

УДК: 004.94

## Имитационное моделирование направленного движения в условиях градиента освещенности

О. И. Чеснокова<sup>a</sup>, А. В. Мелких<sup>b</sup>

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,  
физико-технологический институт,  
Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19/5

E-mail: <sup>a</sup> choksy@mail.ru, <sup>b</sup> melkikh2008@rambler.ru

Получено 9 апреля 2012 г.,  
после доработки 30 мая 2012 г.

Создана имитационная многоагентная модель искусственной жизни. Рассмотрены конкурентные преимущества направленного движения и различные стратегии его использования в популяции простейших организмов в условиях градиента освещенности. Получены результаты, согласующиеся с теорией r-K отбора. Поведение агентов в искусственной экосистеме качественно соответствует наблюдаемому в природе.

Ключевые слова: многоагентное моделирование, направленное движение, цианобактерии

### Simulation modeling of directed movement in illumination gradient

O. I. Chesnokova, A. V. Melkikh

*Ural Federal University, 19/5 Mira str., Yekaterinburg, 620002, Russia*

**Abstract.** – Simulation multiagent model of artificial life was created. Competitive advantages of directed movement and diverse strategies of its using in population of protozoa in illumination gradient were considered. The results consistent with r-K selection theory were obtained. Agents behavior in artificial ecosystem are in qualitative agreement with behavior observed in nature.

Keywords: agent-based modeling, directed movement, cyanobacteria

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 401–406 (Russian).

## Введение

Движение играет важную роль в популяциях живых организмов. Существуют стратегии, связанные с подвижностью (см., например, [Vainstein et al., 2007; Murray, 1990]). При компьютерном моделировании популяций движение также часто присутствует. Например, в работах [Dai et al., 2007; Burtsev and Turchin, 2006, Zang et al., 2010; Yaeger, 1994; Yedid et al., 2008] рассматриваются многоагентные системы, одним из свойств агентов в которых является способность двигаться. Движение при этом является либо случайным, либо направленным.

Вместе с тем важно отметить, что стратегии, связанные с собственно направленным движением, т. е. получением каких-либо преимуществ за счет этого движения, в литературе не рассматривались. Однако именно такие стратегии могли бы обеспечить преимущество протоклеткам в игре «подвижные против неподвижных». Результатом такого преимущества и могло стать эволюционное закрепление направленного движения. В данной работе построена простая имитационная модель водной экосистемы. Рассматривается взаимодействие агентов, способных двигаться направленно и применяющих различные стратегии поведения.

## Модель

Агенты населяют трехмерное пространство с двумя типами ресурсов. Пространство имеет форму прямоугольного параллелепипеда с границами, непроницаемыми для агентов.

Внизу находятся несколько точечных источников, воспроизводящих материал, необходимый агентам для репликации. Как материал, так и агенты подвержены постоянному броуновскому движению. Агенты поглощают материал, если сталкиваются с ним. В случае столкновения между собой агенты отталкиваются друг от друга, поскольку не могут одновременно находиться в одной и той же точке пространства. Агенты не взаимодействуют друг с другом напрямую иными способами, лишь посредством потребления ресурсов. Источником энергии в системе является солнечный свет. Моделирование осуществляется в дискретном времени. Количество энергии, получаемое агентом за одну итерацию, зависит от глубины, на которой он находится, и определяется по формуле

$$e = \begin{cases} -k(h - h_0) & \text{при } 0 < h < h_0; \\ 0 & \text{при } h > h_0, \end{cases}$$

где  $h$  – глубина агента,  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $h_0$  – максимальная глубина, находясь на которой агент получает энергию. То есть, для того чтобы получить энергию, агенту необходимо и достаточно находиться на глубине не ниже  $h_0$ . При этом чем ближе к поверхности находится агент, тем больше энергии он получит. Как только агент запасет достаточное количество обоих ресурсов, он воспроизводит собственную копию.

Агент в терминологии теории автоматов является конечным автоматом и представляет собой структуру, аналогичную автоматам, игры которых рассматривались в [Цетлин, 1969]. На вход агента поступает дискретная переменная, описывающая взаимодействие со средой. Она может принимать 4 значения, соответствующих следующим исходам: агент не получил ресурсов, получил только энергию, получил только материал и получил оба ресурса. На основании полученной информации и с учетом действия, выбранного в предыдущий раз, он выбирает действие из доступного ограниченного набора: двигаться по направлению к энергии (индекс «e» на рисунке 1), к материалу («m») или не осуществлять направленного движения («0»). Выбрав действие «0», агент все же перемещается в пространстве, но лишь за счет броуновского движения. Направленное движение требует больше энергии, чем броуновское.

