

## Биосфера как иерархия активных сред. Аспекты самоорганизации

Сидорова А.Э., Твердислов В.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
физический факультет

[sky314bone@mail.ru](mailto:sky314bone@mail.ru)

Предложена и развита концепция эволюции биосферы как процесса самоорганизации в иерархически сопряженных активных средах. Подобный аналитический подход позволяет по-новому рассмотреть идеи бифуркационного и, как следствие, скачкообразного развития популяций, сообществ организмов и биосферы в целом. Движущей силой эволюции биосферы – «нагнетающим насосом» – в модели служит иерархия распределенных активных сред, составленных совокупностью биоценозов. Активная среда создает фронтальное «давление естественного отбора». Нелинейный неравновесный фронт формирует гигантские флуктуации, с которыми «работает» фильтр естественного отбора, позволяющий выйти данной ветви эволюции на устойчивую траекторию развития и закрепиться на ней. В модели «естественный отбор» – пассивный элемент, формирующий самосогласованный поток эволюционного развития биосферы, движимый распределенным ресурсом свободной энергии стратифицированной активной среды биосферы. В своё устройство фильтр включает компоненты геосферы и компоненты самой биосферы. В отличие от классического филогенетического древа, отражающего принцип вертикальной эволюции биосферы, в данном подходе биосфера – единая живая система, эволюционирующая по законам, определяемым отбором, переносом генов, конвергенцией и дивергенцией – инструментами эволюции. Трёхмерная сеть прямых и обратных связей позволяет рассматривать иерархию активных сред как эволюционирующую биосферу

*Ключевые слова: иерархия активных сред, автоволны, биосфера, эволюция.*

## Biosphere as a hierarchy of active media. Aspects of self-organization

Sidorova A.E., Tverdislov V.A.

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Physics, Moscow, Russian Federation

The concept of evolution of the biosphere as a process of self-organization in hierarchically conjugate active media is proposed and developed. Such an analytical approach allows us to re-examine the ideas of the bifurcation and, as a consequence, the saltatory development of populations, communities of organisms and the biosphere as a whole. The driving force behind the evolution of the biosphere – the "pumping pump" – is the hierarchy of distributed active media composed of a set of biocenoses. The active medium creates a frontal "pressure of natural selection". A nonlinear nonequilibrium front forms giant fluctuations with which the natural selection filter "works", allowing the branch of evolution to leave the stable development trajectory and gain a foothold on it. In the model of "natural selection" – a passive element that forms a self-consistent flow of evolutionary development of the biosphere, driven by a distributed resource of free energy of the stratified active environment of the biosphere. In its device, the filter includes components and components of the geosphere and components of the biosphere itself. Unlike the classical phylogenetic tree, which reflects the principle of vertical evolution of the biosphere, in this approach the biosphere is a single living system evolving according to the laws determined by selection, gene transfer, convergence and divergence-evolution tools. A three-dimensional network of direct and inverse connections allows us to consider the hierarchy of active media as an evolving biosphere.

*Key words: hierarchy of active media, autowaves, biosphere, evolution.*

К важнейшим аспектам самоорганизации живых систем относятся: гомеостаз (способность открытой системы сохранять динамическое равновесие посредством скоординированных реакций на

внешнее/внутреннее воздействие), адаптация (подстройка открытой системы к внешним флуктуациям) и эволюция (совместное развитие функций и структуры открытой системы в

пространстве и времени). Именно в процессе эволюции система претерпевает множество структурных и функциональных изменений, переход количественных изменений в качественные. С физической точки зрения для процесса эволюции особое значение имеют следующие характеристики системы: [1, 2]: способность к экспорту энтропии во внешнюю среду в процессах преобразования энергии, вещества и информации; закритическое расстояние от состояния термодинамического равновесия; нелинейность; кооперативный характер взаимодействия подсистем; способность к спонтанному нарушению симметрии; способность к образованию относительно точных копий исходной системы или подсистем.

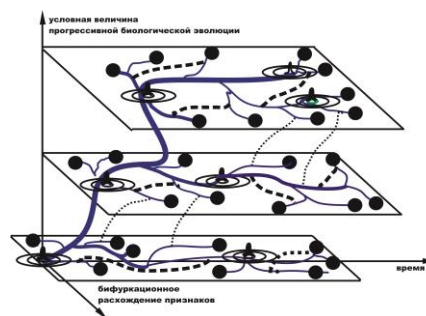
Все эти, в основе своей физико-химические, характеристики биосферы в полной мере включены в процесс биологической эволюции. Биологическая эволюция – это рассредоточенный в пространстве и времени процесс самоорганизации, в ходе которого перемежаются устойчивые и неустойчивые состояния – эволюционный цикл. В этом процессе участвуют как внутренние, так и внешние факторы. Система становится структурно (и функционально) неустойчивой при отключении / поражении механизмов устойчивости, либо в том случае, когда скорость включения новых элементов значительно больше скорости адаптации системы (как обратной отрицательной связи). [3, 4]. В результате процесса самоорганизации происходит скачкообразное изменение состояния биологической системы – формирование структурно и функционально новых иерархических уровней, связанное с усложнением организмов.

