
СИСТЕМНИЙ ПІДХІД У ҐРУНТОЗНАВСТВІ

УДК 581.5

С. В. Чернышенко

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К РЕКУЛЬТИВАЦИИ: ПЛАНИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ РАЗВИТИЯ ВО ВРАЖДЕБНОЙ СРЕДЕ

С. В. Чернышенко

Дніпропетровський національний університет

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО РЕКУЛЬТИВАЦІЇ: ПЛАНУВАННЯ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ РОЗВИТКУ У ВОРОЖОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглянуто питання оптимального планування рекультивацийних робіт на основі використання методів математичного моделювання та оптимального керування. Використовується модель розвитку у ворожому середовищі, яка дозволяє описувати розвиток систем з двома критичними рівнями щільності. Показано, що оптимальним є нелінійний характер проведення рекультивацийних робіт.

Ключові слова: рекультивация, математична модель, оптимальне управління, ґрунтовий блок.

S. V. Chernyshenko

Dnipropetrovsk National University

SYSTEM APPROACH TO RESTORATION: PLANNING ON THE BASE OF THE MODEL OF DEVELOPMENT IN HOSTILE ENVIRONMENT

Problems of optimal planning of restoration on the base of mathematical modelling and optimal control methods are considered. The model of development in hostile environment is used. It gives possibility to describe development of systems with two critical levels of density. It is shown that nonlinear character of restoration is optimal.

Key words: restoration, mathematical model, optimal control, soil block.

Модель развития во враждебной среде описывает динамику экологической системы, для успешного развития которой необходимо преодоление некоторой критической численности. Это полностью соответствует ситуации с лесной рекультивацией в условиях степи: для начала функционирования лесных круговоротов должны быть обеспечены некоторые минимальные площадь и плотность лесопосадок.

Особенно важным, как известно из практики лесной рекультивации, является восстановление почвенного блока. Круговороты начинают работать только тогда, когда развитие почвы превосходит определенный критический уровень.

Ставится задача использовать модель развития во враждебной среде для выработки некоторых общих рекомендаций относительно планирования рекультивационных работ. Для этого рассматриваются некоторые постановки задач оптимального управления, такие как управление с минимальными затратами, оптимальное быстрое действие и т. п.

© Чернышенко С. В., 2008

Актуальность темы определяется актуальностью лесной рекультивации в условиях степной зоны Украины. Использование рекомендаций, полученных методом математического моделирования, может дать существенный практический эффект. Для перспективности посадки основным требованием является «запуск» круговорота химических элементов и потоков энергии, характерных для природных БГЦ. Отсутствие необходимых видов – особенно среди продуцентов и редуцентов – приводит к изначальной ущербности экосистемы, которая не сможет органично развиваться (Основы лесной биогеоценологии, 1964). Представляется перспективным использование, при осуществлении рекультивации, моделей, описывающих основные параметры круговорота элементов и потоков энергии в БГЦ. Реализованные на компьютере модели позволяют «проигрывать» варианты с различными начальными данными, определять «узкие места» круговоротов, которые затем можно попытаться устранить. Даже не очень точные модели могут уменьшить количество «ошибок» при традиционном методе «проб и ошибок», к которому приходится прибегать в практике рекультивации.

Оптимизационные аспекты рекультивации могут рассматриваться как часть такой комплексной дисциплины, как техногенная биогеоценология (Травлеев, 1989) – науки, направленной на изучение техногенного влияния на биогеоценозы и, в конечном счете, на условия человеческой жизни. Важнейшая часть этой науки связана с проблемами рекреации, возобновления и рекультивации естественных биогеоценозов, а также создания устойчивых и долговечных искусственных биогеоценозов. Особую остроту эффективное планирование и организация рекультивационных работ приобретает при воссоздании биогеоценозов в азональных условиях, как это имеет место в степном лесоведении (Бельгард, 1973; Травлеев, 1987).

Задача рекультивации состоит в воссоздании природного биогеоценоза, однако последний не может быть воссоздан искусственно в полном объеме. Речь идет о восстановлении (и то частичном) лишь некоторых (основных) элементов в надежде, что дальнейшую работу по восстановлению БГЦ как целого возьмет на себя природа. Однако какие элементы считать «основными»? Опыт показывает, что воссоздание верхнего слоя почвы и популяции дерева-автотрофа не приносит нужного результата автоматически (Белова, 1999). Даже если ограничиться этими двумя мероприятиями, необходимо решать задачу о выборе таких параметров, как мощность слоя почвы, ее состав, вид дерева и др.

