

# ПОСТРОЕНИЕ СЦЕНАРНОЙ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ФИТОЦЕНОЗА

**А.А. Широкий**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН*  
Россия, 117997, Москва, Профсоюзная ул., 65  
E-mail: [shiroky@ipu.ru](mailto:shiroky@ipu.ru)

**В.В. Новочадов**

*Волгоградский государственный университет*  
Россия, 400062, Волгоград, Университетский пр-кт, 100  
E-mail: [novochadov.valeriy@volsu.ru](mailto:novochadov.valeriy@volsu.ru)

**Ключевые слова:** фитоценоз, антропогенное трансформирование, управление агроценозами, системная динамика, взвешенные оргграфы, сценарии

**Аннотация:** В настоящее время наиболее актуальным подходом в развитии агропромышленного комплекса (АПК) является экологический системный подход к управлению агроценозами. Модификация такого подхода возможна с использованием биотехнологических решений, в частности, управления путем внедрения в агроценоз новых элементов – биотических (бактерии и грибы), или же абиотических (химические вещества). Целью данного исследования является построение модели управления свойствами фитоценоза в интрузиях на основе воздействия на критические консортные связи. В работе описано построение модели системной динамики агробиоценоза на основе аппарата взвешенных ориентированных графов с элементами сценарного анализа.

## 1. Введение

С точки зрения системной биологии, растительные сообщества, созданные человеком в процессе сельскохозяйственной или иной работы, активно взаимодействуют с микрофлорой, другими растениями, представителями животного мира, образуя сложные системы – искусственные биоценозы. Особое место в управлении здесь приобретают взаимодействия с соседними живыми системами, которые описываются как техногенные интрузии с плотным соединением или частичной заменой территории искусственного биоценоза. Биосистемы в таких районах относят к полуискусственным биоценозам [1, 2].

Антропогенная трансформация территорий, связанная с нарушением естественного рельефа, растительности и почв часто приводит к деградации ландшафтов, которая выражается в дефляции почвенного покрова, в смыве и размыве лишённых растительности участков, в загрязнении как почв, так и водных объектов [1, 3]. В связи с этим для сохранения биологического потенциала и продуктивности земель региона необходимо оценить общее состояние фитоценозов, обосновать допустимую антропогенную нагрузку на них, а также активно применять современные технологии управления.

В настоящее время наиболее актуальным подходом в развитии агропромышленного комплекса является экологический системный подход к управлению агроценозами [4]. Модификация такого подхода возможна с использованием биотехнологических

решений, в частности, управления путем внедрения в агроценоз новых элементов – биотических (бактерии и грибы), или же абиотических (химические вещества) [5].

Цель работы – построение модели управления свойствами фитоценозов в интрузиях, сопровождающих агробиоценозы аридной зоны, на основе воздействия на критические консортные связи.

## 2. Построение модели динамики системы фитоценоза

### 2.1. Выявление основных компонентов модели и перечня возможных управляющих воздействий

Всего было обследовано 15 интрузий, что позволило сделать необходимые обобщения в отношении их влияния на прилегающий агроценоз. Для определения внутрисистемных связей были выделены ключевые фенотипические признаки участников изучаемых биоценозов. В итоге, кандидатами для построения решающих правил оказались:

- интегральные характеристики фитоценоза, в том числе характеристики, получаемые при помощи дистанционных динамических методов [6,7];
- интегральные показатели негативного влияния техногенной интрузии на прилегающий агроценоз [8], в результате чего это влияние было ранжировано на слабое, умеренное и значительное;
- показатели распределения подвижных форм микроэлементов в почве [9];
- показатели почвенной микробиоты [10].

Для построения модели вначале все зафиксированные зависимости были представлены качественными характеристиками, которые затем были преобразованы в коэффициенты, значения которых были подобраны при тестировании модели в стационарном режиме эмпирически, чтобы воспроизвести реальную картину динамики фитоценоза. В необходимых случаях группы родственных показателей были агрегированы.

### 2.2. Построение модели динамики фитоценоза интрузии

Для построения модели управления свойствами фитоценоза в интрузиях авторы воспользовались аппаратом функциональных ориентированных графов с элементами сценарного анализа поведения сложных систем [11, 12]. Для редукции набора управляемых элементов и управляющих воздействий сформулируем ограничения, накладываемые технологией сельскохозяйственной деятельности, ее экономикой и доступностью компонентов предполагаемого к использованию компаунда:

- a) управляющие воздействия не должны затрагивать агрокультурный фитоценоз (требование вытекает из необходимости соблюдения технологии земледелия);
- b) управляющие воздействия должны быть аддитивными – увеличить концентрацию вещества, внести дополнительный элемент в микробиоту и т. п.;
- c) управляющие воздействия не должны напрямую подавлять ни один из компонентов фитоценоза интрузии (см. также пункт a);
- d) формула вносимого компаунда не должна содержать более трех компонентов (ограничение стоимости).

