

УДК 579.64

**Исследование симбиотической азотфиксации
с помощью методов и инструментов
многоподходного математического моделирования**

А.Г. Топаж¹, А.В. Абрамова², К.Г. Неупокоева²

¹ФГБНУ «Агрофизический научно-исследовательский институт», г. Санкт-Петербург; ²АлтГУ, г. Барнаул

Магистральная тенденция развития современных методов математического моделирования в различных предметных областях естественных наук связана с появлением так называемых мультипарадигменных или гибридных моделей. В таких моделях одно и то же явление или феномен может рассматриваться и описываться с одновременным использованием нескольких принципиально разных математических методов формализации и/или техник имитационного моделирования. Подобное смешение подходов в рамках одной модели зачастую позволяет взглянуть на объект исследования с разных точек зрения, отразить в модели различные факторы и аспекты его поведения и получить синергетический эффект.

В данной работе рассматривается исследование с помощью методов и инструментов многоподходного математического моделирования важнейшего процесса, обеспечивающего стабильность и экологическую устойчивость естественных и антропогенных биоценозов, – симбиотической азотфиксации атмосферного азота клубеньковыми бактериями в корнях бобовых растений.

Биологическая азотфиксация – уникальный механизм и потенциально практически неисчерпаемый естественный источник минеральных соединений азота – важнейшего питательного элемента культурных растений. Создание специфических севооборотов с участием бобовых культур за счет использования бобово-ризобияльных систем составляет основу «биологического земледелия». Понимание движущих механизмов данного процесса может быть достигнуто как в ходе экспериментальных исследований, так, в том числе, и с помощью методов математического имитационного моделирования. В частности, совершенно необходимым представляется включение алгоритмов симбиотической азотфиксации в математические модели продукционного процесса бобовых культур, а, следовательно, и в «моделецентрические» системы расчета сельскохозяйственных севооборотов с их участием [1, 2].

Действительно, блоки описания процесса симбиотической азотфиксации включены в состав всех наиболее распространенных комплексов динамического моделирования агроэкосистем. Соответствующие подмодели основываются на традиционном системно-динамическом или поточно-балансовом подходе, то есть законы поведения исследуемого «пассивного» объекта формулируются в виде предопределенных причинно-следственных связей (потоков вещества и энергии), математическим выражением которых выступают системы обыкновенных дифференциальных уравнений или уравнения в частных производных [3].

В приложении к рассматриваемой проблеме моделирования симбиотической азотфиксации многоподходность, прежде всего, выражается в том, чтобы попытаться расширить этот традиционный формализм описания. Так, если встать на точку зрения эволюционной теории и попытаться не просто зафиксировать наблюдаемые законы поведения, но попытаться объяснить и вывести принципы их возникновения в живой природе, то для описания симбиотической азотфиксации может быть применен принципиально иной математический аппарат [4].

В самом деле, азотфиксация, как типичное парное взаимодействие, может быть описана в терминах совместного функционирования двух независимых активных агентов, образующих симбиоз, каждый из которых обладает своей собственной целью и собственными интересами. В рассматриваемом случае данными агентами выступают бобовое растение и азотфиксирующие бактерии (ризобии). При подобном подходе открывается возможность не просто констатации видимых проявлений кооперативного поведения, но и объяснения данного природного феномена, то есть в определенном смысле прослеживание его эволюционного генезиса.

Более того, представляется, что бобово-ризобияльное взаимодействие может служить исключительно ценным объектом исследования возникновения подобного кооперативного поведения в широком классе живых систем. Известно, что свободно живущие ризобии не нуждаются в симбиозе с растениями для поддержания своей популяции, и в этом состоянии они не задействуют энергетически затратные механизмы фиксации атмосферного азота. Сущность бобово-ризобияльного симбиоза проявляется именно в том, что бактерии вырабатывают лабильный азот в качестве своеобразной платы за снабжение их растением углеродосодержащими питательными веществами (сахарами и т.п.).

Исследование вопросов односторонней или двусторонней стимуляции подобного рода взаимодействия, определение наличия или отсутствия единственного «центра принятия решений» в данной системе,

обеспечение устойчивости кооперативных стратегий к проявлениям «мошенничества» субъектов взаимодействия, то есть существование эволюционно стабильных стратегий и механизмов их поддержания, требуют использования математического аппарата теории оптимальных решений и теории игр. Построение и исследование соответствующего семейства моделей составляет содержание данной работы.

