

## МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ОБУЧЕНИЕМ И ЭВОЛЮЦИЕЙ: МЕХАНИЗМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ<sup>1</sup>

В.Г. Редько (*vgredko@gmail.com*)

Научно-исследовательский институт системных исследований РАН, Москва

Построена и исследована модель взаимодействия между обучением и эволюцией. Проанализированы следующие механизмы этого взаимодействия. 1) Механизм генетической ассимиляции, при которой индивидуально приобретаемые путем обучения навыки «переизобретаются» эволюцией и становятся наследуемыми. 2) Механизм эффекта экранирования, при котором сильное обучение тормозит эволюционный поиск. 3) Механизм влияния нагрузки на обучение, которая приводит к значительному ускорению эволюции.

### Введение

Попытки моделирования и анализа взаимодействия между обучением и эволюцией проводились рядом специалистов в области бионических моделей вычислительного интеллекта. В известной работе Хинтона и Новлана [Hinton et al., 1987] продемонстрировано, что обучение может направлять эволюционный процесс к нахождению оптимума. В работе Мейли [Mayley, 1997] показано, что сильное обучение может и препятствовать эволюционной оптимизации, если отбор производится по конечному фенотипу, а обучение увеличивает шансы нахождения хорошего фенотипа независимо от генотипа особи. Этот эффект был назван эффектом экранирования. Также в этой работе было учтено, что процесс обучения имеет дополнительную нагрузку на особь (обучение требует времени и ресурсов) и приспособленность особи может уменьшаться под влиянием этой нагрузки.

Однако в указанных работах для моделирования эволюции использовались довольно сложные схемы генетического алгоритма со скрещиванием, поэтому были продемонстрированы сами эффекты взаимодействия между обучением и эволюцией, а механизмы этого

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 13-01-00399).

взаимодействия представлены недостаточно четко. В настоящей работе для анализа механизмов взаимодействия используем одну из наиболее четких моделей эволюции – модель квазивидов [Эйген, 1973; Эйген и др., 1982] и наши количественные оценки эффективности эволюционных алгоритмов [Редько и др., 2005, 2011]. Модель квазивидов рассматривает отбор и мутации особей (обычно без скрещивания) и характеризует основные свойства эволюционных процессов.

## 1. Основная модель

Рассматривается эволюционирующая популяция особей. Каждая особь имеет генотип и фенотип. Генотип и фенотип определяются одинаковыми цепочками символов.

Генотип  $k$ -й особи  $S_{Gk}$  представляет собой цепочку символов  $S_{Gki}$ ,  $k = 1, \dots, n$ ,  $i = 1, \dots, N$ . Длина цепочки  $N$  и численность популяции  $n$  велики:  $N, n \gg 1$ ,  $2^N \gg n$ . Символы  $S_{Gki}$  равны 0 либо 1. Генотипы исходной популяции случайны. Генотип особи не меняется в течение ее жизни и передается (с малыми мутациями) потомкам особи.

В момент рождения  $k$ -й особи ее фенотип  $S_{Pk}$  равен генотипу:  $S_{Pk}(t=1) = S_{Gk}$ . Время дискретно:  $t = 1, \dots, T$ .  $T$  – время жизни одного поколения. Фенотип  $S_{Pk}$  меняется в течение жизни особи путем обучения.

Имеется оптимальная цепочка  $S_M$  длины  $N$  (символы которой также равны 0 или 1), которая ищется в процессе эволюции и обучения особей. При обучении меняются текущие символы фенотипа  $S_{Pk}$ : каждый такт времени  $t$  каждый символ  $S_{Pki}$  меняется на случайный (равный 0 либо 1), и если новый символ  $S_{Pki}$  совпадает с соответствующим символом  $S_{Mi}$  оптимальной цепочки  $S_M$ , то этот символ сохраняется, в противном случае происходит возврат к старому символу фенотипа  $S_{Pk}$ .

В конце поколения происходит отбор особей в соответствии с их приспособленностями, определяемыми конечными фенотипами при  $t = T$ . Обозначим  $S_{Fk} = S_{Pk}(t=T)$ . Приспособленность  $k$ -й особи определяется расстоянием по Хеммингу  $\rho(S_{Fk}, S_M)$  между  $S_{Fk}$  и  $S_M$ :

$$f_k = \exp[-\beta \rho(S_{Fk}, S_M)] + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $\beta (> 0)$  – интенсивность отбора,  $\varepsilon$  характеризует влияние случайных факторов на приспособленность особей,  $0 < \varepsilon \ll 1$ .