Научный подход к организации рекультивационных работ должен базироваться на кибернетических принципах (Глушков, 1964), которые предполагают рассмотрение реальных объектов как динамических систем и использование методов управления (Глушков, 1974). Проблемам использования математических методов оптимального управления в экологии посвящена обширная литература (Заславский, 1988; Модели управления ..., 1981; Новоселов, 1978; Тимченко, 1999). Некоторые из рассмотренных методов носят универсальный характер (Динамическая теория ..., 1974), однако их использование для оптимизации рекультивации еще предстоит. Некоторые результаты представлены в работе С. В. Чернышенко (2003).

1. Принципы системного анализа и динамическая модель процесса рекультивации лесных биогеоценозов

Рекультивация нарушенных экосистем представляет собой комплексную многофакторную проблему. Ее сложность определяется многими обстоятельствами. Одним из основных факторов сложности является тот факт, что природный биогеоценоз представляет собой многокомпонентную систему, каждый элемент которой обладает уникальными свойствами и в то же время интенсивно взаимодействует с другими элементами. При рассмотрении проблем рекультивации, так же как и других областей биогеоценологии, естественно применять системный подход и использовать как важный инструмент методы математического моделирования.

Природные экосистемы характеризуются сложной динамикой, частично объясняющейся внешними воздействиями (суточные, годовые ритмы и т. п.), а частично связанной с присущими экосистемам процессами саморазвития (Krebs, 1994). Ком-

пьютерное моделирование последствий тех или иных стратегий рекультивации должно включать не только статическое описание функционирования биогеоценоза в некоторый момент времени, но обязательно опираться на реалистичные модели его динамики.

Рекультивационные работы состоят, во-первых, в проектировании и реальном воплощении абиотических и биокосных лесорастительных условий, необходимых для существования БГЦ (в первую очередь – структуры грунта и почвы); во-вторых, в проектировании и проведении лесопосадочных работ и внедрении выбранных видов микроорганизмов и животных; и, в-третьих, в проведении лесокультурных мероприятий в ходе становления БГЦ.

С формально-логической точки зрения в процессе рекультивации естественно выделять два вида мероприятий: непосредственно связанных с увеличением биомассы БГЦ (лесопосадочные работы, интродукция новых особей) и способствующих улучшению лесорастительных условий (мелиоративные работы и лесокультурные мероприятия). Кроме того, в отдельную категорию должны быть выделены предварительные работы по подготовке биотопа и почвенных условий (корректировка микрорельефа, создание подпочвенного и почвенного слоев и т.п.) Последние работы предшествуют воссозданию и развитию биогеоценоза и выходят за рамки динамических моделей БГЦ.

Ниже будут использованы простейшие модели, описывающие динамику биогеоценоза – модель экспоненциального роста, логистическая модель, модель развития во враждебной среде. Хотя, естественно, они дают лишь схематичное описание динамики БГЦ, все же интегральный учет динамики системы может существенно дополнить традиционные методы, базирующиеся на статической оценке текущего состояния БГЦ или биотопа.

В качестве простейшей модели рекультивации представим уравнение

$$\frac{dx}{dt} = (u(t) - a(t)) \cdot x + v(t), \quad (1)$$

которое будем рассматривать на промежутке времени $[t_0, T]$, и дополним начальным условием

$$x(t_0) = x_0. \quad (2)$$

Основная характеристика БГЦ $x(t)$ в данной модели представляет собой некоторую количественную характеристику его состояния в ходе рекультивации. Например, это может быть величина биомассы или количество достигших зрелости древесных растений на единицу площади.

В качестве управляющих воздействий рассмотрим функции: «функцию внедрения» $v(t)$ – интенсивность внедрения новых особей (в первую очередь в ходе лесопосадок) и «функцию ухода» $u(t)$ – интенсивность работ по улучшению лесорастительных условий (мелиорация и/или лесокультурные мероприятия).

