

Е.Е. ПОПОВ, В.А. НЕПОМНЯЩИХ, В.Г. РЕДЬКО

НИИ Системных исследований РАН, Москва
Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, Борок Ярославской
обл.
cha1n@mail.ru, nepom@ibiw.yaroslavl.ru, vgrecko@gmail.com

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ПОИСКОВОГО ПОВЕДЕНИЯ ЛИЧИНОК РУЧЕЙНИКОВ

Аннотация. Построена и исследована модель поискового поведения личинок ручейников, строящих чехол-домик из частиц разного размера и ведущих поиск скоплений подходящих частиц. Показана адекватность построенной модели биологическим экспериментальным данным.

1. Введение

Одно из актуальных направлений исследований в рамках моделирования адаптивного поведения [1] – имитация поискового поведения животных. В настоящей работе излагаются результаты исследования поискового поведения на примере личинок ручейников *Chaetopteryx villosa* – насекомых, обитающих на дне водоемов [2,3]. Личинки носят на себе "домик" – трубку из песка и других частиц, которые скрепляются между собой по краям с помощью клейкой белковой нити. Строительство требует меньше времени, усилий и белка, если личинки используют относительно крупные и плоские частицы: при одинаковых размерах домика общая протяженность швов между составляющими его немногими крупными частицами оказывается меньше, чем в том случае, когда домик сооружается из большого числа мелких частиц. Личинки передвигаются по дну до тех пор, пока не найдут и не прикрепят к домику крупную частицу. После этого они остаются на месте и ощупывают одну за другой соседние частицы. Если несколько частиц подряд оказываются мелкими, ручейники прекращают ощупывание и снова начинают передвигаться по дну, пока не найдут новую крупную частицу, после чего цикл повторяется. В целом это выглядит вполне адаптивно: в естественных водоемах частицы разного размера имеют тенденцию скапливаться на разных участках дна. Поведение личинок приводит к тому, что готовый домик состоит в основном из крупных частиц. Данный цикл можно представить как чередование двух тактик: 1) сбор и прикрепление частиц на одном и том же участке и 2) поиск нового участка с подходящими частицами. Переключение между

тактиками имеет инерционный характер. Далее излагаются результаты биологического эксперимента и, по аналогии, строится компьютерная модель.

2. Биологический эксперимент

В работе [3] личинок ручейников помещали в кольцевой коридор с водой, дно которого было покрыто сплошным слоем песка. На большей части коридора (участок 1) на дне были только песчинки (мелкие частицы). На небольшом участке коридора (участок 2), кроме песка, были еще предпочитаемые личинками крупные плоские частицы (специально изготовленные фрагменты яичной скорлупы приблизительно квадратной формы). Диаметр кольца составлял 87 мм, ширина кольца – 16 мм. Площадь участка 2 была равна 1/6 площади кольца. Характерные линейные размеры песчинок составляли 0,5-1 мм, размер стороны скорлупки составлял 1,5-2 мм. Характерный размер самих личинок составлял 12 мм. Вероятность того, что ручейник встретит на участке 2 крупную, а не мелкую частицу, составляла примерно 0,2.

Эксперимент проводили с 40 личинками ручейников. Личинкам разрушали переднюю и заднюю треть уже построенного домика. Ручейников по одному помещали в центр участка 1 и наблюдали их поведение до прикрепления первой частицы, а затем ещё в течение 1 часа после этого первого прикрепления. Изредка личинка не прикрепляла частицы слишком длительное время (порядка 1 часа), эксперименты с такими личинками не включались в число наблюдений.

Прежде чем начать строительство, ручейники передвигались по коридору, поднимали со дна и обследовали значительное число частиц. Все особи посещали участок 2 и поднимали как песок, так и скорлупу. Четыре личинки начали строительство на участке 1 и не возвращались на участок 2 до конца эксперимента. Все остальные особи начинали строительство с прикрепления скорлупы на участке 2, причем 17 из них уже не уходили с этого участка, хотя и перемещались внутри его. Оставшиеся 19 особей провели на этом участке больше половины времени эксперимента. Личинки, оставшиеся на участке 1, прикрепили в среднем по 7 песчинок. Среднее число прикрепленных частиц как для 17 особей, оставшихся на участке 2, так и для 19 особей, покидавших и возвращавшихся на участок 2, составило 5 скорлупок и 2 песчинки. Эксперимент показывает, что личинки ручейников предпочитают находиться на участке 2, где они строят домик в основном из крупных частиц – скорлупок.

