
УДК 504.3.05

А.В. МАМОНТОВ, А.В. ПРОНЮК

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОПУЛЯЦИЙ ЭКОСИСТЕМЫ ПРИ АНТРОПОГЕННЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Для прогнозирования выживаемости популяций в заданных условиях применяется математическое моделирование, в основе которого лежит модель Лотки-Вольтерра «хищник-жертва». Предлагаются модели, которые учитывают различные формы взаимоотношений между живыми организмами и воздействие антропогенных факторов на экосистему.

Актуальность темы

В последнее время в связи с ухудшающейся экологической обстановкой все большее внимание уделяется экологическому мониторингу и прогнозированию, а главное, методам, которые могли бы прогнозировать результат различных антропогенных воздействий на различные экосистемы. В первую очередь любые антропогенные воздействия сказываются на численности популяций.

Динамика численности и плотности определяется в основном рождаемостью, смертностью и процессами миграции. Это показатели, характеризующие изменение популяции в течение определенного периода: месяца, сезона, года и т.д. Изучение этих процессов и причин, их обуславливающих, важно для прогнозов состояния популяций.

Составной частью мониторинга является прогнозирование состояния окружающей природной среды. Если в экосистеме имеются выбросы химических или радиоактивных веществ, прогнозирование как правило сводится к определению временной зависимости концентрации веществ или уровня радиации (соответственно) на местности. Имеются также статистические данные о выживаемости различных видов живых организмов при известных концентрациях химических веществ в воздухе, воде, почве, пище и их радиоактивной зараженности, полученные в лабораторных условиях. На основании этого можно рассчитать процент выживаемости живых организмов в заданных условиях.

Размеры популяции могут возрастать в результате размножения особей и их иммиграции из других популяций. Размеры популяции могут уменьшаться в результате эмиграции и смертности.

Динамику смертности популяции в зависимости от возраста отображают на кривых выживания. Существуют три основных типа этих кривых: когда главным фактором смертности является естественное старение особей (на рис. 1 эта кривая обозначена буквой А), когда в популяции высока ранняя смертность (Б) и, наконец, когда смертность постоянна в течение всей жизни организмов (В). Кривые выживания конкретных видов могут занимать промежуточные положения между этими крайними формами.

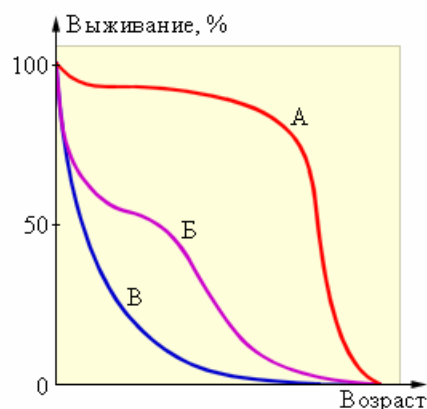


Рис. 1. Кривые выживаемости

Если рождаемость в изолированной популяции превышает смертность, то популяция растёт. В начале кривая роста популяции — это экспонента. Однако рано или поздно питательные запасы в окружающей среде исчерпываются. В одних популяциях уменьшение количества питательных веществ начинает воздействовать на динамику роста загодя, и кривая роста приобретает S-образную форму. В других популяциях бесконтрольный рост численности заходит слишком далеко, после чего происходит катастрофический «обвал» численности, связанный с истощением ресурсов.

Численность популяции может изменяться также в результате изменения внешних условий среды, например, из-за появления большого количества хищников или нехватки пищи. Существуют также внутренние факторы, «сдерживающие» рождаемость; наиболее хорошо изученными из них являются территориальное поведение (защита гнездовой территории от вторжения особей того же вида) и действие перенаселённости, заключающееся в резком уменьшении плодовитости и степени заботы о потомстве.

Причиной массовых вспышек рождаемости в популяциях являются, как правило, погодные факторы. В последнее время к числу причин добавилась деятельность человека. Часто популяции при помощи механизма обратных связей способны регулировать свою численность с тем, чтобы она не превысила предел, за которым наступит катастрофа. Так, гусеницы некоторых бабочек массово гибнут, если выходят из яиц до окончания холодов (когда они погибают от переохлаждения) либо через длительное время после распускания листьев (тогда они погибают от голода). Если гусеницы появляются вовремя, то популяции грозит перенаселение; в это время в действие вступает второй лимитирующий фактор — например, хищники или паразиты. В данном случае действие регулирующего фактора зависит от плотности популяции.

