

# ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕЖДУ ОБУЧЕНИЕМ И ЭВОЛЮЦИЕЙ: НА СТЫКЕ ТЕОРИЙ ДАРВИНА И ЛАМАРКА\*

*Редько В.Г. д.ф.-м.н.*

*Научно-исследовательский институт системных исследований  
РАН*

*e-mail: [vgredko@gmail.com](mailto:vgredko@gmail.com)*

## 1. ВВЕДЕНИЕ

После появления дарвиновской теории эволюции возник вопрос: если эволюционный процесс происходит в результате мутаций и последующего отбора, то могут ли за счет случайного мутационного поиска возникать весьма нетривиальные полезные навыки живых организмов? И еще в XIX веке возникли концепции, предполагающие, что индивидуальное обучение может существенно способствовать эволюционному процессу. Эффект ускорения эволюционного процесса в результате обучения часто называют эффектом Болдуина [1,2] по имени одного из авторов этих концепций. Ускорение эволюции может происходить за счет генетической ассимиляции приобретенных в процессе индивидуального обучения навыков, а именно, «переоткрытия» таких навыков в течение ряда поколений эволюции и запоминания их непосредственно в геноме особей.

Попытки моделирования взаимодействия между обучением и эволюцией проводились рядом авторов, см. например, сборники [1,2] и работы [3-6]. В [3] продемонстрировано, что обучение может направлять эволюционный процесс к нахождению оптимума. В [4] показано, что эффективное обучение также может наоборот препятствовать эволюционной оптимизации и генетической ассимиляции, если обучение увеличивает шансы нахождения хорошего фенотипа независимо от генома особи; это было названо эффектом экранирования. В [4] было также учтено, что процесс обучения имеет дополнительную нагрузку на особь и приспособленность особи может уменьшаться под влиянием этой нагрузки.

В работах [5,6] моделировалось взаимодействие между обучением и эволюционной оптимизацией автономных агентов с нейросетевой

---

\* Работа поддержана программой Президиума РАН № 15, проект 2.10

системой управления. В этих моделях наблюдалась генетическая ассимиляция приобретаемых навыков в течение нескольких поколений эволюции агентов. Однако механизмы взаимодействия между обучением и эволюцией были «спрятаны» в динамике весов синапсов нейронных сетей агентов.

Данная работа развивает указанные исследования, в ней построена и исследуется модель взаимодействия между обучением и эволюционной оптимизацией. Отталкиваемся от работ [3,4], в которых продемонстрировано влияние обучения на эволюционную оптимизацию. Однако в этих работах были использованы довольно сложные схемы генетического алгоритма со скрещиванием, поэтому механизмы влияния обучения на эволюционную оптимизацию были представлены недостаточно четко. Для анализа механизмов взаимодействия между обучением и эволюцией используем одну из наиболее четких моделей эволюции – модель квазивидов [7] и характеристики модели квазивидов, исследованные в [8,9]. Модель квазивидов основана на отборе и мутациях геномов модельных особей.

Далее построена и исследована модель взаимодействия между обучением и эволюционной оптимизацией. Изучены следующие механизмы: 1) механизм генетической ассимиляции приобретаемых навыков; 2) механизм влияния нагрузки на обучение, которая приводит к значительному ускорению эволюции; 3) механизм эффекта экранирования, приводящего к тому, что сильное обучение тормозит эволюционный поиск.

## **2. МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ОБУЧЕНИЕМ И ЭВОЛЮЦИЕЙ**

Рассматриваем эволюционирующую популяцию модельных особей. Предполагаем, что генотип (или геном) и фенотип особи определяются единообразно, а именно, задаются цепочками символов, равных 0 либо 1; длина этих цепочек одинакова и равна  $N$ .

Например, можно считать, что геном кодируется модельной цепочкой ДНК, «буквы» которой равны 0 либо 1, а фенотип определяется нейронной сетью особи, при этом веса синапсов нейронной сети также равны 0 либо 1. Начальные веса синапсов, полученные при рождении, определяются геномом (точнее, просто равны геному), а в процессе жизни особи эти веса меняются путем обучения.

