньков, масса которых превышает минимальную X_{\min} .

Математическая модель симбиотической фиксации молекулярного азота клубеньковыми тканями корней сои описывается следующей системой уравнений [5]:

$$\frac{dY}{d\theta} = a \frac{dM_r}{d\theta} * f_1(pH) * f_2(W) * f_3(T),$$

$$X(\theta, \tau) = X_{\max} / \{1 + (X_{\max} / X_0 - 1) * e^{-\beta * X_{\max}(\tau - \theta)}\},$$

$$\mu(\tau) = \int_{t_0}^{\tau} \frac{dY}{d\theta} * X(\theta, \tau) d\theta, \quad J_1(\tau) = \frac{k}{\rho} * \int_{t_0}^{\tau} \gamma(\tau) * \mu(\tau) d\tau,$$

$$Y_m(\tau) = \int_{t_0}^{\tau} \eta(\theta) d\theta, \quad \eta(\theta) = \begin{cases} \frac{dY}{d\theta}, & X(\theta, \tau) \geq X_{\min} \\ 0 & \end{cases},$$

a, β, k – коэффициенты пропорциональности; θ – время образования клубенька; $f_1(pH), f_2(W), f_3(T_s)$ – функции «отклика» на кислотность почвы, влажность и температуру почвы соответственно.

В модели В.И. Чупринина функции отклика имели только одно оптимальное значение фактора, но исследования показали, что оптимальное значение фактора должно быть представлено интервалом. На основании многочисленных экспериментальных и теоретических исследований [8–11] установлены зависимости скорости образования клубеньков от факторов внешней среды, которые будем рассчитывать с помощью соответствующих нормированных функций отклика, имеющих следующий вид:

$$f(x) = \begin{cases} 1 - \frac{(x-b)^2}{(a-b)^2}, & x \in (a, b) \\ 1, & x \in [b, d] \\ 1 - \frac{(x-c)^2}{(d-c)^2}, & x \in (d, c) \end{cases},$$

где a – минимальное значение фактора, за пределами которого образования клубеньков не происходит; b, c – биологически оптимальные границы фактора; d – верхняя граница фактора для жизнедеятельности клубеньковой ткани.

Изучение аспектов симбиотической фиксации азота и анализ моделей [5, 6] позволили разработать модель симбиотической фиксации азота соей, которая состоит из двух блоков: блока динамики фазовой структуры клубеньков, рассчитывающего скорость образования центров клубеньков на отрастающих корнях, скорость перехода клубеньков на стадию азотфиксации, скорость отмирания клубеньков на стадии образования и азотфиксации и блока интенсивности азотфиксации, включающего в себя расчет массы клубеньков по фазам развития

и интенсивность поступления в растение симбиотически фиксированного азота.

Пусть $S_0(t)$ – количество неактивных клубеньков (фаза образования клубеньковой ткани); $S_1(t)$ – количество азотфиксирующих клубеньков (фаза азотфиксации); $S_2(t)$ – количество отмерших клубеньков (фаза деградации клубеньковой ткани). Тогда динамическая модель фазовой структуры клубеньков для каждой фазы клубеньковой ткани за некоторый малый промежуток времени $[t, t + \Delta t]$ описывается с помощью балансовых соотношений:

$$S_0(t + \Delta t) = S_0(t) + (V_{\text{root}}(t) - V_{\text{fix}}(t) - V_{\text{deg}}(t))\Delta t,$$

$$S_1(t + \Delta t) = S_1(t) + (V_{\text{fix}}(t) - V_{\text{deg}}^{\text{fix}}(t))\Delta t,$$

$$S_2(t + \Delta t) = S_2(t) + (V_{\text{deg}}(t) - V_{\text{deg}}^{\text{fix}}(t))\Delta t,$$

где $V_{\text{root}}(t)$ – скорость образования центров клубеньков на отрастающих корнях; $V_{\text{fix}}(t)$ – скорость перехода в фазу азотфиксации; $V_{\text{deg}}(t)$ – скорость отмирания центров на стадии образования; $V_{\text{deg}}^{\text{fix}}$ – скорость отмирания клубеньков на стадии азотфиксации.