В рассматриваемом случае источник энергии всегда находится наверху, а материала – внизу. Сама структура автомата предполагает движение к энергии равнозначным движением вверх, к материалу – вниз.

На рис. 1 показаны графы переходов, в соответствии с которыми осуществляется выбор действия. Вершины графов соответствуют трем возможным действиям агента. Направление ребер показывает смену действия. Каждый из четырех возможных случаев описывается отдельным графом переходов. Например, рассмотрим граф, соответствующий случаю «получает энергию». Если на предыдущем этапе агент выбрал броуновское движение и в результате получил только энергию, то на следующем этапе он будет двигаться к материалу. Если на предыдущем этапе двигался к материалу и получил только энергию, на следующем он опять выберет движение к материалу.

Агент выбирает действие на основе успешности предыдущего. Если агент получает оба ресурса в результате выполнения действия, оно повторяется, получив один ресурс, начинает движение к другому. Виды отличаются между собой лишь поведением в случае, когда агент не получает ресурсов.

В результате выбора того или иного действия автомат перемещается в пространстве и, соответственно, изменяет вероятность получения ресурсов, то есть значение входной переменной на следующей итерации. Таким образом, осуществляется обратная связь.

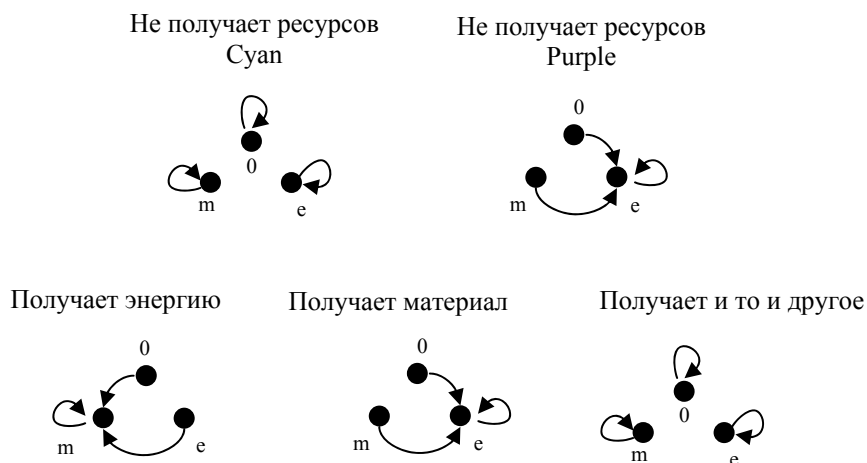


Рис. 1. Схема выбора действия. Верхние графы соответствуют различным популяциям. Для простоты и наглядности названия видам даны в соответствии с цветами, в которые окрашены их представители в визуализации программы

Такой способ выбора действия обеспечивает некоторую возможность адаптации к окружающим условиям. Поскольку выбор действия определяется окружающей средой и, соответственно, агент будет изменять поведение в возможных пределах при изменении среды.

Модель учитывает «тень», создаваемую другими агентами. Агент не получит энергию, если выше него есть другие агенты с координатами в пределах заданного малого диапазона, поскольку будет находиться в тени, создаваемой другими агентами. Наличие тени существенно изменяет максимальную численность популяции. Если бы модель не учитывала тень, создаваемую другими агентами, то емкость среды ограничивалась бы только объемом освещенного пространства. При учете тени емкость среды уменьшается на порядки, поскольку определяется уже площадью поверхности, а не объемом пространства. Таким образом, несмотря на то, что градиент освещенности наблюдается лишь по одному измерению – глубине, перемещение в поперечной плоскости также имеет значение, поскольку агенту необходимо не только оказаться на достаточно малой глубине, но еще и избежать тени от других агентов.

В текущей версии программы действительно направленным является лишь движение по вертикали, а перемещение в горизонтальной плоскости осуществляется случайно. То есть, например, действие «двигаться к энергии» определяется следующим образом: направление движения устанавливается точно вверх с отклонением на некоторый случайный угол в заданном диапазоне.

В данной модели не заложен механизм эволюции, то есть потомок представляет собой идентичную копию родителя. Сравнивается приспособленность двух заданных стратегий поведения, соответствующих двум различным популяциям. Мерой приспособленности является численность популяции.