Популяция состоит из  $n$  особей, геномы которых равны  $\mathbf{S}_{Gk}$ ,  $k = 1, \dots, n$ . Геном  $\mathbf{S}_{Gk}$  представляет собой цепочку (или последовательность) символов  $S_{Gki}$ ,  $i = 1, \dots, N$ . Предполагаем, что

длина цепочки  $N$  и численность популяции  $n$  велики:  $N, n \gg 1$ , и что  $N$  и  $n$  не меняются в ходе эволюции. Символы  $S_{Gki}$  равны 0 либо 1. Предполагаем, что  $N$  настолько велико, что только малая часть из всех возможных  $2^N$  геномов может быть представлена в отдельной популяции:  $2^N \gg n$ . Эволюционный процесс состоит из последовательности поколений. Новое поколение получается из старого путем отбора и мутаций особей. В нулевом поколении геномы особей случайны.

Имеется процесс обучения. В связи с этим в данной модели кроме геномов  $S_{Gk}$  вводятся текущие последовательности  $S_{Tk}$ . При размножении потомки наследуют геномы своих родителей  $S_{Gk}$ , эти геномы не меняются в течение жизни особи и передаются (с малыми мутациями) своим потомкам. Мутации состоят в случайной замене символов  $S_{Gki}$ . В момент рождения текущая последовательность особи  $S_{Tk}$  равна ее геному  $S_{Gk}$ :  $S_{Tk}(t=1) = S_{Gk}$ . После рождения особи живут в течение  $T$  тактов времени,  $T$  – время жизни одного поколения. Время дискретно:  $t = 1, \dots, T$ . Последовательность  $S_{Tk}$  меняется в течение жизни особи путем обучения.

Предполагается, что имеется случайная оптимальная последовательность  $S_m$  длины  $N$  (компоненты которой также равны 0 или 1), которая ищется в процессе эволюции и обучения особей.

Обучение происходит методом проб и ошибок. При обучении меняются символы последовательностей  $S_{Tk}$ : каждый такт времени  $t$  каждый символ  $S_{Tki}$  с определенной вероятностью  $p_l$  меняется на случайный (равный 0 либо 1), и если этот символ совпадает с соответствующим символом оптимальной последовательности  $S_m$ , то этот символ сохраняется; в противном случае происходит возврат к старому символу последовательности  $S_{Tk}$ .

В конце поколения происходит отбор особей в соответствии с их приспособленностями, определяемыми последовательностями  $S_{Tk}$  в такт времени  $t = T$ . Обозначим эти последовательности  $S_{Fk} = S_{Tk}(t = T)$ . Приспособленность особи  $S_k$  определяется расстоянием по Хеммингу  $\rho(S_{Fk}, S_m)$  между последовательностями  $S_{Fk}$  и  $S_m$ :

$$f(S_k) = \exp[-\rho(S_{Fk}, S_m)] + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $0 < \varepsilon \ll 1$ . Роль слагаемого  $\varepsilon$  можно рассматривать как влияние случайных факторов окружающей среды на приспособленность особей.

Отбор особей в новое поколение производится рулеточным методом (см. например, [8]), при котором особи отбираются в новое

поколение вероятностным способом. Выбор особи в следующее поколение производится  $n$  раз, в результате численность популяции во всех поколениях равна  $n$ . При каждом выборе вероятность селекции определенной особи пропорциональна ее приспособленности.

Дополнительно, как и в [4], учтем то, что процесс обучения имеет определенную нагрузку на особь и приспособленность особи может уменьшаться под влиянием этой нагрузки. С этой целью будем рассматривать также модифицированные следующим образом приспособленности особей:

$$f_m(\mathbf{S}_k) = \exp(-d) \{ \exp[-\rho(\mathbf{S}_{Fk}, \mathbf{S}_m)] + \varepsilon \}, \quad (2)$$

где  $d = \rho(\mathbf{S}_{Gk}, \mathbf{S}_{Fk})$  – расстояние по Хеммингу между начальной и конечной текущей последовательностями рассматриваемой особи, т.е. величина, характеризующая интенсивность всего процесса обучения особи. Введенный в (2) фактор  $\exp(-d)$  приводит к уменьшению приспособленности особи, это уменьшение тем больше, чем больше было изменение текущей последовательности  $\mathbf{S}_{Tk}$  в процессе обучения.