Скорость образования центров клубеньков полагается пропорциональной нарастанию биомассы корня $\Delta M_{\text{root}}(t)$:

$$V_{\text{root}}(t) = \alpha \Delta M_{\text{root}}(t) f_1(pH) f_2(W).$$

Скорость перехода на стадию азотфиксации $V_{\text{fix}}(t)$ пропорциональна скорости поступления в клубеньки избыточных углеводов $V_C(t)$:

$$V_{\text{fix}}(t) = \beta V_C(t) f_1(pH) f_2(W) f_3(T_s),$$

где β – параметр идентификации.

Скорость отмирания клубеньков на стадиях образования ($V_{\text{deg}}(t)$) и азотфиксации ($V_{\text{deg}}^{\text{fix}}$) пропорциональна отмершей массе корневых волосков $DM_{\text{root}}(t)$:

$$V_{\text{deg}}(t) = \delta DM_{\text{root}}(t), \quad V_{\text{deg}}^{\text{fix}}(t) = \varphi DM_{\text{root}}(t),$$

где $DM_{\text{root}}(t)$ рассчитывается в блоке роста.

Интенсивность азотфиксации следует связывать с общим объемом клубеньков $V_{\text{Nod}}(t)$, который связан с их массой $M_{\text{Nod}}(t)$ формулой:

$$V_{\text{Nod}}(t) = M_{\text{Nod}}(t)/\rho,$$

где ρ – средняя плотность клубеньковой ткани, приближенно постоянная во времени. Это позволяет для интенсивности азотфиксации VI_{fix} записать соотношение:

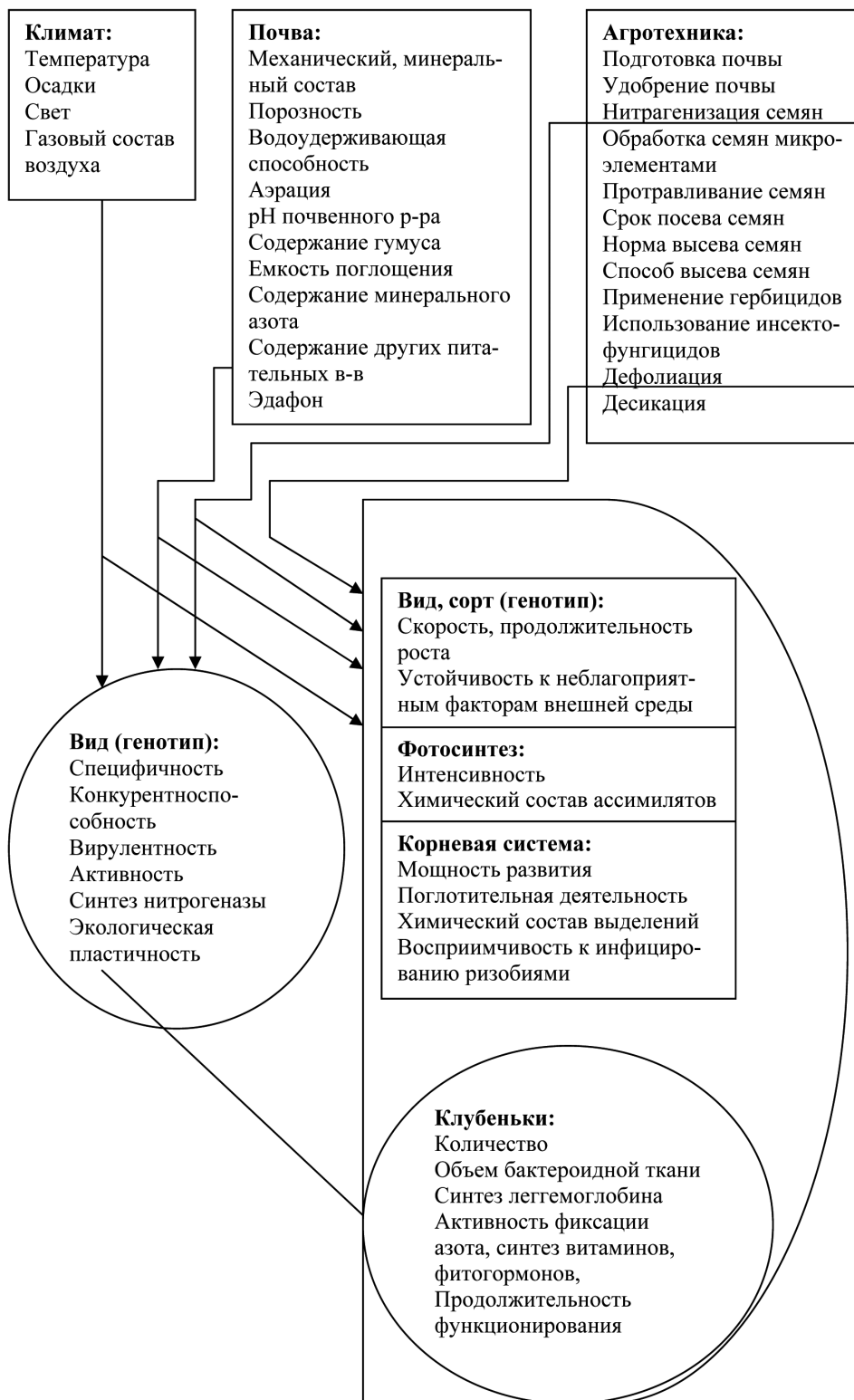
$$VI_{\text{fix}} = \omega(c) V_{\text{Nod}}(t),$$