Отбор особей в новое поколение производится хорошо известным рулеточным методом, для которого вероятность выбора определенной особи в новое поколение пропорциональна ее приспособленности.

Таким образом, обучаемые особи отбираются по конечным фенотипам особей  $S_{Fk} = S_{Pk}(t=T)$ , т.е. по конечному результату обучения, а по наследству потомкам передаются генотипы  $S_{Gk}$ .

Дополнительно учтем роль нагрузки на обучения. С этой целью будем рассматривать модифицированные приспособленности особей:

$$f_{mk} = \exp(-ad) \{ \exp[-\beta\rho(\mathbf{S}_{Fk}, \mathbf{S}_M)] + \varepsilon \}, \quad (2)$$

где  $\alpha > 0$ ,  $d = \rho(\mathbf{S}_{Gk}, \mathbf{S}_{Fk})$  – расстояние по Хеммингу между начальным и конечным фенотипом рассматриваемой особи.

Поскольку начальные генотипы особей в исходной популяции  $\mathbf{S}_{Gk}$  случайны, то среднее расстояние по Хеммингу между этими цепочками и оптимальной  $\mathbf{S}_M$  равно  $N/2$ . Такое расстояние нужно преодолеть путем обучения и эволюционного поиска.

## 2. Результаты моделирования по основной модели

**Параметры моделирования.** Параметры модели выбираем таким образом, чтобы эволюционный поиск проходил достаточно эффективно, с учетом опыта работ [Редько и др., 2005, 2011]. Полагаем, что длина цепочек достаточно велика:  $N = 100$ . Параметр отбора считаем равным  $\beta = 1$ , это соответствует достаточно высокой интенсивности отбора, при которой время (число поколений) отбора сравнительно мало, а время эволюционного поиска определяется интенсивностью мутаций. Интенсивность мутаций должна быть не слишком высока, чтобы не было мутационных потерь уже найденных в процессе эволюции удачных особей, но и не слишком мала, для того, чтобы мутационный поиск происходил достаточно быстро. С учетом этого полагаем, что вероятность замены любого символа в одном поколении в генотипах  $\mathbf{S}_{Gk}$  при мутациях равна  $p_m = N^{-1} = 0.01$ . При такой интенсивности мутаций  $p_m$  за одно поколение происходит замена примерно одного символа в генотипе особи, т.е. в течение одного поколения за счет мутаций расстояние по Хеммингу  $\rho$  между  $\mathbf{S}_{Gk}$  и  $\mathbf{S}_M$  изменяется в среднем на 1. Отбор приводит к уменьшению этого расстояния. Поскольку расстояние по Хеммингу между генотипами особей нулевого поколения и  $\mathbf{S}_M$  порядка  $N$ , то весь процесс эволюции займет порядка  $G_T \sim N$  поколений. Такая оценка скорости эволюции справедлива, если численность популяции  $n$  достаточно велика и нейтральным отбором особей (независящим от приспособленности особей) можно пренебречь. Для выполнения этого условия достаточно потребовать, чтобы характерное время (число поколений) нейтрального отбора (по порядку величины равное  $n$ ) [Кимура, 1983] было не меньше  $G_T$ , поэтому полагаем  $n = G_T = N$ .

Итак, параметры расчета равны:  $N = 100$ ,  $\beta = 1$ ,  $p_m = N^{-1}$ ,  $n = N$ .

Также считаем, что  $T = 2$ ,  $\varepsilon = 10^{-6}$ .

**Сопоставление режимов с обучением и без обучения.** На рис. 1 представлена зависимость от номера поколения  $G$  среднего по популяции расстояния по Хеммингу  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{G_k}, \mathbf{S}_M)$  между генотипами  $\mathbf{S}_{G_k}$  и оптимальной цепочкой  $\mathbf{S}_M$  в начале поколения для режимов с обучением и без обучения. Кривая 1 – режим с обучением, кривая 2 – режим без обучения (режим «чистой эволюции»). Приспособленности особей определяются выражением (1). Видно, что без обучения чисто эволюционный процесс не обеспечивает оптимизации генотипов, а при наличии обучения явно происходит приближение к оптимальной цепочке  $\mathbf{S}_M$ .