## Результаты

Созданная в ходе работы программа имитационного моделирования позволяет определить условия, при которых оказывается выигрышной та или иная стратегия.

Популяцию Purple в терминологии теории r-K отбора [Getz, 1993] можно отнести к K-стратегам. Данной популяции присущи такие черты K-стратегий, как небольшая смертность, относительно постоянный размер популяции, малое число потомков. Популяцию Суан можно отнести к r-стратегам, поскольку ей свойственны быстрое размножение, но и большая смертность, изменчивый размер популяции, большое число потомков.

Популяция Суан выигрывает, если энергии, захваченной на поверхности, хватает на путь вниз и обратно. Воспроизводство копии происходит, как правило, в нижней части пространства, поскольку необходимый материал агент получает именно там. Поэтому начальное количество энергии у потомков должно быть достаточным, чтобы подняться со дна на поверхность и получить там энергию.

Представление о двух вышеупомянутых стратегиях можно получить при помощи рисунков 2–4. Выбор именно этих стратегий обусловлен тем, что обе они показали наибольшую конкурентоспособность в различных условиях, несмотря на то что являются во многом противоположными друг другу.

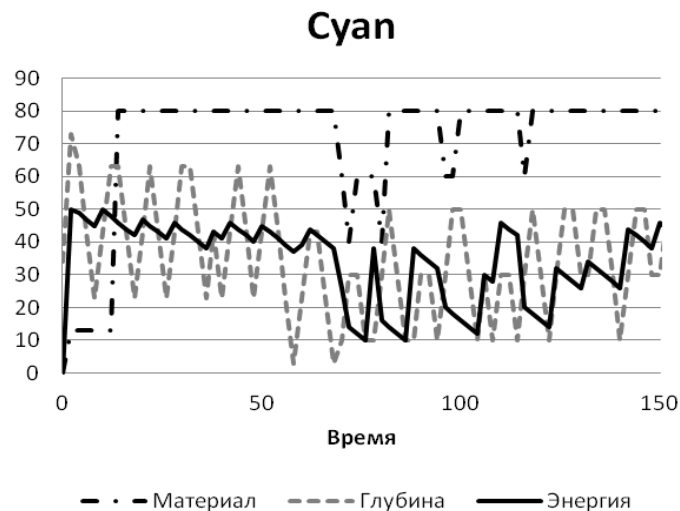


Рис. 2. Количество накопленных агентом ресурсов и высота, на которой находится агент

По графикам видно, что стратегия Purple соответствует максимизации полученной энергии, что позволяет сохранять численность популяции, но не обеспечивает быстрый рост.

Стратегия Суан, напротив, обеспечивает максимум получаемого материала. Первое время (до момента  $t = 80$ ) популяция уступает конкурентам в численности, но впоследствии начинает стремительно превосходить.

Резкие уменьшения количества обоих ресурсов одновременно соответствуют репликации. То есть агент вида Суан за представленное время произвел 4 копии, в то время как агент вида Purple – только 2.

Примечательно, что стратегия Purple оказывается выигрышной в подавляющем большинстве рассмотренных случаев. В соответствии с теорией r-K отбора это может быть объяснено относительной стабильностью окружающих условий. Известно, что в целом простейшим

свойственно избегать неблагоприятных условий, нежели чем активно искать благоприятные. Чаще выигрышными оказываются стратегии, позволяющие минимизировать риски.

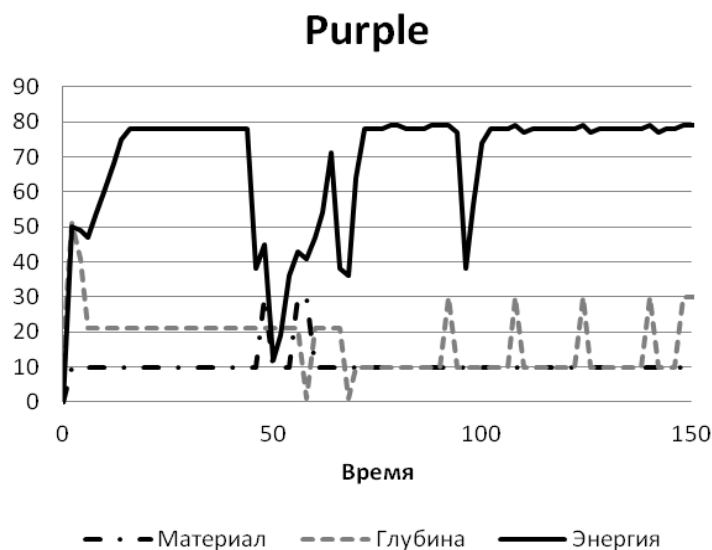


Рис. 3. Количество накопленных агентом ресурсов и высота, на которой находится агент

