

Групповая динамика в агентной модели популяции

Белотелов Н.В.¹, Коноваленко И.А.², Назарова В.М.³

¹ФИЦ ИУ РАН Вычислительный центр им. А.А. Дородницына

²ФГАОУ ВПО Московский физико-технический институт (государственный университет)

³ФГБОУ ВО Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

Belotel@mail.ru

В работе исследуются особенности групповой динамики особей-агентов в компьютерной модели популяции животных, взаимодействующих между собой и с возобновимым ресурсом. Модельная популяция состоит из совокупности особей. Каждая особь характеризуется своей массой, которая отождествляется с энергией. В ней подробно описана динамика энергетического баланса особи. Ареал обитания моделируемой популяции представляет собой прямоугольную область, на которой равномерно произрастает ресурс. Описываются различные компьютерные эксперименты, проведенные с моделью при различных значениях параметров и начальных условиях. Основной целью проведения этих вычислительных экспериментов было изучение групповой (стадной) динамики особей. Выяснилось, что в достаточно широком диапазоне значений параметров и при введении пространственных неоднородностей ареала групповой тип поведения сохраняется. Численно были найдены значения параметров модельной популяции, при которых возникает режим пространственных колебаний численности.

Ключевые слова: компьютерная модель, клеточные автоматы, пространственно-временная динамика, пространственные колебания.

Group dynamics in the agent model of the population

Belotelov N.V.¹, Konovalenko I.A.², Nazarova V.M.³

¹Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS FIC (IU) RAS

²Moscow Institute of Physics and Technology (state university)

³Bauman Moscow State Technical University

The paper investigates the features of group dynamics of individuals-agents in the computer model of the animal population interacting with each other and with a renewable resource. The model population consists of a set of individuals. Each individual is characterized by its mass, which is identified with energy. It describes in detail the dynamics of the energy balance of the individual. The habitat of the simulated population is a rectangular area where the resource grows evenly. Various computer experiments carried out with the model under different parameter values and initial conditions are described. The main purpose of these computational experiments was to study the group (herd) dynamics of individuals. It was found that in a fairly wide range of parameter values and with the introduction of spatial inhomogeneities of the area, the group type of behavior is preserved. The values of the model population parameters under which the regime of spatial oscillations of the population occurs were found numerically.

Key words: computer model, cellular automata, space-time dynamics, spatial

1. Основной раздел

Моделирование пространственно-временной динамики популяции, исходя из особенностей индивидуальных эколого-физиологических и эволюционных характеристик особей, в настоящее

время является одной из актуальных задач популяционной экологии. Такого рода модели, в ряде случаев, представляют большой практический интерес, например при анализе антропогенных нагрузок на заповедные и особо охраняемые территории [1].

Исторически модели популяционной экологии опирались на аналогии, заимствованные из химической кинетики. Фазовыми переменными в таких моделях являлись численности (плотности) особей [2, 3]. В рамках этого подхода по-новому взглянуть на процесс формирования таких явлений, как вспышки численности насекомых, пространственно-временные колебания численности животных и др. В настоящее время пространственные аспекты динамики популяций описываются, как правило, уравнениями в частных производных параболического типа (обычно реакция – диффузия) [4, 5]. Реже используются так называемые компартментальные модели, основанные на дискретизации ареала обитания [5]. Для учета нелокальных взаимодействий используют интегральные уравнения [6, 7]. Серьезным недостатком перечисленных выше моделей является то, что параметры и функции, моделирующие демографические процессы и процессы пространственных перемещений особей, а также взаимодействие между ними не позволяют учитывать физиологические особенности особей различных видов.

В каком-то смысле альтернативным подходом непрерывному описанию динамики популяции является агентное, индивидуально-ориентированное моделирование, основанное на использовании дискретного описания. Они могут порождать разнообразные динамические режимы. С помощью такого подхода достаточно легко формализуются понимаемые биологами эмпирические закономерности, связанные с описанием жизненного цикла особей, их взаимодействия между собой, а также с окружающей средой. Они легко алгоритмируются, поскольку сам процесс создания таких моделей заключается, по сути, в создании алгоритма изменений состояния моделируемых объектов. Самый серьезный их недостаток связан с практически полным отсутствием аналитических методов исследования моделей, что вызывает трудности при анализе, получаемых результатов вычислительных экспериментов.