$\omega(c)$ – удельная скорость азотфиксации, которая возрастает при интенсивном поступлении углеводов в клубеньки.

Прирост биомассы клубенька также зависит от уровня обеспеченности клубеньков углеводами. Эта зависимость позволяет описать прирост биомассы клубенька следующим уравнением:

$$\Delta M_{\text{Nod}}(t) = k_C C,$$

т.е. прирост биомассы клубенька $\Delta M_{\text{Nod}}(t)$ пропорционален количеству избыточных углеводов, k_C определяет долю углеводов, идущую на построение ткани клубеньков. Только часть фиксированного клубеньками азота расходуется на синтез собственной ткани, большая же часть связанного азота



Факторы, влияющие на активность азотфиксации

транспортируется в растительные ткани. Следовательно, интенсивность поступления в растение симбиотически фиксированного азота $VP_{\text{fix}}(t)$ может быть описана формулой:

$$VP_{\text{fix}}(t) = k_{\text{Nit}} VI_{\text{fix}},$$

где k_{Nit} – коэффициент передачи связанного азота растению.

Приведенная система уравнений позволяет вычислять количество фиксированного азота, поступающего из клубеньков в растения, общую биомассу клубеньков и их количество для произвольного момента времени.

Модель симбиотической азотфиксации ориентирована на совместное использование с базовой мо-

делью AGROTOOL, разработанной в Агрофизическом НИИ РАСХН (Санкт-Петербург), включающей в качестве одного из блоков модель азотного

цикла почвы, что позволит рассчитывать обеспеченность растений сои как симбиотическим, так и почвенным минеральным азотом.

Библиографический список

1. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Соя>
2. Соя в Алтайском крае: рекомендации РАСХН / Сиб. отд-ние АНИИСХ. – Барнаул, 2006.
3. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.regionalcom.ru>
4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://agrofuture.ru/biologicheskij-azot.html>
5. Чупринин, В.Г. Модель фиксации молекулярного азота для оптимизации пищевого режима сои на орошении / В.Г. Чупринин // Режимы орошения и способы полива сельскохозяйственных культур на Северном Кавказе. – Новочеркасск, 1983.
6. Хворова, Л.А. Моделирование влияния азотного питания на продукционный процесс посева люцерны: дис. ... канд. техн. наук / Л.А. Хворова. – СПб., 1992.
7. Мильто, Н.И. Клубеньковые бактерии и продуктивность бобовых растений / Н.И. Мильто. – Минск, 1982.
8. Кардинальская, Р.И. Биологическая фиксация молекулярного азота и ее значение в земледелии / Р.И. Кардинальская. – Киев, 1983.
9. Мишустин, В.К. Роль симбиотической фиксации азота бобовыми растениями в азотном балансе дерново-подзолистой среднесуглинистой почвы / В.К. Мишустин, А.К. Ярцева, А.В. Морозова // Биологический азот и его роль в земледелии. – М., 1967.
10. Ризниченко, Г.Ю. Математические модели биологических продукционных процессов / Г.Ю. Ризниченко, А.Б. Рубин. – М., 1993.
11. Романовский, Ю.М. Математическая биофизика / Ю.М. Романовский, Н.В. Степанова, Д.С. Чернавский. – М., 1984.