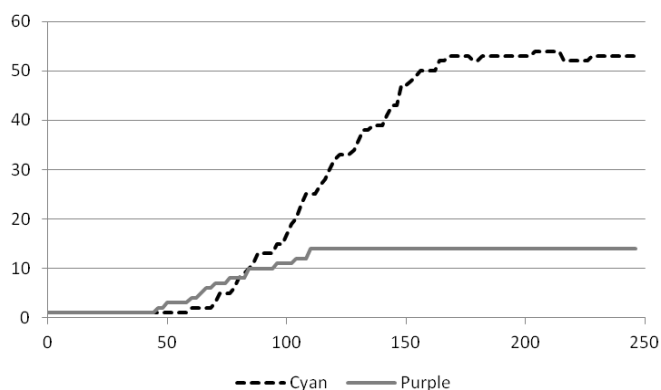


Рис. 4. Динамика численности популяций

Известно, что некоторые бактерии, например *Chromatium*, днем находятся на некоторой глубине, а ночью всплывают на поверхность. Этот процесс регулируется сложной системой управления, реагирующей на несколько химических стимулов и освещенность [Overmann, Garcia-Pichel, 2006]. К точно такому же поведению приводят и гораздо более простые правила, рассмотренные в этой работе.

«Днем» свет пробивается сквозь толщу воды на некоторую глубину, поэтому агенту не обязательно всплывать на поверхность. Агент меняет действие, как только получит энергию. При этом не важно сколько именно энергии было получено. «Ночью», когда свет отсутствует полностью, агенты продолжают подниматься в поисках энергии, пока не всплывут на поверхность, и будут оставаться там, пока не получат энергию, чтобы сменить выбор действия.

## Заключение

Созданная модель искусственной жизни позволяет получить и исследовать наблюдаемые в природе стратегии поведения простейших организмов, способных двигаться направленно, и закономерности. В частности, исследована смена доминирующей популяции в зависимости

от окружающих условий и вертикальные миграции цианобактерий в течение суток. Показано, что одним из условий доминирования r-стратегии над K является превышение количества энергии, получаемой агентом на поверхности, над затратами на направленное движение вниз к источнику материала и обратно.

## Список литературы

- Цетлин М. Л.* Исследования по теории автоматов и моделированию биологических систем. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1969.
- Burtsev M., Turchin P.* Evolution of cooperative strategies from first principles // *Nature*. – 2006. – P. 1041–1044.
- Dai X. B., Huang Z. Y., Wu C. X.* Evolution of cooperation among interacting individuals through molecular dynamics simulations // *Physica A* 383 (2007). – P. 624–630.
- Getz W. M.* Metaphysiological and evolutionary dynamics of populations exploiting constant and interactive resources – r-K selection revisited // *Evolutionary Ecology*. – 1993. – Vol. 7 (3). – P. 287–305.
- Murray J. D.* *Mathematical Biology*. Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1990.
- Overmann J., Garcia-Pichel, F.* The Phototrophic Way of Life // *Prokaryotes*. – 2006. – Vol. 2. – P. 32–85.
- Vainstein M. H., Silva A. T. C., Arenzon J. J.* Does mobility decrease cooperation? // *Journal of Theoretical Biology*. – 2007. – Vol. 244. – P. 722–728.
- Yaeger L.* Computational Genetics, Physiology, Learning, Vision, and Behavior or PolyWord: Life in a New Context // *Artificial Life III*. – 1994. – Ed. by C.Langton. – New York: Addison-Wesley. – P. 263–298.
- Yedid, G., Ofria C. A., Lenski R., E.* Historical and contingent factors affect re-evolution of a complex feature lost during mass extinction in communities of digital organisms // *J. Evol. Biol.* – 2008. – Vol. 21. – P. 1335–1357.
- Zhang J., Chen X., Zhang C., Wang L., Chu T.* Elimination mechanism promotes cooperation in co-evolutionary prisoner's dilemma games // *Physica A*. – 2010. – Vol. 389. – P. 4081–4086.