В реальных условиях отдельные пищевые цепи переплетаются, складываясь в пищевые сети. На численность, например, и волков, и кроликов оказывают влияние эпидемии, погодные условия, взаимодействия с другими популяциями, деятельность человека.

Популяции, находящиеся на разных трофических уровнях, могут вступать во взаимоотношения хищник–жертва. Во многих случаях циклические колебания численности популяции хищника сдвинуты по фазе по отношению к колебаниям численности популяции жертвы. Это можно объяснить тем, что возрастание численности хищника приводит к резкому снижению численности жертвы, вслед за чем в результате голода уменьшается количество хищников. Это позволяет снова вырасти числу жертв, после чего начинает расти количество хищников. Характерный период таких циклов обычно составляет несколько поколений.

Для исследования динамики популяций достаточно интенсивно используется математическое моделирование. В данной работе *в целях* повышения точности прогнозирования предлагается использовать математические модели, позволяющие одновременно учитывать различные экологические факторы и формы взаимоотношений между живыми организмами.

В ходе работы моделируется динамика популяций экологической системы в зависимости от времени и антропогенных воздействий, отражается гомеостаз экологической системы в изменяющихся условия окружающей среды.

Разработка математических моделей

Среди количественных показателей популяций выделяют две группы – статические и динамические. Статические показатели характеризуют состояние популяции на данный момент времени. К статическим показателям популяций относятся их численность, плотность и показатели структуры. Динамические показатели характеризуют процессы, протекающие в популяции за определенный промежуток времени. К ним относятся: рождаемость, смертность и скорость роста популяций [1-3].

Важную роль в процессе выживания играют экологические факторы, которыми называют любые элементы среды, влияющие на существование и развитие организмов и на которые организмы реагируют реакциями приспособления. Экологические факторы подразделяются на абиотические (физические, химические и эдафогенные), биотические (зоогенные, микробиогенные и фитогенные) и антропогенные (загрязнение окружающей среды, чрезмерный промысел, опустынивание и т. д.). Выделяют различные формы биотических отношений между видами: травоядность, хищничество, паразитизм, конкуренция, комменсализм, аменсализм, протокооперация, нейтрализм, мутуализм.

Рассмотрим схему системы «травя-зайцы-лисы», которая отражает травоядность и хищничество (рис. 2).

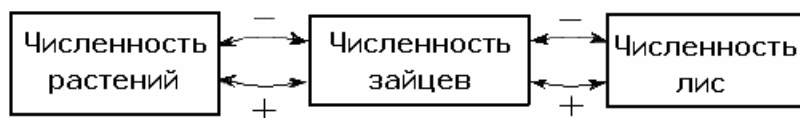


Рис. 2. Упрощенная кибернетическая схема системы «травя-зайцы-лисы»

Математическая модель данной системы представлена в виде системы дифференциальных уравнений (1). В ее основу положена классическая модель Лотки-Вольтерра «хищник-жертва» [4, 5]:

$$\begin{cases} \frac{dy_0}{dt} = Ay_0 - By_0y_1 - Cy_0 \\ \frac{dy_1}{dt} = Dy_0y_1 - Ey_1y_2 - Fy_1 \\ \frac{dy_2}{dt} = Gy_1y_2 - Hy_2 - Iy_2 \end{cases} \quad (1)$$

где y_0, y_1, y_2 – численность популяций, соответственно, травы (одного условного вида), зайцев и лис, у. е. (например, тыс.); t – безразмерное время; A – коэффициент, характеризующий размножение растений под воздействием абиотических факторов (температура, количество влаги; состав почв; B – коэффициент, характеризующий поедание травы и зависящий от физиологической потребности зайцев в данном корме; C – коэффициент, характеризующий гибель (смертность) растений из-за антропогенных факторов (загрязнение, выкашивание, вспашка и т. д.); D – коэффициент, характеризующий рождаемость зайцев; E – коэффициент, характеризующий скорость поедания зайцев лисами и зависящий от физиологической потребности лис в данном корме; F – коэффициент, характеризующий смертность зайцев из-за антропогенных факторов (охота, загрязнения ОС); G – коэффициент, характеризующий размножение лис; H – коэффициент, характеризующий смертность лис по естественным причинам (болезни, старость и т. п.); I – коэффициент, характеризующий смертность лис из-за антропогенных факторов.