Для формализации модели развития интрузии введем переменные, описывающие динамику биоценоза интрузии. Все параметры за исключением результирующего  $I$  приведены к безразмерным величинам, принимающим значения на отрезке  $[0, 1]$  (табл. 1).

На рис. 1 изображен взвешенный ориентированный граф, описывающий динамику интрузии. В терминах системной динамики реакция биосистемы на управляющее воздействие описывается как распространение импульса в графе. Каждому ребру на графе поставлена в соответствие пара чисел – вес ребра (коэффициент преобразования импульса) и задержка его распространения в виде числа шагов моделирования – в данном случае модель дискретная. Вершины, соответствующие управляющим воздействиям, удовлетворяющим сформулированным выше ограничениям, имеют двойную границу.

**Таблица 1.** Переменные, описывающие динамику биоценоза техногенной интрузии.

Обозначение	Описание
<i>Mn, Ni, Cu, Zn</i>	Относительная концентрация в почве соединений марганца, никеля, меди и цинка соответственно. Нулевое значение соответствует концентрации, не оказывающей влияния на фитоценоз, единичное – максимальной предельной концентрации
<i>TBC</i>	Интегральный показатель влияния микробного числа, численности грибков и соотношения грибков и бактерий в почве
<i>MBD</i>	Интегральный показатель влияния микробиологического разнообразия
<i>MBIn</i>	Фиктивная вершина для описания внесения управляющего воздействия в виде микробиологического препарата
<i>D</i>	Интегральный показатель влияния биоразнообразия и метаболической активности
<i>C</i>	Относительная площадь проективного покрытия фитоценоза
<i>I</i>	Интегральный показатель состояния фитоценоза ( $C/3 - D$ )

При этом должны выполняться следующие правила:

- минимальный импульс в вершине – 0, максимальный – 1;
- вершина сбрасывает импульс полностью за 1 такт, но передача может происходить с задержкой (число на ребре через запятую после веса);
- входящий импульс получается путем умножения имеющегося (возможно, в прошлом) импульса в смежной вершине импульса на вес ребра;
- сумма весов входящих в каждую вершину ребер не может превышать 1;
- величина импульса в вершине вычисляется как взвешенная сумма входов, преобразованная по сопоставленному с вершиной правилу (в нашем случае это логистическая функция).