Отметим, что поскольку начальные последовательности особей в исходной популяции  $\mathbf{S}_{Gk}$  случайны, то среднее расстояние по Хеммингу между этими последовательностями и оптимальной  $\mathbf{S}_m$  равно  $N/2$ . Такое расстояние нужно преодолеть путем обучения и эволюционного поиска.

Таким образом, обучаемые особи отбираются в новое поколение по конечным текущим последовательностям особей  $\mathbf{S}_{Fk} = \mathbf{S}_{Tk}(t = T)$ , т.е. по конечному результату обучения, а по наследству передаются потомкам (с малыми мутациями) геномы  $\mathbf{S}_{Gk}$ , которые особи получают от своих родителей.

Поскольку потомкам передаются именно геномы  $\mathbf{S}_{Gk}$ , полученные от родителей, а не последовательности, полученные в результате обучения, то эволюционный процесс имеет дарвиновский характер.

Анализ модели был проведен путем компьютерного моделирования.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Схема и параметры моделирования.** Рассматриваем два режима работы модели: 1) с обучением, как изложено выше, 2) без обучения, в этом случае обучения не происходит и считается, что  $\mathbf{S}_{Tk} = \mathbf{S}_{Gk}$ . Второй режим можно считать случаем «чистой эволюции».

При расчетах параметры модели выбираем таким образом, чтобы эволюционный поиск проходил достаточно эффективно, при этом

используем опыт работы [9] для случая чистой эволюции (в [9] приспособленность определялась аналогично (1), только считалось  $\varepsilon = 0$ ). Полагаем, что длина цепочек достаточно велика:  $N = 100$ . Интенсивность мутаций должна быть не слишком высока, чтобы не было мутационных потерь уже найденных в процессе эволюции особей, но и не слишком мала, для того, чтобы мутационный поиск происходил достаточно быстро. С учетом этого полагаем, что вероятность замены любого символа в последовательностях  $S_{Gk}$  при мутациях равна  $p_m = N^{-1} = 0.01$ . При такой интенсивности мутаций  $p_m$  за одно поколение происходит замена примерно одного символа в геноме особи, т.е. в течение одного поколения за счет мутаций расстояние по Хеммингу  $\rho$  между последовательностями особей  $S_k$  и оптимальной последовательностью  $S_m$  изменяется в среднем на 1. Отбор приводит к уменьшению этого расстояния. Поскольку расстояние по Хеммингу между последовательностями особей нулевого поколения и оптимальной  $S_m$  порядка  $N$ , то весь процесс эволюции займет порядка  $G_T \sim N$  поколений. Такая оценка скорости эволюции справедлива, если численность популяции достаточно велика и нейтральной фиксацией особей (независящей от приспособленности особей) можно пренебречь. Для выполнения этого условия достаточно потребовать, чтобы характерное время нейтрального отбора (по порядку величины равно  $n$  [9]) было не меньше  $G_T$ , поэтому полагаем  $n = G_T = N$ .

Итак, параметры расчета в соответствии с опытом работы [9] выбираем следующим образом:  $N = n = 100$ ,  $p_m = 0.01$ .

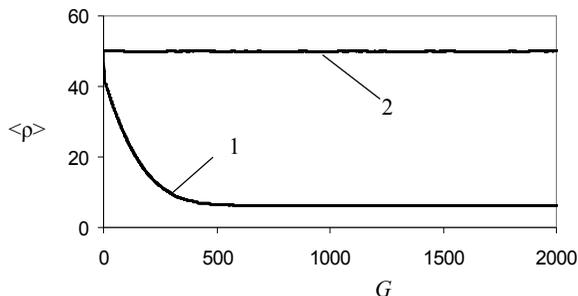
Также считаем, что вероятность случайной замены символов при обучении достаточно велика:  $p_l \sim 1$  (обычно полагалось  $p_l = 1$ ), число тактов времени в течение поколения равно  $T = 2$  (выбор таких параметров  $p_l$  и  $T$  приводит к тому, что обучение происходит достаточно быстро), параметр  $\varepsilon$  достаточно мал:  $\varepsilon = 10^{-6}$ .