3. Модель

Основные предположения предлагаемой модели состоят в следующем:

- 1) Время дискретно, шаг по времени $\Delta t = 1$ с, Δt соответствует минимальному характерному времени в поведении личинки.
- 2) Движение личинки вдоль кольца одномерно, т.е. пренебрегаем шириной кольца по сравнению с его диаметром d .
- 3) Личинка имеет две тактики поведения: А) искать и прикреплять к домику частицы в своей локальной окрестности, Б) перемещаться на новое место.
- 4) При тактике А) возможны две операции: тестирование частицы, при котором тестируемая частица может быть отброшена, и прикрепление протестированной частицы к домику.
- 5) Тенденцию к прикреплению частиц характеризуем мотивацией к прикреплению $M(t)$. Динамика $M(t)$ определяется выражением

$$M(t) = k_1 M(t-1) + \xi(t) + I(t), \quad (1)$$

где k_1 – параметр, характеризующий инерционность переключения тактик ($0 < k_1 < 1$), $\xi(t)$ – нормально распределенная случайная величина со средним, равным 0, и средним квадратическим отклонением σ , $I(t)$ – интенсивность раздражителя. При *тестировании* $I(t)$ изменяется в соответствии с выражением

$$I(t) = k_2 (S_{curr} - S_{last}) / S_{last}, \quad (2)$$

где k_2 – положительный параметр; S_{curr} – площадь тестируемой в данный момент частицы; S_{last} – площадь последней протестированной частицы. При *прикреплении и перемещении* $I(t) = 0$.

6) Считаем, что тестирование и прикрепление происходит при превышении мотивацией $M(t)$ определенного порога, причем порог для тестирования и для прикрепления различен. Порог для тестирования H_{test} пропорционален площади последней протестированной частицы S_{last} : $H_{test} = k_3 S_{last}$. Порог для прикрепления H_{att} пропорционален площади последней прикрепленной частицы S_{att} : $H_{att} = k_4 S_{att}$. k_3, k_4 – положительные параметры.

7) Схема действий личинки состоит в следующем. Если мотивация оказалась больше порога тестирования H_{test} и при этом не происходит прикрепления, то личинка начинает тестировать ближайшую к ней частицу. Если

при тестировании мотивация $M(t)$ стала меньше порога H_{test} , то тестируемая частица отбрасывается. Если при тестировании частица не отбрасывается, то тестирование продолжается в течение определенного времени T_{test} . Далее $M(t)$ сравнивается с порогом прикрепления H_{att} . Если $M(t) < H_{att}$, то прикрепления не происходит; если $M(t) > H_{att}$, то частица прикрепляется в течение времени T_{att} (в процессе прикрепления мотивация с порогом уже не сравнивается). Времена тестирования T_{test} и прикрепления T_{att} зависят от размера частицы. Если личинка не тестирует и не прикрепляет частицу, то она перемещается.

8) В начале перемещения личинка выбирает случайное направление движения вдоль кольца, и некоторое время перемещается в этом направлении (с вероятностью 0,5 для каждого из двух возможных). Эпизодически, с интервалом в T_{change} личинка выбирает новое случайное направление движения.

9) Величина перемещения личинки за один такт времени равна L .

Отметим, что в соответствии с [3] в модель были введены пороги тестирования и прикрепления, зависящие от размеров ранее протестированных или прикрепленных частиц. Это означает, что личинки ручейников обладают памятью о размерах последних обрабатываемых частиц и используют память при организации адаптивного поведения.

4. Результаты моделирования

Предполагалось, что личинки помещены в кольцевой коридор диаметром $d = 90$ мм. Сектор размером 1/6 части периметра (участок 2) имеет частицы двух размеров: малые (песчинки) и большие (скорлупки), на остальной части коридора (участок 1) есть только песчинки. Линейные размеры песчинки и скорлупки составляли 0,5 мм и 1,5 мм. Площадь частицы равна квадрату ее линейного размера. Вероятность того, что ручейник встретит на участке 2 крупную, а не мелкую частицу, равна 0,2.

Исходно личинка помещалась в центр участка 1. Исходная мотивация к прикреплению равна нулю: $M(0) = 0$. Исходный порог прикрепления равен $H_{att}(0) = k_4 * S_L$, где S_L – площадь крупной частицы, затем этот порог постепенно уменьшался по экспоненте с характерным временем 3000 тактов времени, до тех пор пока не прикреплялась первая частица, далее порог H_{att} определялся размерами прикрепляемых частиц. Исходный порог тестирования равен $H_{test}(0) = k_3 * S_S$, где S_S – площадь малой частицы; порог H_{test} не менялся до тех пор пока не начиналось тестирование.