В данной работе численно исследуются определенный тип решений, который мы называем групповым или стадным, обнаруженный в агентной модели «ресурс–потребитель», которая была предложена авторами ранее [8]. Основной целью моделирования является изучение влияния различных эколого-физиологических параметров, описывающих особь, а также характеристик ресурса, на формирование группового пространственно-временных режима поведения популяции.

2. Описание модели

Модельная компьютерная популяция состоит из совокупности особей – агентов. Каждая особь характеризуется своей массой, которую мы

тракуем расширенно, а именно: мы считаем, что она тождественна энергии и тратится при различных физиологических процессах, таких как движение, размножение и других. В модели учитываются энергозатратные процессы: основной метаболизм, энергетические затраты на перемещение, рождение и выкармливание потомства, учитывается изменение «энергоэффективности» функционирования при старении особи.

Ареал обитания моделируемой популяции, на котором произрастает ресурс, является прямоугольной целочисленной решёткой ($i = 1, \dots, L, j = 1, \dots, F$). Считается, что количество ресурса в каждой точке ограничено предельным значением H . При его уменьшении за счет выедания особями популяции он с постоянной скоростью за такт K восстанавливается до предельного значения. Уравнения роста ресурса имеют вид:

$$m_{t+1}^{i,j} = \min \begin{cases} m_t^{i,j} + K^{i,j} - \theta_t^{i,j} \\ H - \theta_t^{i,j} \end{cases},$$

где $m_t^{i,j}$ – количество ресурса в точке (i, j) в момент времени t , а $\theta_t^{i,j}$ – доля изъятия ресурса, если в точке (i, j) в данный момент есть особи.

В ареале находится некоторое множество подвижных особей. Каждая особь описывается следующим вектором состояния в момент времени t : координатами в ареале (i, j) , возрастом τ , массой n_t^τ . Используя данные натурных исследований (методами троплений, визуальных наблюдений за рядом видов зверей [9, 10], свидетельствующих о дискретном, векторном стереотипе перемещения зверей, мы ввели в модель показатель радиуса индивидуальной подвижности R (максимальное расстояние, преодолеваемое особью за один такт), а также радиуса обзора r – параметра, необходимого для описания действий особей-агентов при обнаружении и достижении пищевых объектов. В модели считается, что радиус индивидуальной подвижности и радиус обзора постоянны для всех особей и не зависят от возраста. Учитываются следующие процессы, меняющие состояние особи: рождение, старение, потребление ресурса, гибель, перемещение по ареалу.

Процесс старения увеличивает возраст особи в каждом цикле на единицу. Процесс потребления ресурса ($\theta_t^{i,j}$) зависит от возраста и текущей массы. В модели считается, что с возрастом потребление ресурса уменьшается в соответствии с выражением

$$\theta_t^{i,j} = C_1 m_t^{i,j} n_{t,\tau}^{i,j} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \left(1 - \frac{n_{t,\tau}^{i,j}}{N}\right),$$

где C_1, T, N – некоторые постоянные, характеризующие физиологические рассматриваемых животных (C_1 – коэффициент, учитывающий энергетическую ценность ресурса, T – предельный возраст, N – предельная масса). Считается, что гибель особи определяется условием недостатка «энергии» (ресурса) ($n_{t,\tau} \leq 0$), которая необходима

для поддержания затрат на основной метаболизм. Процесс рождения особей в модели описан следующим образом. По достижении определенного размера особь в соответствии с распределением Бернулли со средним значением ζ случайным образом порождает другую особь нулевого возраста и имеющую треть массы материнской особи, при этом материнская особь теряет половину своей текущей массы, которая тратится на выкармливание потомства. Перемещение особи S за один временной такт ограничивается радиусом индивидуальной активности ($S < R$) и при этом теряется часть «энергии» $C_2 n_{t,\tau} S$, имеющейся у особи (об алгоритме выбора направления перемещения будет сказано ниже). Уравнение баланса «энергии» записывается следующим образом:

$$n_{t+1,\tau+1}^{k,m} = n_{t,\tau}^{i,j} + \theta_t^{i,j} - C_2 n_{t,\tau}^{i,j} S - \alpha n_{t,\tau}^{i,j} \beta - \lambda(\zeta) \frac{n_{t,\tau}^{i,j}}{2},$$