Важным является вопрос выбора критерия качества управления, который должен оценивать материальные затраты на рекультивацию. Например, может использоваться следующий квадратичный критерий качества:

$$I[u, v] = \int_0^T (\alpha_u u^2(t) + \alpha_v v^2(t)) dt. \quad (3)$$

Требуется минимизировать затраты $I[u, v]$. При этом основным требованием к динамике системы является достижение к моменту времени T некоторого заданного уровня

$$x(T) = x_T. \quad (4)$$

Более общим является множество требований к параметрам БГЦ не только в конечный момент времени, но и в некоторые промежуточные моменты:

$$x(t_i) = x_i, \quad t_i < T, \quad i = \overline{1, n-1}. \quad (5)$$

Иначе говоря, имеются требования к уровню развития лесного биогеоценоза. Эти требования должны быть выполнены в ходе рекультивации, и при этом затраты на последнюю должны быть настолько малы, насколько это возможно.

2. Использование для оптимального планирования рекультивации модели развития во враждебной среде

Воспользуемся для описания процесса рекультивации моделью развития во враждебной среде (Чернышенко, 2000):

$$\frac{dx}{dt} = r \left(1 - \left(\frac{2x - K - C}{K - C} \right)^2 \right) x. \quad (6)$$

В отличие от логистической модели, которая имеет одно устойчивое (равное K) и одно неустойчивое (нулевое) положение равновесия, модель (6) имеет два устойчивых (K и нулевое) и одно неустойчивое (C) положения равновесия. То, в какое из устойчивых положений равновесия попадет БГЦ, зависит от его текущей биомассы x . Если это значение меньше C , то биомасса будет стремиться к нулю, если больше – точкой притяжения окажется K . При $C=0$ динамика уравнения (6) сходна с динамикой обычного логистического уравнения.

Уравнение (6) описывает ситуацию, когда при малой биомассе БГЦ не может существовать и для успешного развития ему нужно достичь некоторого критического уровня, задаваемого параметром C . В качестве «враждебной среды» выступают неблагоприятные абиотические условия. Биогеоценоз должен иметь некоторую начальную биомассу, достаточную, чтобы достичь необходимого для дальнейшего развития средообразующего эффекта.

При управлении путем лесонасаждений на основе модели (6) записываем:

$$\frac{dx}{dt} = r \left(1 - \left(\frac{2x - K - C}{K - C} \right)^2 \right) \cdot x + v(t). \quad (7)$$

При $v \neq 0$ среди трех положений равновесия уравнения (7) ни один не равен нулю, что затрудняет их поиск (необходимо решать кубическое уравнение). Естественно, при малых v наблюдается тот же эффект «переключения», что и в случае модели (6).

Применение к модели (7) метода пошаговой линеаризации дает формулу

$$\frac{dx}{dt} = \left(r - \lambda \left(x_i - \frac{K + C}{2} \right) \right) \left(3x_i - \frac{K + C}{2} \right) \cdot x + v(t) + 2\lambda \left(x_0 - \frac{K + C}{2} \right) x_i^2, \quad (8)$$

где

$$\lambda = 4r / (K - C)^2. \quad (9)$$

В упрощенном виде уравнение (8) можно переписать:

$$\frac{dx}{dt} = \left(r - \lambda \left(x_i - \frac{K + C}{2} \right)^2 \right) \cdot x + v(t).$$

Применяя этот подход и используя для ускорения сходимости модификацию обобщенного метода секущих (Чернышенко, 1986), решим задачу (7), (2)–(4) со значениями параметров

$$t_0 = 0; T = 5; x_0 = 1; r = 1; K = 10; C = 2.$$

На рис. 1, 2 приведены результаты расчетов для трех различных требований к биомассе БГЦ в конечный момент времени. Кривые, помеченные цифрой 1, соответствуют значению $x_T = 2$, кривые 2 – значению $x_T = 6$, кривые 3 – значению $x_T = 10$.