Для наиболее четкого выяснения количественных результатов все полученные зависимости были усреднены по 1000 или 10000 расчетам.

### **Сопоставление режимов с обучением и без обучения.**

Сопоставим результаты расчетов для режимов с обучением и без обучения. На рис. 1 представлена зависимость от номера поколения  $G$  среднего по популяции расстояния по Хеммингу  $\rho = \rho(S_k, S_m)$  между рассматриваемой последовательностью  $S_k$  и оптимальной последовательностью  $S_m$  в начале поколения (т.е. в данном случае  $\rho = \rho(S_k, S_m) = \rho(S_{Gk}, S_m)$ ). Кривая 1 характеризует режим с обучением, кривая 2 – режим без обучения. Полученные зависимости усреднены

по 1000 расчетам. Приспособленности особей определялись выражением (1). Видно, что без обучения при даже малом  $\varepsilon$  чисто эволюционный процесс (кривая 2) не обеспечивает оптимизации особей  $S_k$ , а при наличии обучения (кривая 1) явно происходит приближение к оптимальной особи  $S_m$ .

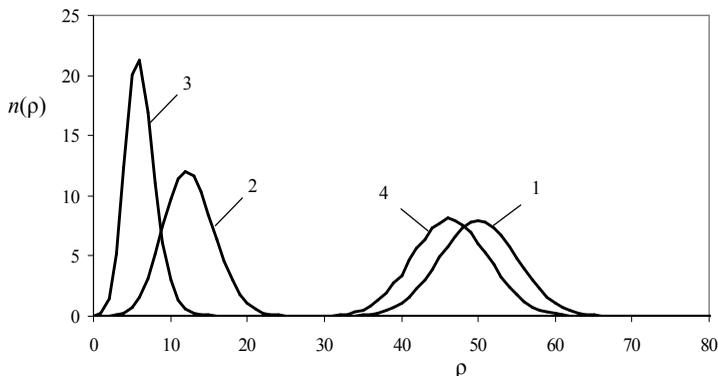


**Рис. 1.** Зависимость среднего по популяции расстояния до оптимума  $\langle \rho \rangle = \langle \rho(S_k, S_m) \rangle$  от номера поколения  $G$ ; 1 – режим с обучением, 2 – режим чистой эволюции

Чтобы разобраться, почему не происходит уменьшения  $\rho$  в процессе чистой эволюции, оценим величину приспособленности (1) в исходной популяции. Для особей исходной популяции имеем  $\rho \sim N/2 = 50$ , следовательно,  $\exp(-\rho) \sim 10^{-22}$  и  $\exp(-\rho) \ll \varepsilon$ . Это означает, что все особи популяции имеют приблизительно одинаковое значение приспособленности, равное  $\varepsilon$ , и, следовательно, в случае чистой эволюции вообще не происходит селекции особей и приближения к оптимальной особи. Приближение к  $S_m$  происходит только при наличии обучения, которое приводит к понижению  $\rho$ .

Анализ результатов расчета показывает, что постепенное уменьшение величин  $\rho = \rho(S_k, S_m)$  при наличии обучения происходит следующим образом (рис. 2). Сначала при обучении распределение особей  $n(\rho)$  смещается в сторону меньших  $\rho$ , в результате чего величины  $\rho = \rho(S_{F_k}, S_m)$  становятся достаточно малыми, такими, что  $\exp[-\rho(S_{F_k}, S_m)] \sim \varepsilon$ . На рис. 2 это соответствует переходу от кривой 1 к кривой 2. Далее в соответствии с приспособленностями (1) из этих особей в следующее поколение отбираются особи с малыми значениями  $\rho = \rho(S_{F_k}, S_m)$  (переход к кривой 3). Интуитивно понятно, что геномы  $S_{G_k}$  отобранных особей должны быть достаточно близки к конечным последовательностям  $S_{F_k}$  (полученным в результате

обучения и отбора) этих особей. Поэтому в результате отбора происходит селекция особей, геномы которых также приближаются к  $S_m$ . Это соответствует тому, что кривая 4 приближается к кривой 3. В результате при переходе к новому поколению величина  $\rho$  в популяции уменьшается.