Коэффициенты А, D и G еще называют репродуктивными потенциалами соответствующих видов.

В данной модели трава (растения одного вида) считается основной пищей зайцев, без которой они не смогут существовать длительно. Аналогично, зайцы считаются основной пищей лис. Естественной причиной смертности зайцев считаются лисы, у которых нет естественных врагов. Скорость поедания травы зайцами пропорциональна произведению их количеств ($B y_0 y_1$). Аналогично, скорость поедания зайцев лисами пропорциональна произведению их количества на количество растений ($E y_1 y_2$). Скорость размножения зайцев пропорциональна произведению их количества на количество растений ($D y_0 y_1$), а скорость размножения лис пропорциональна произведению их количества на количество зайцев ($G y_1 y_2$).

Размножение растений приводит к росту популяции зайцев, который приводит к снижению первого. Аналогично, рост популяции зайцев приводит к росту популяции лис, который приводит к уменьшению численности зайцев. В этом проявляется саморегуляция экосистемы.

Интересным является вопрос об отыскании точек покоя (равновесия) всей системы, ее бифуркационных параметров, которые показывают критические соотношения коэффициентов рождаемости и смертности особей и, соответственно, пороговые значения между вымиранием популяции и демографическим взрывом.

На рис. 3 приведена кибернетическая схема, отражающая внутривидовую конкуренцию растений (борьба за воду, свет, жизненный простор), травоядность и хищничество.

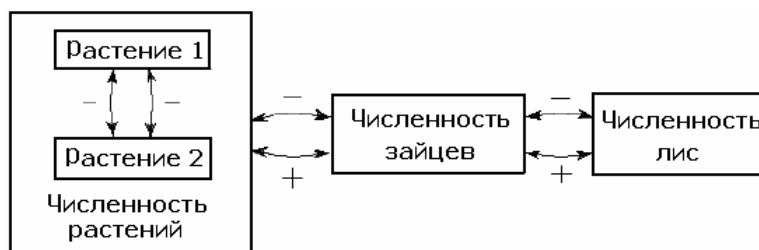


Рис. 3. Кибернетическая схема системы «трава-зайцы-лисы»

Математическая модель этой системы представлена уравнениями:

$$\begin{cases} \frac{dy_0}{dt} = Ay_0 - By_0y_1 - Cy_0 - Ky_0^2, \\ \frac{dy_1}{dt} = Dy_0y_1 - Ey_1y_2 - Fu_1, \\ \frac{dy_2}{dt} = Gy_1y_2 - Hy_2 - Iy_2 \end{cases}, \quad (2)$$

где K – коэффициент, определяющий внутривидовую конкуренцию растений.

Как видно из системы уравнений (2), внутривидовая конкуренция растений отражена здесь отрицательным квадратичным членом (растения ограничивают сами себя) [4].

Рассмотренные естественные процессы могут быть нарушены антропогенными факторами, которые в данной работе представлены функциями времени $V(t)$. На рис. 4 показаны два вида этих функций.

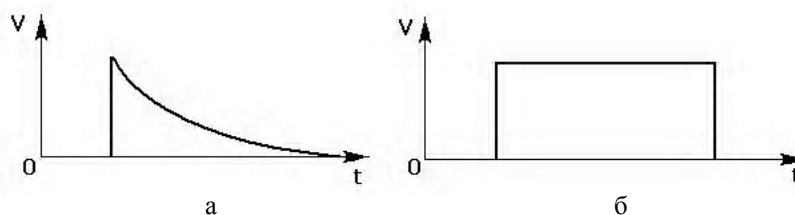


Рис. 4. Функции антропогенных воздействий

На рис. 4,а изображена функция антропогенного воздействия, которое начинает оказывать влияние на экосистему или отдельную популяцию в определенный момент времени, а потом постепенно затухает. К таким воздействиям можно отнести химическое или радиоактивное загрязнение окружающей среды, которое распадается с течением времени. Так, воздействие на экосистему при радиоактивном заражении местности следует представить экспоненциальным законом (основным законом радиоактивного распада). Аналогично можно поступить в случае химических загрязнений окружающей среды.