где $C_2 n_{t,\tau} S$ – затраты на перемещение; $\alpha n_{t,\tau}^{i,j} \beta$ – затраты на основной метаболизм; $\lambda(\zeta) \frac{n_{t,\tau}^{i,j}}{2}$ – затраты на рождение ($\lambda(\zeta) = 1$) – происходит рождение в момент времени $t = \zeta$, в противном случае $\lambda(\zeta) = 0$. В модели считается, что рождение происходит в среднем один раз за некоторый период времени. Алгоритм вычисления значений новых координат особи k, m при перемещения будет описано ниже.

В программе допускается, что в узле может одновременно находиться несколько особей (Lk). В этом случаи функция изъятия ресурса имеет вид:

$$\theta_t^{i,j} = \sum_{l=1}^{Lk} \theta_{t,l}^{i,j},$$

$$\text{где } \theta_{t,l}^{i,j} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{m_l^{i,j}}{Lk} \\ C_1 m_l^{i,j} n_{t,\tau,l}^{i,j} \left(1 - \frac{\tau_l}{T}\right) \left(1 - \frac{n_{t,\tau,l}^{i,j}}{N}\right) \\ \frac{Lk}{Lk} \end{array} \right\},$$

а индекс l соответствует определенной особи.

В модели предполагается, что существует два фактора, влияющих на движение. Это пищевая активность и активность, связанная с взаимодействием с другими особями, т.е. с социальным поведением. Последнее взаимодействие в дальнейшем будем называть социальным.

Алгоритм пищевой активности заключается в следующем. На каждом такте работы модели особь определяет ближайший к ней участок, на котором находится ресурс. Причем «анализируемая» территория вписывается в круг радиусом обзора r . Особь переходит на найденный участок, если он ближе радиуса индивидуальной активности R , иначе сдвигается на R в его направлении (считается, что всегда справедливо неравенство $R < r$). Если ресурса поблизости нет, выбирается случайное направление.

Социальное перемещение особи возможно, если её масса превышает некоторую минимально фиксированную величину, то есть особь не истощена голодом. Для моделирования социальных взаимодействий мы использовали представление о социальных дистанциях [11–14], представляющих собой, в общем виде, некоторые критические расстояния между особями (или их группами), связанные с характером социального контакта. Сближение на меньшее, чем некоторые из этих дистанций расстояние происходит при формировании особями устойчивой группы, например, при материнско-детских отношениях.

Исходя из данных предпосылок, в модели в окрестностях каждой особи выделены две круговые окрестности (зоны), имеющие радиусы Δ_1 и Δ_2 . Если другая особь находится внутри круга радиуса Δ_1 , то они избегают приближаться друг к другу, а если внутри круга радиуса Δ_2 , то стремятся приблизиться друг к другу. Если справедливо неравенство $\Delta_1 < \Delta_2$, то считается, что в популяции особей нет компактных групп с минимальными социальными дистанциями, например, семей животных, а если реализуется неравенство противоположного смысла, то считается, что такие группы существуют, а именно, особи находящиеся рядом стараются сохранить свою близость. К «чужакам» относятся особи находящиеся вонне круга радиуса Δ_1 .

Подобное «притяжение» и «отталкивание» в модели описывается заданием изменения расстояния между особями на фиксированные величины a и A , соответствующие притяжению и отталкиванию, которые мы в дальнейшем будем называть потенциалами притяжения и отталкивания. В модели итоговое смещение каждой особи является суммой смещений относительно всех остальных особей за такт по вышеописанному правилу. Значение новых координат особи k, m задается функцией:

$$pos_{t+1}^l(k, m) = \begin{cases} pos_t^l(i, j) + \frac{R}{|sm_t^l|} sm_t^l, & |sm_t^l| > R, \\ pos_t^l(i, j) + sm_t^l, & |sm_t^l| \leq R, \end{cases},$$

где

$$sm_t^l = \sum_{e=1, e \neq l}^{L_v} \begin{cases} a \frac{pos_t^l(i, j) - pos_t^e(i, j)}{dis^{l,e}}, & dis^{l,e} < \Delta_1, \\ A \frac{pos_t^l(i, j) - pos_t^e(i, j)}{dis^{l,e}}, & \Delta_1 < dis^{l,e} < \Delta_2, \end{cases}$$

$$\text{а } dis^{l,e} = |i - i_e| + |j - j_e|.$$

Здесь $pos_t^l(i, j)$ – позиция особи l в момент времени t , равная координатам (i, j) , R – максимальная длина прыжка, $dis^{l,e}$ – начальное расстояние между перемещаемой (основной) особью и другой особью, sm_t^l – искомое смещение, L_v – общее количество особей, участвующих во взаимодействии.