**Рис. 2.** Распределение особей  $n(\rho)$  по величинам  $\rho$  в первом поколении эволюции: 1 – распределение по  $\rho = \rho(S_{Gk}, S_m)$  для исходных геномов 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 геномов отобранных особей в конце поколения (усреднено по 10000 расчетам)

Подчеркнем, что в результате обучения происходит смещение к достаточно малым  $\rho$ , при которых роль параметра  $\varepsilon$  значительно уменьшается и существенно различаются приспособленности (1), так что после обучения происходит эффективный отбор особей с меньшими значениями  $\rho(S_{Fk}, S_m)$ . Понятно, что для того, чтобы изложенный механизм работал, обучение должно быть достаточно сильным.

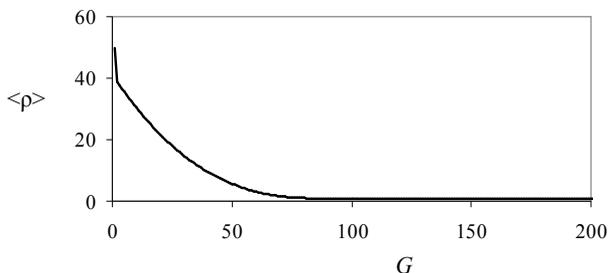
**Эффект экранирования.** Однако сильное обучение может не только способствовать эволюции, но и препятствовать нахождению оптимума. Как показывает кривая 1 на рис. 1, при больших  $G$  уменьшение  $\langle \rho \rangle$  ограничено: конечное значение  $\langle \rho \rangle$  остается достаточно большим, приблизительно равным 6.2. Это связано с тем, что для сильного обучения ( $p_l = 1$ ,  $T = 2$ ) при  $G \sim 1000$  нахождение

последовательностей  $S_k$ , близких к оптимальной  $S_m$ , происходит практически независимо от генома  $S_{Gk}$ . Это подтверждается и анализом распределений по  $\rho$  в конце эволюционного процесса: при  $G > 1000$  за счет обучения находится оптимальная особь, поэтому дальнейшего уменьшения  $\rho$  в популяции не происходит.

Эффект экранирования можно существенно ослабить, если уменьшить интенсивность обучения, например, положив  $p_l = 0.5$ . Действительно, результаты расчетов показывают, что для этого случая скорость уменьшения  $\langle \rho \rangle$  в процессе эволюции падает, однако конечное значение  $\langle \rho \rangle$  значительно уменьшается и становится приближенно равным 1.4.

### **Влияние нагрузки на обучение на моделируемые процессы.**

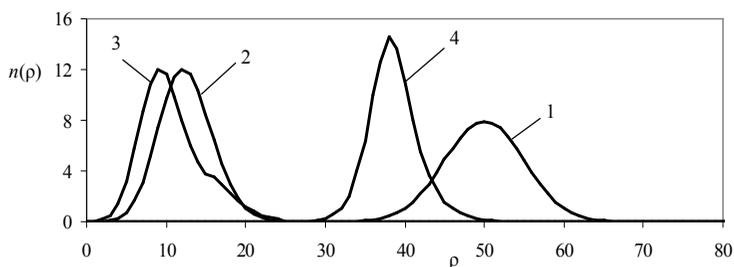
Также был проведен анализ влияния нагрузки на обучение на моделируемые процессы эволюции с обучением. Для этого случая приспособленность определялась выражением (2). Результаты расчета представлены на рис. 3, 4. На рис. 3 показана зависимость среднего по популяции расстояния  $\langle \rho \rangle$  между последовательностями  $S_{Gk}$  и оптимальной последовательностью  $S_m$  от номера поколения  $G$ . На рис. 4 представлена динамика распределения 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 геномов особей от номера поколения  $G$ , приспособленность особей определяется выражением (2), усреднено по 1000 расчетам**

Сравнение рис. 1,2 и рис. 3,4 показывает, что учет нагрузки на обучение приводит к значительному ускорению эволюции. Это ускорение связано с тем, что с учетом нагрузки при отборе происходит более сильная селекция особей, для которых мало расстояние между

начальной и конечной текущими последовательностями  $S_{T_k}$   $d = \rho(S_{G_k}, S_{F_k})$ , чем для случая приспособленности (1), т.е. дополнительно минимизируется изменение последовательности в процессе обучения. В конце эволюционного процесса (при  $G = 200$ ) особи  $S_m$ , для которых  $\rho = 0$ , в популяции присутствуют в начале поколения, после обучения и после отбора.