Уменьшения  $\rho$  в режиме чистой эволюции не происходит, так как в исходной популяции  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{G_k}, \mathbf{S}_M) \sim N/2 = 50$ , следовательно,  $\exp(-\rho) \sim 10^{-22} \ll \varepsilon$ . Поэтому все особи популяции имеют приблизительно одинаковое значение приспособленности, равное  $\varepsilon$ , и, следовательно, в случае чистой эволюции вообще не происходит селекции особей. Приближение к  $\mathbf{S}_M$  происходит только при наличии обучения.

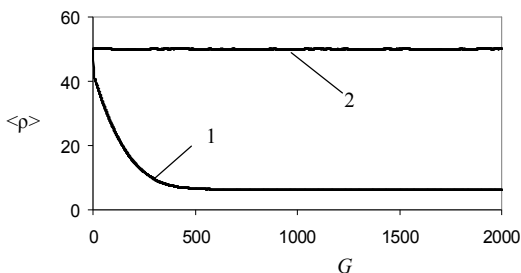


Рис. 1. Зависимость среднего по популяции расстояния до оптимума  $\langle \rho \rangle = \langle \rho(\mathbf{S}_{G_k}, \mathbf{S}_M) \rangle$  от номера поколения  $G$ ; 1 – режим с обучением, 2 – режим чистой эволюции (усреднено по 1000 расчетам).

Механизм ускорения эволюционного процесса за счет обучения иллюстрируется рис. 2, на котором представлено распределение особей  $n(\rho)$  по  $\rho$  в разные моменты первого поколения. Кривая 1 показывает распределение по  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{G_k}, \mathbf{S}_M)$  для исходных генотипов особей в начале поколения. Кривая 2 показывает распределение по  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{F_k}, \mathbf{S}_M)$  для особей после обучения, но еще до отбора. Кривая 3 показывает распределение по  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{F_k}, \mathbf{S}_M)$  для отобранных особей. Кривая 4 показывает распределение по  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{G_k}, \mathbf{S}_M)$  для генотипов отобранных особей в конце поколения. Генотипы отобранных особей  $\mathbf{S}_{G_k}$  достаточно близки к фенотипам обученных и отобранных особей  $\mathbf{S}_{F_k}$ , поэтому распределение по  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{G_k}, \mathbf{S}_M)$  для генотипов (кривая 4) перемещается в сторону распределения для конечных фенотипов  $\mathbf{S}_{F_k}$  (кривая 3). В

следующих поколениях происходит аналогичное дальнейшее смещение распределения  $n(\rho)$  в сторону меньших значений  $\rho$ . Такое смещение характеризует механизм генетической ассимиляции: свойство приближения к  $S_M$ , полученное в результате индивидуального обучения, становится наследуемым.

Подчеркнем, что в результате обучения происходит смещение к достаточно малым  $\rho$ , при которых существенно различаются приспособленности (1) и происходит отбор особей с меньшими значениями  $\rho(S_{Fk}, S_M)$ . Для того, чтобы изложенный механизм работал, обучение должно быть достаточно сильным.

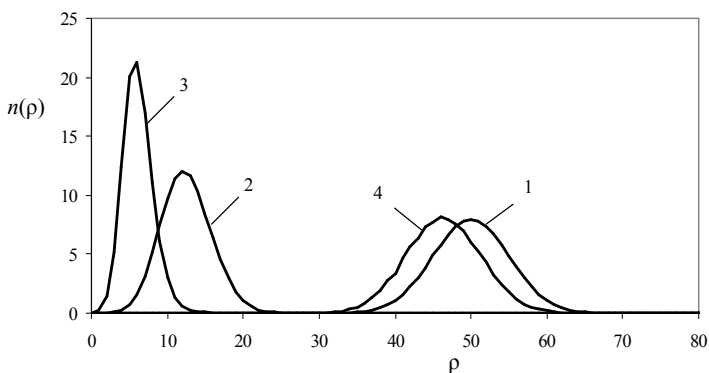


Рис. 2. Распределение особей  $n(\rho)$  по величинам  $\rho$  в первом поколении эволюции: 1 – распределение по  $\rho = \rho(S_{Gk}, S_M)$  для исходных генотипов до обучения, 2 – распределение по  $\rho = \rho(S_{Fk}, S_M)$  для особей после обучения, но еще до отбора, 3 – распределение по  $\rho = \rho(S_{Fk}, S_M)$  для отобранных особей, 4 – распределение по  $\rho = \rho(S_{Gk}, S_M)$  для генотипов отобранных особей в конце поколения (усреднено по 10000 расчетам).