Нелинейная динамика, свойственная модели (6), приводит к тому, что рекомендуемая интенсивность лесопосадочных работ носит немонотонный характер. Начальная биомасса $x_0=1$ относится к области притяжения нулевого положения равновесия, поэтому в отсутствие рекультивационных работ биомасса БГЦ стремится к нулю. Тактика рекультивации должна состоять в том, чтобы перевести БГЦ через критическое значение C , после чего начинаются процессы саморазвития и интенсивность рекультивационных работ может снижаться. В зависимости от требований к динамике определяется момент перехода через критическое значение (рис. 1, точки максимума). В первом же случае, когда требуемое значение совпадает с критическим, смены режима не происходит и соответственно управление является монотонным.

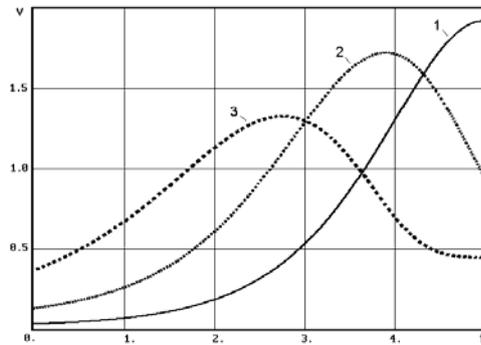


Рис. 1. Оптимальная динамика лесопосадок для модели развития во враждебной среде при различных требованиях к конечной биомассе

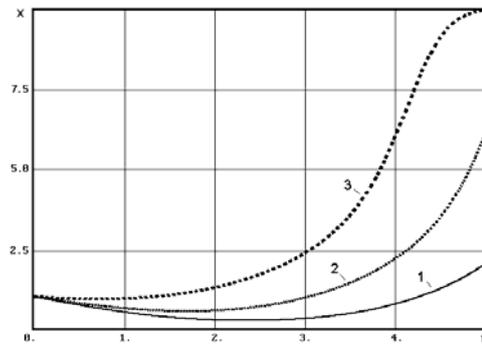


Рис. 2. Динамика биомассы для модели (7) развития во враждебной среде при различных требованиях к ее конечному значению

На рис. 5 показана зависимость затрат на лесопосадку в зависимости от требований к биомассе. В силу стремления системы к нулевому равновесию при малых значениях биомассы управление при малых x_T не требует больших затрат. Максимальные затраты соответствуют значению $x_T = 5$. Затем, поскольку для $x > 2$ система стремится к значению биомассы $K=10$, происходит снижение затрат.

Рассмотрим для модели (6) задачу об управлении путем проведения лесокультурных и мелиоративных работ. Предполагая коэффициент роста БГЦ линейно зависящим от интенсивности рекультивации, получим модель рекультивации в виде

$$\frac{dx}{dt} = r \left(a + u(t) - \left(\frac{2x - K - C}{K - C} \right)^2 \right) \cdot x. \quad (10)$$

Емкость среды определяется формулой

$$x = (K + C) + \sqrt{a + u}(K - C),$$

однако не при любом управлении система будет стремиться к этому положению равновесия. При низкой интенсивности рекультивационных работ u , когда

$$u < \left(\frac{K + C}{K - C} \right)^2 - a,$$

БГЦ будет развиваться и стремиться заполнить экологическую нишу лишь при

$$x > (K + C) - \sqrt{a + u(K - C)},$$

при меньших же начальных численностях БГЦ будет регрессировать даже в случае непрерывной рекультивации.

Применим замену переменной $y = \ln x$. В новых координатах модель принимает вид

$$\frac{dy}{dt} = r \left(a + u(t) - \left(\frac{2e^y - K - C}{K - C} \right)^2 \right)$$

Метод пошаговой линеаризации приводит к использованию формулы

$$\frac{dy}{dt} = -2\lambda x_i \left(x_i - \frac{K + C}{2} \right) \cdot y + r(a + u(t)) + \lambda \left(x_0 - \frac{K + C}{2} \right) \left[x_0 (2 \ln x_0 - 1) + \frac{K + C}{2} \right],$$

где λ определяется соотношением (9).

Была численно решена задача (10), (2), (4) при следующих значениях параметров

$$t_0 = 0; T = 5; x_0 = 1; r = 1; a = 0,3; K = 300; C = 5$$

и при различных требованиях к конечной биомассе. На рис. 3, 4 цифре 1 соответствует $x_T = 1$, цифре 2 – $x_T = 6$, цифре 3 – $x_T = 10$.