Одноразовое радиоактивное или химическое загрязнение, снижающее размножение растений, в работе нужно представить слагаемым $CV(t)y_0$ (третье слагаемое первого уравнения систем (1),(2)). Одноразовое химическое или радиоактивное загрязнение растений, снижающее рождаемость травоядных, следует представить слагаемым $D(1 - V(t))y_0y_1$ (первое слагаемое второго уравнения систем (1),(2)). Одноразовое химическое или радиоактивное загрязнение, вызывающее одновременно снижение рождаемости и смертность животных, нужно представить, соответственно, слагаемыми $D(1 - V(t))y_0y_1$, $FV(t)y_1$, $G(1 - V(t))y_1y_2$, $IV(t)y_2$.

На рис. 4,б изображена функция антропогенного воздействия, которое начинает оказывать влияние в определенный момент времени, остается постоянным на протяжении определенного периода времени, а затем прекращается. Такую функцию можно применить при выкашивании трав, выпасе скота ($CV(t)y_0$) или охоте ($FV(t)y_1$, $IV(t)y_2$), когда в течение определенного периода времени истребляется постоянное количество живых организмов.

Полное уничтожение (истребление) растений или животных можно представить нулевым значением их численности в начальный момент времени ($y_0 = 0$; $y_1 = 0$; $y_2 = 0$).

Решение представленных систем уравнений можно реализовать в системе Mathcad, пример такого решения показан на рис. 5.