Итоговое перемещение, определяемое совместным влиянием пищевого и социального перемещения, устанавливается по следующему правилу: если масса особи меньше некоторой пороговой величины M , то перемещение определяется только пищевой активностью, а если масса превышает это значение, то перемещение определяется только социальной активностью.

3. Результаты численных экспериментов

Модель была реализована в среде MatLab. Программа позволяет изменять все параметры модели, включая размеры участка и начальное пространственно-временное распределение особей по ареалу. Также в программе можно изменять пространственное размещение ресурса и граничные условия. Также помимо очевидных опций для анализа состояния популяции и ареала, таких как визуализация текущего состояния модельного ареала с распределением особей по пространству, временной динамики общей численности популяции с учетом возрастного распределения особей, в программе реализована опция вычисления числа кластеров. Алгоритм кластеризации, позволяющий вычислять количество групп в ареале в определенный момент времени заключается в следующем. В программе используется алгоритм кластеризации «по ширине». [16] Алгоритм позволяет выделять кластеры из особей, если расстояние между какими-то особями в кластере меньше некоторого задаваемого значения δ (во всех расчетах в данной работе $\delta = 4$).

Описанная выше модель при различных значениях параметров и начальных условиях позволяет получить очень большое разнообразие пространственно-временных режимов функционирования. Это и автоволновые решения, которые, как правило, получаются при рассмотрении только пищевого перемещения при отсутствии социального движения; это и различные режимы вымирания популяции в случае несбалансированности демографических процессов популяции и скорости восстановления ресурса. Это и колебательные решения, если анализировать динамику общей численности популяции.

Основной целью численных экспериментов с моделью являлось изучение группового поведения и моделирование возникновения режимов пространственного поведения животных. Во всех численных экспериментах начальная конфигурация состояла из четырех особей, расположенных в точках $(0, 3L, 0, 7F; 0, 7L, 0, 3F; 0, 3L, 0, 3F; 0, 7L, 0, 7F)$.

Для анализа влияния граничных условий на полученный базовый режим были рассмотрены два случая – изолированный ареал и ареал с пропускающими границами. Вычислительный эксперимент показал, что граничные условия слабо влияют на пространственно-временную динамику популяции. Изменение граничных условий

незначительно сказывается на пространственной динамике системы за исключением приграничной области. В дальнейшем все вычислительные эксперименты проводились для непроницаемых границ.

Большой интерес представляет влияние продуктивности ресурса на динамику популяции. Для изучения этого влияния была проведена серия вычислительных экспериментов при различных значениях параметров, характеризующих ресурс – максимального значения ресурса H и скорости его восстановления K . Характерные распределения приведены на рисунке 1.

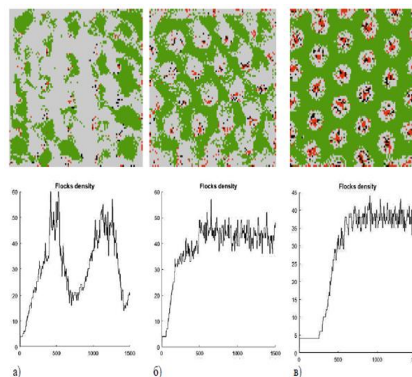


Рис. 1. Распределение особей по ареалу (1500 такт) и временная динамика количества кластеров на нем: а) движение особей при малой скорости восстановления ресурса ($K = 0.01, H = 5$); б) при средней скорости восстановления ресурса ($K = 0.1, H = 10$); в) при большой скорости восстановления ресурса ($K = 0.2, H = 30$).