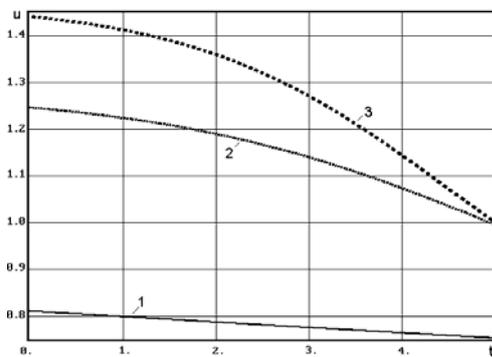


Рис. 3. Оптимальная динамика лесокультурных работ для модели развития во враждебной среде при различных требованиях к конечной биомассе

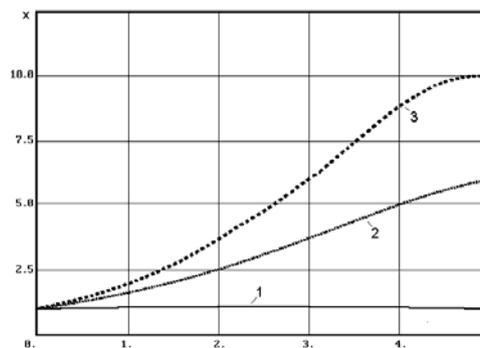


Рис. 4. Динамика биомассы для модели (10) развития во враждебной среде при различных требованиях к ее конечному значению

Следует отметить, что в отличие от моделей, рассматривавшихся ранее, модель развития во враждебной среде приводит к рекомендациям о большей интенсивности лесокультурных работ не в конце, а в начале рекультивации. Это связано, вероятно, с целесообразностью как можно раньше превысить критическое значение, позволяющее «запустить» процессы саморазвития БГЦ.

На рис. 6 изображена зависимость расходов на рекультивацию от требований к биомассе БГЦ. В отличие от случая лесопосадок затраты на лесокультурные работы монотонно растут с увеличением требований к биомассе БГЦ.

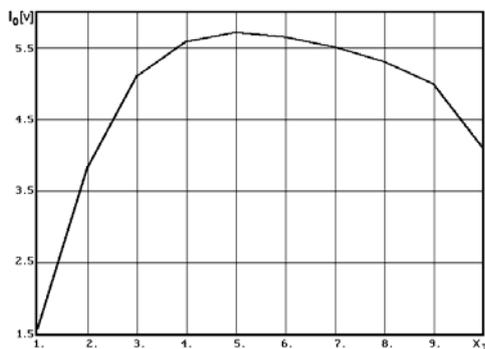


Рис. 5. Зависимость затрат на лесопосадку от требований к конечной биомассе

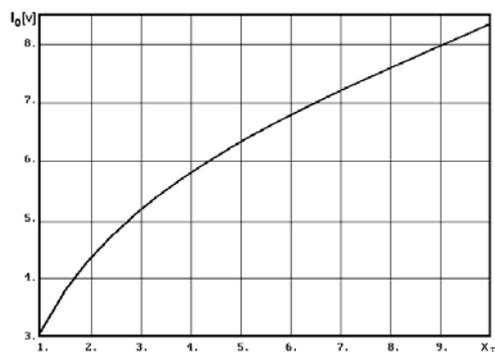


Рис. 6. Зависимость затрат на лесокультурные работы от требований к конечной биомассе

С учетом того что $K > C$, управление введем с помощью формулы

$$K = C + a + u(t).$$

В дальнейшем возможны два подхода к управлению моделью (10).

1. Можно при фиксированном C изменять K , т.е. влиять на емкость среды, не изменяя порога, начиная с которого БГЦ способен к саморазвитию. В этом случае уравнение системы приобретает вид

$$\frac{dx}{dt} = r \left(1 - \left(\frac{2x - a - u(t) - 2C}{a + u(t)} \right)^2 \right) \cdot x.$$

Емкость среды определяется формулой

$$x = C + a,$$

а для успешного развития БГЦ, как и в случае модели (10), необходимо достичь критической биомассы $x = C$.