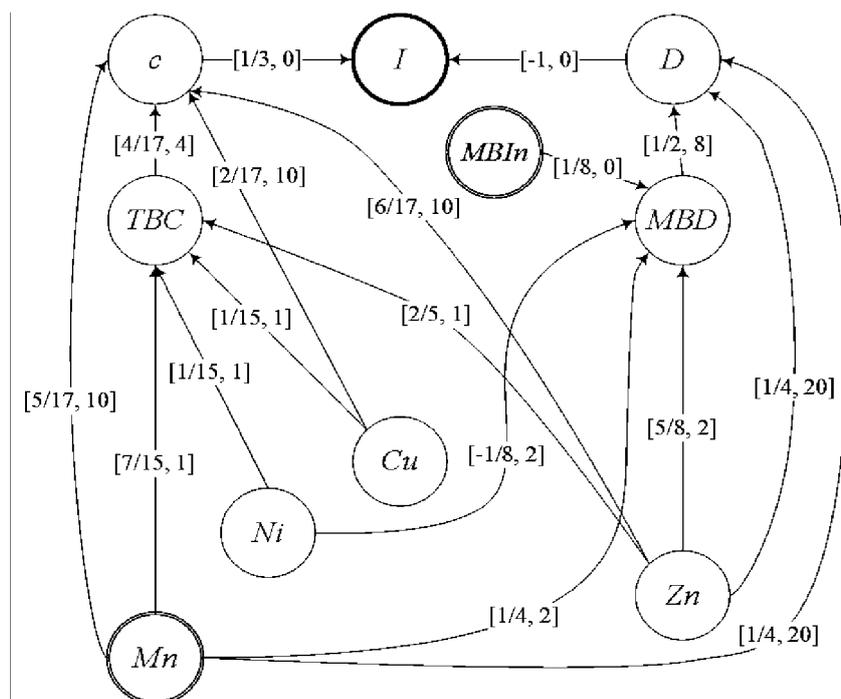


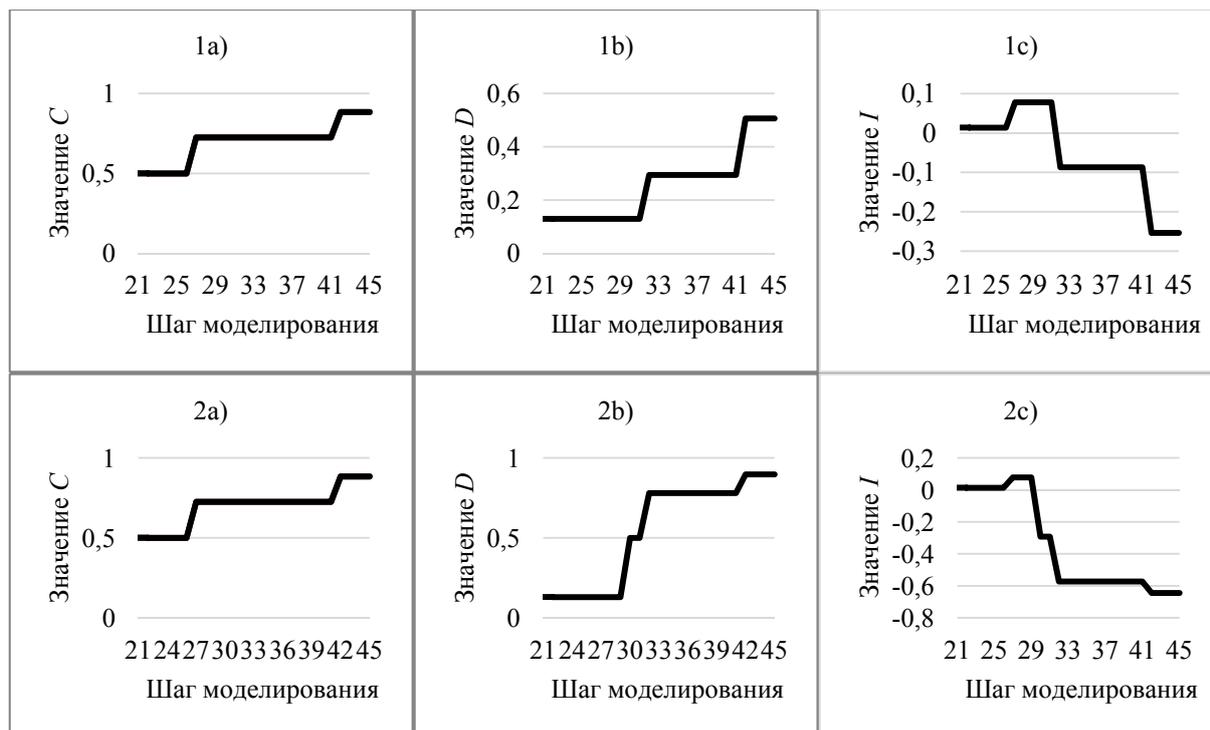
Рис. 1. Взвешенный ориентированный граф модели динамики биоценоза интрузии.

Состояние фитоценоза техногенной интрузии будем оценивать по интегральному показателю  $I = C/3 - D$ . Заметим, что  $I \in [-1, 1/3]$ . Положительные значения  $I$  означают благоприятные условия для развития интрузии, отрицательные – деградацию. Асимметричность множества значений показателя относительно нуля отражает естественное распределение множества факторов развития агросистем (негативных больше).

Исследование синергического сценария развития фитоценоза интрузии в предположении, что содержание металлов в почве постоянно и находится на среднем уровне ( $Mn = Ni = Cu = Zn = 0,5$ ) и без учета колебаний численности и микробиологического состава почвы показало стабилизацию значения индикатора состояния системы на 21-м шаге на значении  $I = 0,013$  – система стабильна и постепенно развивается.

Теперь исследуем несколько сценариев прямого управления. После стабилизации состояния системы в синергическом сценарии повысим концентрацию соединений марганца в почве до высокого уровня. В этом случае модель показывает ускорение развития фитоценоза (за счет активизации микробиоты), которое затем переходит в деградацию и стабилизируется на уровне  $I = -0,254$ . Отметим, что относительная площади проективного покрытия фитоценоза при этом растет (рис. 2.1).

Модифицируем сценарий, добавив дополнительное управляющее воздействие в виде внесения в почву симбиотической микробиоты субдоминанты. В этом сценарии модель ведет себя схожим образом, но деградация получается более глубокой – стабилизация происходит на уровне  $I = -0,644$  (рис. 2.2).



**Рис. 2.** Исследование системной динамики техногенной интрузии – сценарии прямого управления (1 – повышение концентрации соединений марганца, 2 – дополнительно внесена симбиотическая микробиота субдоминантного вида); а) относительная площадь проективного покрытия; б) интегральный показатель биоразнообразия фитоценоза интрузии; в) интегральный показатель развития фитоценоза интрузии.