В соответствии с биологическими данными полагалось, что величина перемещения личинки за один такт времени равна $L = 2$ мм. Полагалось, что время тестирования T_{test} малой и большой частицы составляет 5 с и 10 с ; время прикрепления T_{att} малой и большой частицы составляет 60 с и 120 с ; время изменения направления движения T_{change} составляет 30 с.

Остальные параметры модели (k_1-k_4, σ) были выбраны следующим образом. Так как характерное время прикрепления частиц порядка 100 с, то полагалось, что характерное время релаксации мотивации должно быть того же порядка: $k_1 = 0,99$. Параметры k_3, k_4 были выбраны из соображений простоты: $k_3 = 0,01, k_4 = 1$. Параметры k_2 и σ грубо варьировались в диапазоне от 0,001 до 0,1 и были подобраны так, чтобы при моделировании получалось поведение, подобное полученному в биологическом эксперименте: $k_2 = 0,007, \sigma = 0,05$.

Расчет проводился в течение 7200 тактов времени, что соответствует 2 часам для моделируемых процессов (далее временные характеристики приводятся именно для модельных личинок). Как и в биологическом эксперименте анализировалось поведение 40 личинок в течение 1 часа после прикрепления первой частицы. Если ни одна частица не прикреплялась в течение 1 часа после начала расчета (таких расчетов оказалось 3 из 43), то аналогично биологическому эксперименту такие расчеты не принимались во внимание. Расчеты различались реализацией случайных процессов.

Поведение модельных личинок имело следующие свойства:

- в начале расчета личинки перемещались по кольцевому каналу, в большинстве случаев (в 27 случаях из 40) посещая и покидая участок 2 еще до момента прикрепления первой частицы, в 13 расчетах личинки начинали процесс прикрепления на участке 2 при первом его посещении;
- среднее время от начала расчета до момента прикрепления первой частицы составило 1815 с (стандартное отклонение 872 с);
- почти во всех расчетах (в 39 расчетах из 40) первой прикреплялась крупная частица;
- количество прикрепляемых частиц в течение часа после начала прикрепления первой частицы в среднем по 40 расчетам составило: 4,2 крупные частицы (стандартное отклонение 1,68) и 0,6 мелких частиц (стандартное отклонение 1, 53);
- в 14 расчетах личинка не покидала участок 2 после начала прикрепления частиц, в 10 расчетах личинка находилась вне участка 2 в конце

наблюдения, в остальных 16 расчетах личинка уходила с участка 2 и вновь возвращалась на него.

На рис. 1 приведены зависимости изменения суммарной площади домика личинки от времени $S(t)$ для трех типичных расчетов. Видно, что 1) число прикрепляемых частиц невелико и по порядку величины близко к среднему значению, наблюдавшемуся в биологическом эксперименте, 2) имеется сильный разброс во времени начала прикрепления первой частицы, 3) преимущественно прикрепляются крупные частицы (площадью $2,25 \text{ мм}^2$), но эпизодически прикрепляются и мелкие частицы (площадью $0,25 \text{ мм}^2$).

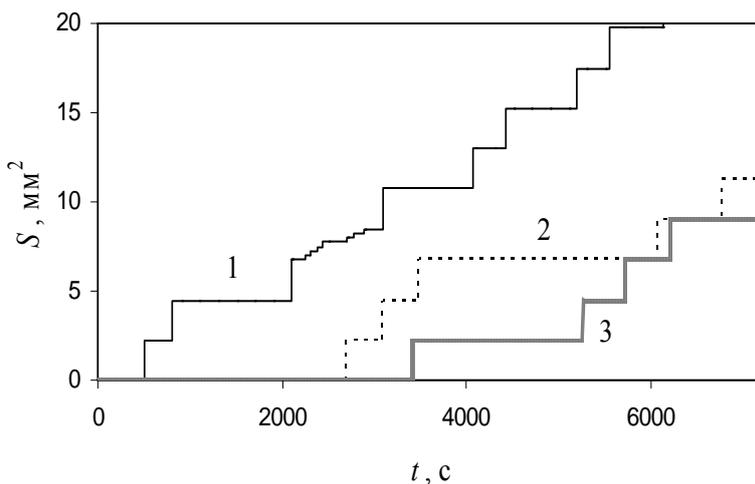


Рис. 1. Зависимость суммарной площади прикрепленных частиц S от времени t для трех различных расчетов. Резкие скачки $S(t)$ соответствуют моментам прикрепления больших частиц, малые скачки – прикреплению малых частиц. Виден большой разброс во времени начала прикрепления и числе частиц. Число прикрепляемых невелико (несколько единиц)