2. В другом случае можно ставить задачу о повышении устойчивости рекультивируемого БГЦ при неизменной емкости среды. То есть величина K считается фиксированной, а оптимизируется величина порога C . Эта задача сходна с задачей о повышении устойчивости экологической системы (Чернышенко, 1998), хотя принципиально отличается от последней используемым математическим подходом.

Модель можно записать в виде

$$\frac{dx}{dt} = r \left(1 - \left(\frac{2x - 2K + a + u(t)}{a + u(t)} \right)^2 \right) \cdot x.$$

Устойчивое равновесное состояние системы $x = K$ является тем же, что и у модели (10), а пороговое значение начальной численности определяется формулой

$$x = K - a.$$

В обоих случаях в качестве критериев качества может выступать функционал типа (3).

ВЫВОДЫ

Общий вывод, который можно сделать из полученных результатов, состоит в констатации нелинейного характера зависимости параметров рекультивируемой экосистемы от затрат на рекультивацию. Затраты на процесс должны быть распределены

неравномерно, причем характер распределения затрат во времени зависит от исходного состояния системы и требований к ее конечному состоянию.

Кибернетические подходы, основанные на работах В. М. Глушкова (1964), могут быть успешно применены к оптимизации экологических процессов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- Белова Н. А.** Естественные леса и степные почвы (экология, микроморфология, генезис) / Н. А. Белова, А. П. Травлеев. – Д.: ДДУ, 1999. – 348 с.
- Бельгард А. Л.** О процессах адаптации и сylvатизации искусственных лесных биогеоценозов к условиям степной среды / А. Л. Бельгард, А. П. Травлеев // Проблемы лесного почвоведения. – М., 1973. – С. 5-15.
- Глушков В. М.** Беседы об управлении / В. М. Глушков, Г. М. Добров, В. И. Терещенко. – М.: Наука, 1974. – 224 с.
- Глушков В. М.** Введение в кибернетику. – К.: Изд-во АН УССР, 1964. – 324 с.
- Динамическая теория** биологических популяций / Под ред. Р. А. Полуэктова. – М.: Наука, 1974. – С. 456.
- Заславский Б. Г.** Управление экологическими системами / Б. Г. Заславский, Р. А. Полуэктов. – М.: Наука, 1988. – 296 с.
- Модели управления** природными ресурсами / Под ред. В. И. Гурмана. – М.: Наука, 1981. – 264 с.
- Новосельцев В. Н.** Теория управления и биосистемы. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
- Основы лесной биогеоценологии** / Под ред. В. Н. Сукачева, Н. В. Дылиса. – М.: Наука, 1964. – 576 с.
- Тимченко И. Е.** Управление эколого-экономическими системами / И. Е. Тимченко, Е. М. Игумнова, А. А. Прималенный. – Севастополь: Гидрофизика, 1999. – 180 с.
- Травлеев А. П.** Научные основы техногенной биогеоценологии // Биогеоценологические исследования лесов техногенных ландшафтов степной зоны. – Д., 1989. – С. 4-9.
- Травлеев А. П.** Состояние и перспективы исследований лесных биогеоценозов на землях, нарушенных промышленностью // Охрана и рациональное использование защитных лесов степной зоны. – Д., 1987. – С. 4-11.
- Чернышенко В. М.** Необходимые условия оптимальности в методе пошаговой линеаризации при управлении нелинейными системами / В. М. Чернышенко, С. В. Чернышенко // Методы решения нелинейных задач и обработка данных. – Д., 1986. – С. 86-92.
- Чернышенко С. В.** Задачи оптимального управления процессами лесной рекультивации нарушенных земель // Экологія та ноосферологія. – 2003. – Т. 13, № 1-2. – С. 136-150.
- Чернышенко С. В.** Моделирование конкурентных замещений в фитоценозах // Экологія та ноосферологія. – 2000. – Т. 9, № 1. – С. 107-121.
- Чернышенко С. В.** О стабилизации конкурентных межвидовых отношений для вольтеровских систем с неограниченным ростом / С. В. Чернышенко, Н. А. Черная, Е. Н. Шестопалова // Экологія та ноосферологія. – 1998. – Т. 4, № 1-2. – С. 137-140.
- Krebs C. J.** Ecology. – N.Y., Harlow: Addison Wesley, 1994. – 802 p.

Надійшла до редколегії 08.08.08