**Рис. 4. Распределение особей  $n(\rho)$  по величинам  $\rho$  в первом поколении эволюции с учетом нагрузки на обучение, 1 – распределение по  $\rho = \rho(S_{G_k}, S_m)$  для исходных геномов, 2 – распределение по  $\rho = \rho(S_{F_k}, S_m)$  после обучения, но еще до отбора, 3 – распределение по  $\rho = \rho(S_{F_k}, S_m)$  для отобранных особей, 4 – распределение по  $\rho = \rho(S_{G_k}, S_m)$  для геномов отобранных особей в конце поколения (усреднено по 10000 расчетам)**

Подчеркнем, что генетическая ассимиляция для случаев приспособленностей, определяемых выражением (1) и выражением (2), имеет одну и ту же природу. В обоих случаях геномы отобранных особей  $S_{G_k}$  приближаются к последовательностям  $S_{F_k}$  обученных и отобранных особей. Т.е. на рис. 2 и 4 кривые 4 приближаются к кривым 3. Существенное различие состоит в том, что с учетом нагрузки на обучение это приближение становится более эффективным. В результате при использовании приспособленности, вычисляемой согласно (2), генетическая ассимиляция становится более четко выраженной.

Таким образом, учет нагрузки на обучение для рассматриваемых эволюционных процессов приводит к тому, что процесс эволюции значительно ускоряется.

## 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проанализирован механизм генетической ассимиляции приобретаемых навыков в течение ряда поколений эволюционного процесса. В результате генетической ассимиляции приобретаемые в индивидуальном обучении навыки особей в течение ряда поколений записываются непосредственно в геном.

Изучен эффект экранирования, при котором сильное обучение может тормозить эволюционный поиск оптимума. Показано, что при ослаблении обучения роль эффекта экранирования уменьшается.

Проанализировано влияние нагрузки на обучение на исследованные процессы. Показано, что наличие нагрузки на обучение приводит к значительному ускорению эволюции.

Тот факт, что черты, приобретаемые в процессе обучения (в рассмотренном случае это свойство приближения к оптимуму), в течение ряда поколений дарвиновской эволюции становятся наследуемыми, показывает, что в эволюции по Дарвину проявляются некоторые особенности, характерные для эволюции по Ламарку.

### Литература

1. Adaptive Individuals in Evolving Populations: Models and Algorithms. Eds. Belew R.K. and Mitchell M. Massachusetts: Addison-Wesley, 1996.
2. Evolution, Learning, and Instinct: 100 Years of the Baldwin Effect. Eds. Turney P., Whitley D., Anderson R. Special Issue of Evolutionary Computation on the Baldwin Effect, 1996. Vol. 4. No. 3.
3. Hinton G.E., Nowlan S.J. How learning can guide evolution // Complex Systems. 1987. Vol. 1. No. 3. P. 495-502.
4. 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). Eds. Husbands P. and Harvey I. Cambridge, Massachusetts: MIT Press. 1997. P. 135-144.
5. Red'ko V.G., Mosalov O.P., Prokhorov D.V. A model of evolution and learning // Neural Networks, 2005. Vol. 18. No. 5-6. P. 738-745.
6. Редько В.Г., Редько О.В. Бионическая модель генетической ассимиляции приобретаемых навыков // Научная сессия НИЯУ МИФИ - 2010. XII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика-2010»: Сборник научных трудов. В 2-х частях. Ч.1. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. С. 191-198.
7. Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М.: Мир, 1973.
8. Редько В.Г. Эволюция, нейронные сети, интеллект. Модели и концепции эволюционной кибернетики. М.: УРСС. 2005.
9. Редько В.Г., Цой Ю.Р. Оценка эффективности эволюционных алгоритмов // Доклады АН, 2005. Т. 404. № 3. С. 312-315.