В докладе представлены результаты исследования следующих модельных решений:

1) поточно-балансовая детерминистическая модель азотфиксации в системно-динамической и агентной постановке;

2) модель симбиотической азотфиксации, в которой активным действующим агентом выступает бобовое растение, и ее анализ методами теории оптимального управления;

3) модель симбиотической азотфиксации, в которой активными действующими агентами выступают колонии азотфиксирующих бактерий (ризобий) с различными параметрами поведения (популяция с неоднородной структурой);

4) модель симбиотической азотфиксации, с двумя активными агентами (бобовое растение и ризобии), полученная путём совмещения двух ранее разработанных классов моделей, в каждой из которых поведение одного из агентов пассивно (заранее известно другому агенту). Полное исследование получившейся двухкомпонентной динамической модели предполагает использование методов теории неантагонистических дифференциальных игр [5]. Однако для широкого класса формализаций оказывается возможным показать, что практически на всем временном интервале интегрирования динамической системы индивидуальные оптимальные стратегии обоих субъектов взаимодействия совпадают между собой. Тогда для количественного исследования получившейся вариационной задачи с двумя скалярными функциями управления можно использовать классический аппарат принципа максимума Понтрягина.

Библиографический список

1. Баденко В.Л., Гарманов В.В., Иванов Д.А., Савченко А.Н., Топаж А.Г. Перспективы использования динамических моделей агроэкосистем в задачах средне- и долгосрочного планирования сельскохозяйственного производства и землеустройства // Российская сельскохозяйственная наука. – 2015. – № 1-2. – С. 72-76.

2. Полуэктов Р.А., Смоляр Э.И., Терлеев В.В., Топаж А.Г. Модели продукционного процесса сельскохозяйственных культур.– СПб.: Изд-во С.– Петерб. ун-та, 2006. – 396 с.

3. Хворова Л.А., Топаж А.Г., Абрамова А.В., Неупокоева К.Г. Подходы к описанию симбиотической азотфиксации Часть 2. Анализ подходов к математическому моделированию процесса // Известия Известия Алтайского государственного университета. – Барнаул, 2015. №1/1 (85). С. 192–196.

4. Новосельцев В.Н. Теория управления и биосистемы. – М.: Наука, 1978, 320 с.

5. Айзекс Р. Дифференциальные игры. – М.: Мир, 1967. – 480 с.

УДК 502.05

Международная мониторинговая сеть в степной зоне Алтайского края

*В.В. Щербинин¹, А.А. Бондарович¹, А.В. Пузанов²,
Р. Майсснер³, Х. Рупп³, М. Фрюауф³, Г. Шмидт⁴,
Э. Штефан⁴, П. Иллигер⁴, Д.Н. Балыкин²*

¹АлтГУ, г. Барнаул; ²ИВЭП СО РАН, г. Барнаул;

*³Центр исследования окружающей среды им. Гельмгольца,
департамент физики почв, лизиметрические станции,
г. Фалькенберг; ⁴Институт наук о Земле и географии,
Университет Мартина-Лютера Галле-Виттенберг,
г. Галле*

Проводившееся в середине XX века интенсивное хозяйственное освоение степной и лесостепной зон Западной Сибири привело к ряду негативных экологических и социально-экономических последствий. Площадь распашанных целинных земель в 1954-63 гг. в СССР превысила 42 млн. га, при первоначальном плане в 13 млн. га, при этом была допущено несколько серьёзных ошибок, среди которых – сплошная распашка каштановых почв сухих степей на площади около 20 млн. га [1], куда вошла и Кулундинская равнина (Западно-кулундинская физико-географическая провинция). Интенсивная распашка каштановых почв драматическим образом совпала с засухами. Итогом подобного освоения Кулундинской равнины стала деградация почв на больших площадях под влиянием ветровой и водной эрозии [2]. В настоящее время, скорости потерь содержания гумуса в Алтайском крае различны и составляют от 0,023/год до 0,1%/год, а наибольшая интенсивность