При анализе результатов последнего варианта имитационного моделирования отчетливо видно, что наиболее соответствует биологической динамике и обладает (прогностически) максимальным эффектом подход, основанный на одновременном внесении в почву фитоценоза подвижных форм микроэлементов и микроорганизмов-субдоминантов микробиоты. На основе полученной модели гипотетическая формула, позволяющая при минимальном воздействии на биосистему техногенной интрузии в достаточной степени уменьшить ее неблагоприятное (негативное) воздействие на прилегающий агроценоз должна включать в себя три компонента:

- необходимый микроэлемент (хуже – соединение природного происхождения, снижающие биодоступность избыточного микроэлемента);
- микроорганизм, дополнительно способствующий ассимиляции необходимого микроэлемента;
- необходимое количество питательной среды и защитных компонентов для первичной адаптации микрофлоры после прикорневого внесения.

### 3. Заключение

Поиск и анализ металлзависимых белков, входящих в протеом доминирующих растений, показали, что на сегодняшний момент белковый состав не изучен у большинства произрастающих растений, входящих в состав типичных агроценозов аридной зоны. Данные, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для высокоточного управления развитием агроценозов путем воздействия на металлзависимые меха-

низмы растений для обеспечения необходимого уровня эффективного природопользования и достижения оптимального экономического эффекта.

**Работа выполнена частично в рамках государственного задания (проект № 40.7534.2017/БЧ).**

## Список литературы

1. Ivantsova E.A., Novochadov V.V., Onistratenko N.V., Postnova M.V. Ecological aspects of phytosanitary optimization of arid agrobiocenoses of the south of Russia // *Bulgarian J. Agric. Sci.* 2017. Vol. 23 (5). P. 834-842.
2. Ndiribe C., Pellissier L., Antonelli S., Dubuis A., Pottier J., Vittoz P., etc. Phylogenetic plant community structure along elevation is lineage specific // *Ecol. Evolution.* 2013. Vol. 3 (15). P. 4925-4939.
3. Ivantsova E.A., Onistratenko N.V., German N.V., Krylov P.A., Tichonova A.A., Novochadov V.V. Targeted changes in the natural and semi-artificial arid phytocenoses in the contact zone with the agrocenoses: a system control model-based approach // *Eur. J. Mol. Biotech.* 2018. Vol. 6 (1). P. 53-60.
4. Drenovsky R.E., Grewell B.J., D'Antonio C.M., Funk J.L., James J.J., Molinari N., etc. A functional trait perspective on plant invasion // *Annals of Botany.* 2012. Vol. 110 (1). P. 141-153.
5. Новочадов В.В., Иванцова Е.А., Крылов П.А., Онистратенко Н.В., Холоденко А.В. Исследование металлзависимых белков доминирующих видов растений и микроорганизмов в аридных агробиоценозах Волгоградской области // *Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 3: Экономика. Экология.* 2018. Т. 20, № 4 (16). С. 173-182.
6. Каркон М.М. Оценка точности визуального дешифрирования растительного покрова на основе вегетационных индексов // *Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.* 2016. Т. 60, № 4. С. 90-93.
7. Dragos C.G., Rehak M. Hyperspectral remote sensing of crop properties with unmanned aerial vehicle // *Institute of Agricultural Sciences.* 2015. Vol. 1. P. 1-4.
8. Zefferman E., Stevens J.T., Charles G.K., Dunbar-Irwin M., Emam T., Fick S., etc. Plant communities in harsh sites are less invaded: a summary of observations and proposed explanations // *AoB Plants.* 2015. Vol. 7(1). plv056.
9. Ma Y., Oliveira R.S., Freitas H., Zhang C. Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: relevance for phytoremediation // *Frontiers in Plant Science.* 2016. Vol. 7. e918.
10. Pasternak Z., Al-Ashhab A., Gatica J., Gafny R., Avraham S., Minz D., etc. Spatial and temporal biogeography of soil microbial communities in arid and semiarid regions // *PLoS One.* 2013. Vol. 8 (7). e69705.
11. Кульба В.В., Кононов Д.А., Чернов И.В., Рощин П.Е., Шулигина О.А. Сценарное исследование сложных систем: анализ методов группового управления // *Управление большими системами.* 2010. № 30-1. С. 154-186.
12. Кульба В.В., Шелков А.Б., Чернов И.В. Региональная безопасность: сценарный анализ эффективности управления в чрезвычайных ситуациях // *Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2016: Труды Девятой междунар. конфер.: в 2-х томах.* М.: ИПУ РАН. 2016. С. 139-150.