Очень интересный режим пространственно-временной динамики соответствует рисунку 1. При малой скорости восстановления ресурса в модели наблюдаются пространственный колебательный режим. При увеличении значения H и неизменной скорости восстановления ресурса частота колебаний суммарной численности особей и ресурса понижается. Частота колебаний зависит от доли количества ресурса, восстанавливаемого за такт. Пространственный колебательный режим поведения системы наблюдается для всех случаев, при которых особи полностью занимают весь ареал обитания.

Были проведены эксперименты по анализу влияния изменений радиусов притяжения (Δ_2) и отталкивания (Δ_1) особей при социальном типе движения. При нулевом отталкивании и большем притяжении особи образуют всего несколько стад (от одного до трёх) и просто двигаются по полю. При увеличении радиуса отталкивания особи образуют плотную группу стад в виде кольца со стадом внутри, однако при дальнейшем таком сосуществовании и при малой разнице между радиусами, такая группа превращается в одно большое стадо. И в том и в другом случае особи случайным образом передвигаются по полю в поисках ресурса. При дальнейшем увеличении

радиуса отталкивания (при большем радиусе притяжения) количество стад также увеличивается, насколько это позволяют размеры ареала обитания.

3. Заключение

Исследование группового режима поведения в предложенной агентной модели «ресурс – потребитель», в которой учитывается жизненный цикл особи (агента), позволила получить ряд неожиданных выводов. Прежде всего, выяснилось, что если в модельной популяции между особями преобладают активное социальное взаимодействие, то стадная (групповая) пространственно-временная динамика является достаточно устойчивой. Это показали различные вычислительные эксперименты. Она сохраняется в широком диапазоне значений параметров модели. Граничные условия и различные неоднородности ареала обитания не изменяют групповой характер поведения особей. Более того на коротких временах (эксперимент с «выключенной» рождаемостью) показал, что групповой режим не определяется демографическими процессами, а является следствием социального поведения и характеристик динамики ресурса.

4. Список литературы

1. Musiana M., Anwarb S.M., McDermid G.J., Hebblewhite M. How humans shape wolf behavior in Banff and Kootenay National Parks, Canada. *Ecological Modelling*. 2010. V. 221. P. 2374–2387
2. Свиричев Ю.М., Логофет Д.О. *Устойчивость биологических сообществ*. М.: Наука, 1978. 352 с.
3. Базыкин А.Д. *Нелинейная динамика взаимодействующих популяций*. Москва–Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2003. 368 с.
4. Свиричев Ю.М. *Нелинейные волны, диссипативные структуры и катастрофы в экологии*. М.: Наука, 1987. 368 с.
5. Разжевайкин В.Н. *Анализ моделей динамики популяций*. М.: МФТИ, 2010.
6. Lee C.T., Hoopse M.F., Diehl J., Gilliland W., Huxel G., Leaver E.V., Mccann K., Umbanhowar J., Moglner A. Non-local Concepts and Models in Biology. *J. Theor. Biol.* 2001. V. 210. P. 201–219.
7. Mac Nally R. Modelling confinement experiments in community ecology: differential mobility among competitors. *Ecological Modelling*. 2000. V. 129. P. 65–85.
8. Белотелов Н.В., Коноваленко И.А. Моделирование влияния подвижности особей на пространственно-временную динамику популяции на основе компьютерной модели. *Компьютерные исследования и моделирование*. 2016. Т. 8. № 2. С. 298–305.
9. Зайцев В.А. Исследование перемещений и ориентации лося (*Alces alces L., Mammalia*). *Доклады РАН*. 1996. Т. 346. № 3. С. 712–714.
10. Зайцев В.А. Векторные системы и ритмы в перемещениях и ориентации лосей (*Alces alces L.*) и других зверей (*Mammalia*). *Журн. общей биол.* 2002. Т. 63. № 4. С. 335–350.
11. Баскин Л.М. *Поведение копытных животных*. М.: Наука, 1976. 296 с.
12. Burt W.H. Territoriality and home range concepts as applied to mammals. *J. Mammal.* 1943. V. 24. P. 346–352.
13. Hediger H. *Beobachtungen zur Tierpsychologie im Zoo und im Zirkus*. Basel: Reinhardt Verlag, 1961.
14. MacBride G. The study of social organization. *Behaviour*. 1989. V. 59. P. 91–115.
15. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L., Stein C. *Introduction to algorithms*. MIT press, 2009. 1312 p.