Детали поведения личинок иллюстрируются рис. 2, 3. На рис. 2 представлены временные зависимости $S(t)$ и приведенной угловой координаты личинки $\phi_{norm}(t)$ для примера 3, показанного на рис. 1. Рис. 3 – временная зависимость мотивации $M(t)$ для того же примера.

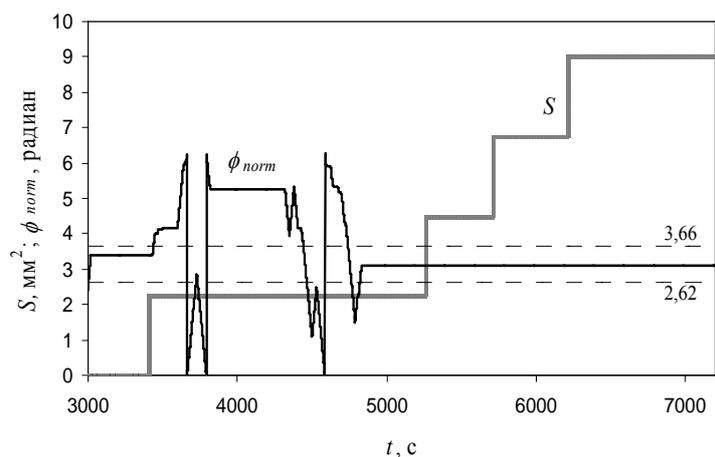


Рис. 2. Временные зависимости суммарной площади прикрепленных частиц $S(t)$ и приведенной угловой координаты $\phi_{norm}(t)$ личинки для расчета, соответствующего примеру 3 на рис. 1. Зависимости приведены от момента $t = 3000$ до конца расчета. Угловая координата $\phi_{norm}(t)$ приведена к интервалу $[0, 2\pi]$. Горизонтальные штриховые линии соответствуют граничным значениям $\phi_{norm}(t)$ для участка 2

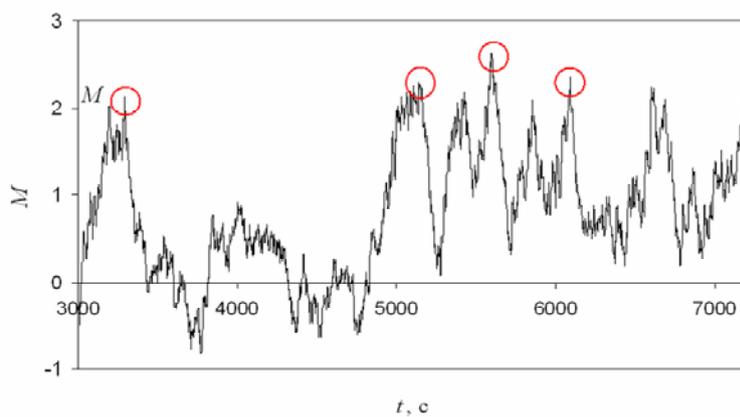


Рис. 3. Зависимость $M(t)$. Тот же расчет, что и на рис. 2. Моменты начала прикрепления частиц соответствуют высоким пикам $M(t)$ (показаны кружками)

Выводы

Построена и исследована компьютерная модель поискового поведения личинок ручейников. Показана адекватность модели биологическим экспериментальным данным. Модель характеризуется как памятью о размерах последних обработанных частиц, так и общими свойствами инерционного переключения.

Список литературы

1. От моделей поведения к искусственному интеллекту (под ред. Редько В.Г.). М.: Изд-во УРСС, серия «Науки об искусственном», 2006.
2. Непомнящих В.А. Модели автономного поискового поведения // В книге [1]. С. 200-242.
3. Непомнящих В.А. Противоречие между оптимизацией и упорядоченностью в строительном поведении личинок ручейников *Chaetopteryx villosa* Fabr. (Limnephilidae, Trichoptera) // Журнал общей биологии. 2002. Т.63. №3. С.473-482.