**Эффект экранирования.** Однако сильное обучение может не только способствовать, но и препятствовать эволюционному поиску оптимального генотипа  $S_{Gopt} = S_M$ . Как показывает кривая 1 на рис. 1, конечное значение  $\langle \rho \rangle$  остается достаточно большим, приблизительно равным 6.2. Это связано с тем, что для сильного обучения при  $G \sim 1000$  нахождение оптимального фенотипа  $S_{Fopt} = S_M$  происходит независимо от генотипа  $S_{Gk}$ . Поэтому при больших  $G$  не происходит приближения генотипов к  $S_M$ . Наблюдается эффект экранирования [Mayley, 1997].

**Влияние нагрузки на обучение на моделируемые процессы.** Был проведен анализ влияния нагрузки на обучение на моделируемые процессы эволюции с обучением. Для этого случая приспособленность

определялась выражением (2). Расчет проводился для указанных выше параметров ( $N = n = 100$ ,  $\beta = 1$ ,  $p_m = 0.01$ ,  $T = 2$ ,  $\varepsilon = 10^{-6}$ ), величина  $\alpha$  полагалась равной 1. Результаты расчета представлены на рис. 3,4. На рис. 3 показана зависимость среднего по популяции расстояния  $\langle \rho \rangle = \langle \rho(\mathbf{S}_{Gk}, \mathbf{S}_M) \rangle$  между генотипами  $\mathbf{S}_{Gk}$  и оптимальной цепочкой  $\mathbf{S}_M$  от номера поколения  $G$ . На рис. 4 представлена динамика распределений особей  $n(\rho)$  по величинам  $\rho$  в первом поколении эволюции в разные моменты поколения.

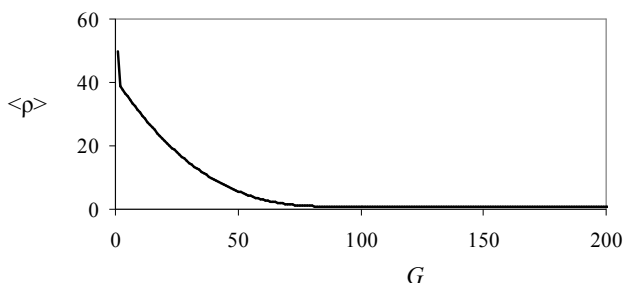


Рис. 3. Зависимость среднего по популяции расстояния до оптимума  $\langle \rho \rangle$  для генотипов особей от номера поколения  $G$  с учетом нагрузки на обучение; приспособленность особей определяется выражением (2) (усреднено по 1000 расчетам).

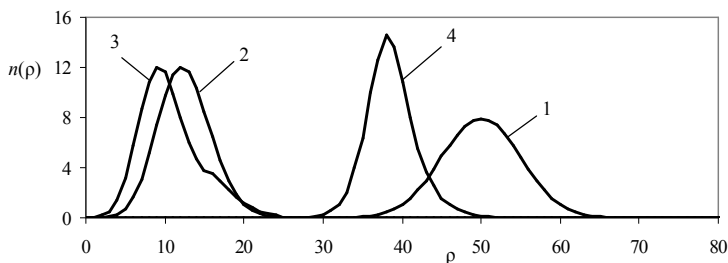


Рис. 4. Распределение особей  $n(\rho)$  по величинам  $\rho$  в первом поколении эволюции с учетом нагрузки на обучение. 1 – распределение по  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{Gk}, \mathbf{S}_M)$  для исходных генотипов до обучения, 2 – распределение по  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{Fk}, \mathbf{S}_M)$  для особей после обучения, но еще до отбора, 3 – распределение по  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{Fk}, \mathbf{S}_M)$  для отобранных особей, 4 – распределение по  $\rho = \rho(\mathbf{S}_{Gk}, \mathbf{S}_M)$  для генотипов отобранных особей в конце поколения. Смещение распределения 4 к меньшим значениям  $\rho$  существенно больше, чем на рис. 2 (усреднено по 10000 расчетам).

Сравнение рис. 1,2 и рис. 3,4 показывает, что учет нагрузки на обучение приводит к дополнительному значительному ускорению

эволюции. При учете нагрузки на обучение в конце эволюционного процесса (при  $G = 200$ ) оптимальные фенотипы и генотипы находятся. Эффект экранирования в этом случае отсутствует.