Полученные графики и фазовый портрет системы (рис. 6) полностью совпада-

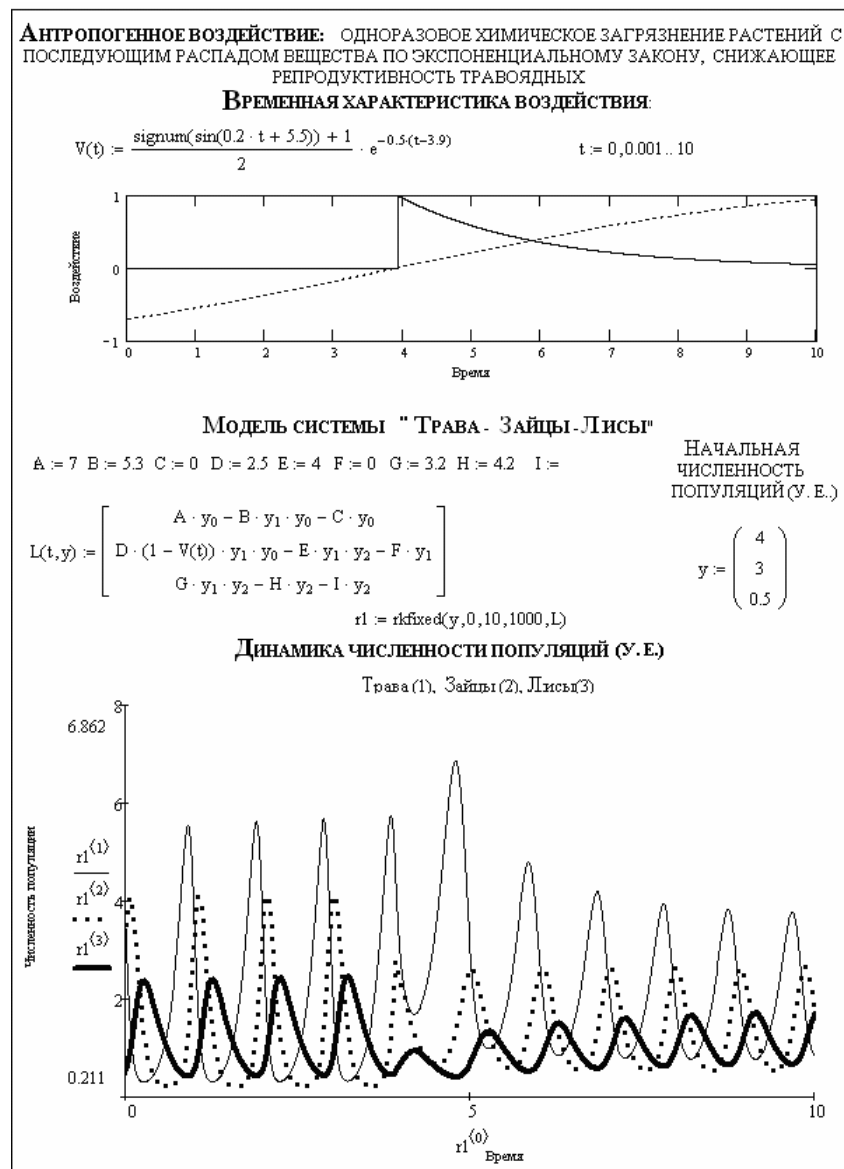


Рис. 5. Динамика популяций экосистемы (среда Mathcad)

ют с теоретическими данными [1, 5].

Следует отметить, что математические модели (1,2), применяемые в данной работе, являются весьма упрощенными и отражают самые общие закономерности динамики популяций. В целях наглядности и упрощения анализа результатов здесь не учтены: другие биологические виды, продолжительность жизни организмов, смена времен года, паразитизм и некоторые другие особенности.

Рассмотренные модели могут быть применимы к социальной экологии и описывать поведение конкурирующих фирм, рост народонаселения, численность воюющих армий, изменение экологической обстановки, развитие науки и пр.

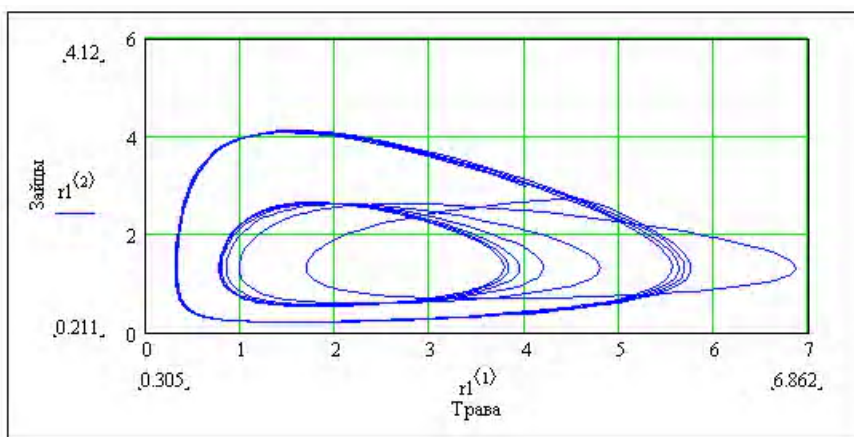


Рис. 6. Фазовый портрет подсистемы «трава-зайцы» (Mathcad)

Выводы

В результате моделирования можно делать выводы о гомеостазе экосистемы, действующих экологических факторах и законах, а также о допустимости антропогенных факторов с точки зрения выживаемости популяций. Составлены модели, учитывающие различные формы взаимоотношений между живыми организмами и экологическими факторами комплексно, в результате чего возможен более точный прогноз состояния популяций.

С помощью разработанных моделей можно делать заключение о допустимости антропогенного воздействия на экосистему, при котором численности популяций не достигнут критических значений, ниже которых они обречены на вымирание.

Список литературы: 1. *Николайкин Н. И.* и др. Экология. Учебник для вузов. М.: Дрофа, 2006. 622 с. 2. *Коробкин В.И.* и др. Экология. Ростов н/Д: «Феникс», 2001. 575 с. 3. *Стадницкий Г.В.* и др. Основы экологии. М.: Высш. Шк., 1988. 271с. 4. *Білявський Г.* та ін. Основи екологічних знань. К.: Либідь, 2000. 334 с. 5. *Шилов И.А.* Экология. М.: Высшая школа, 2003. 512 с.

Поступила в редколлегию 16.03.2009

Мамонтов Александр Викторович, ст. преподаватель кафедры охраны труда ХНУРЭ. Научные интересы: экологический мониторинг, разработка и оптимизация средств защиты от воздействия антропогенных факторов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-60.

Пронюк Анна Валериевна, канд. техн. наук, доцент кафедры охраны труда ХНУРЭ. Научные интересы: анализ экологической обстановки производственной и окружающей среды. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 702-13-60.