### 3. Сопоставление с подходом Хинтона и Новлана

Для сопоставления с хорошо известным подходом Хинтона и Новлана [Hinton et al., 1987] была построена дополнительная модель, также основанная на модели квазивидов. Как и основная модель, дополнительная предполагает, что имеется эволюционирующая популяция особей. Каждая особь имеет генотип и фенотип, фенотипы модифицируются путем такого же механизма обучения. Отбор в следующее поколение происходит в соответствии с конечным фенотипом, полученным в результате обучения. Только приспособленностей особей в дополнительной модели изменялась следующим образом.

1) При наличии обучения приспособленность  $k$ -й особи определяется конечным фенотипом  $S_{Fk}$  при  $t = T$ :

$$f_k = \exp[-\beta\rho(S_{Fk}, S_M)] , \quad (3)$$

где  $S_{Fk} = S_{Fk}(t = T)$ ,  $\rho = \rho(S_{Fk}, S_M)$  – расстояние по Хеммингу между  $S_{Fk}$  и оптимальной цепочкой  $S_M$ .

2) При отсутствии обучения приспособленность  $k$ -й особи равна 1, если генотип равен оптимальной цепочке и 0 во всех остальных случаях:

$$f_k = 1 \text{ при } S_{Gk} = S_M; \quad f_k = 0 \text{ при } S_{Gk} \neq S_M \quad (4)$$

Также рассматривалось влияние нагрузки на обучение. В этом случае приспособленность модифицировалась:

$$f_{mk} = \exp(-ad) \exp[-\beta\rho(S_{Fk}, S_M)] , \quad (5)$$

где  $d = \rho(S_{Gk}, S_{Fk})$ .

Анализ дополнительной модели проводился путем компьютерного моделирования для эволюции с обучением. Результаты почти совпадали с результатами исследования основной модели. Для дополнительной модели не было только явного сопоставления режимов эволюции с обучением и эволюции без обучения.

Совпадение существенных результатов для основной и дополнительной модели показывает малую роль параметра  $\varepsilon$  (см. выражения (1) и (2)) в основной модели. Этот параметр важен только для явного сопоставления режимов эволюции с обучением и чистой эволюции (см. рис.1).

## Заключение

Таким образом, построена и исследована модель взаимодействия между обучением и эволюцией. Модель использует каноническую модель эволюции – модель квазивидов, которая позволяет вести анализ механизмов взаимодействия на основе одной существенной переменной – расстояния до оптимума  $\rho$ . Количественно проанализированы механизмы взаимодействия между обучением и эволюцией.

Проведенное исследование показывает, что а) генетическая ассимиляция, б) эффект экранирования и в) значительное ускорение генетической ассимиляции и эволюционного процесса под влиянием нагрузки на обучение наблюдаются при следующих предположениях:

1) Каждая особь эволюционирующей популяции имеет генотип и фенотип.

2) Генотип и фенотип представляют собой цепочки символов одинаковой формы.

3) Генотипы передаются от родителей к потомкам с небольшими мутациями. Генотип особи не меняется в течение ее жизни.

4) Начальный фенотип особи равен ее генотипу.

5) Имеется определенная оптимальная цепочка символов, которая ищется в процессе обучения и эволюции.

6) Фенотип существенно модифицируется путем обучения в течение жизни особи. В процессе обучения фенотип приближается к оптимальной цепочке.

7) Отбор особей в новое поколение определяется конечными фенотипами особей.

## Список литературы

- [Кимура, 1985] Кимура М. Молекулярная эволюция: теория нейтральности. – М.: Мир, 1985.
- [Редько и др., 2005] Редько В.Г., Цой Ю.Р. Оценка эффективности эволюционных алгоритмов. // Доклады АН, 2005. Т. 404. № 3. С. 312-315.
- [Редько и др., 2011] Редько В.Г., Цой Ю.Р. Оценка скорости и эффективности эволюционных алгоритмов. // Бионические информационные системы и их практические применения. – М.: Физматлит, 2011. С. 109-126.
- [Эйген, 1973] Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. – М.: Мир, 1973.
- [Эйген и др., 1982] Эйген М., Шустер П. Гиперцикл. Принципы самоорганизации макромолекул. – М.: Мир, 1982.
- [Hinton et al., 1987] Hinton G.E G.E., Nowlan S.J. How learning can guide evolution. // Complex Systems. 1987. V. 1. P. 495-502.
- [Mayley, 1997] Mayley G. Guiding or hiding: Explorations into the effects of learning on the rate of evolution. // Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life (ECAL 97). Cambridge, Massachusetts: MIT Press. 1997. P. 135-144.