Иерархичность организации является столь же принципиально важным для биологической эволюции свойством живых объектов, как и их дискретность. За счет индивидуального разнообразия элементов дискретность обеспечивает особенности горизонтального и вертикального взаимодействия, определяющие устойчивое развитие популяций, а иерархичность – системную направленность интегрального процесса эволюции. Дискретность делает возможным естественный отбор, микроэволюцию, иерархичность позволяет сопрягать разномасштабные процессы в пространстве и времени, выделяя общее направление макроэволюции.

Распределенный ресурс системы (энергии, вещества, информации) утилизируется связанными между собой «диффузией» и нелинейными локальными трансформаторами энергии. Для физико-химической системы – это распространяющаяся в пространстве фаза процесса, для биосферы – это и изменение ареала, и изменение генома. Активная среда, будучи нелинейной диссипативной системой, «способна» создать начинающуюся с флуктуаций упорядоченную пространственно-временную структуру с пониженным, относительно исходного,

рангом симметрии. Тогда как внешние воздействия, вызывающие различные явления в стационарной линейной макроскопической системе, не могут обладать более высокой симметрией, чем порождаемый ими процесс. В ходе автоволновой самоорганизации активная среда способна сопрягать процессы, соизмеримые в масштабах двумерного горизонтального пространства и времени (когерентность). Иерархичность биологических систем предопределяет возможность сопряжения процессов разного масштаба в пространстве и времени. Симметричная особенность элементов системы – хиральность структур смежных иерархических уровней делает возможной их устойчивую стратификацию [5].

В отличие от классического филогенетического древа, отражающего принцип вертикальной эволюции биосферы, в нашем представлении биосфера – системно единый организм, эволюционирующий по законам, определяемым отбором, переносом генов, конвергенцией и дивергенцией – механизмами эволюции. Эта трехмерная сеть прямых и обратных связей позволяет нам рассматривать эволюционирующую биосферу как иерархию активных сред (рис. 1).

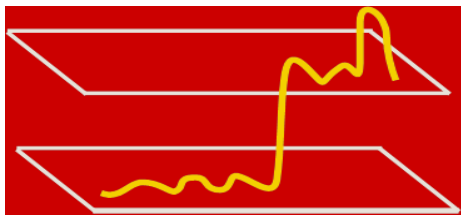


**Рис. 1.** Трехмерная сеть активной среды иерархических уровней эволюции биосферы.  
 ————— — вертикальный поступательный перенос генов в одной филогенетической ветви;  
 - - - - - — вертикальный и горизонтальный;  
 ..... — межвидовой перенос генов;  
 ○ — области водителей ритма в активной среде отражают переход «случайных» мутаций в закрепившиеся свойства видов.

Эволюционный процесс можно уподобить потоку, который вызывается или всасывающим, или нагнетающим насосом, а естественный отбор – это «фильтр» на пути движущегося потока, определяющий траектории развития отдельных популяций и видов в данный момент времени и в данном биоценозе [5]. Движущей силой эволюции биосферы – «нагнетающим насосом» – служит иерархия распределенных активных сред, составленных мозаикой биоценозов, несущих ресурс свободной энергии для эволюционного движения. В отличие от пассивной среды, в которой возможны малые флуктуации, гетерогенная активная среда способна формировать регулярные в пространстве и времени гигантские флуктуации, обретающие структурой, по которым фильтр

естественного отбора распознает и выделяет отдельные траектории эволюции видов, сопряженные с развитием биоценозов.

В целом, активная среда создает фронтальное «давление естественного отбора». Нелинейный неравновесный фронт формирует гигантские флуктуации, с которыми «работает» внешний фильтр естественного отбора, позволяющий выйти данной ветви эволюции на устойчивую траекторию развития и закрепиться на ней (рис. 2). В модели «естественный отбор» – пассивный элемент, формирующий самосогласованный поток эволюционного развития биосферы, движимый циклическими потоками энергии и вещества в единой биогеосфере. Среда с локальными неоднородностями может выступать в роли эффективного однонаправленного автоволнового фильтра [5]. В своё устройство фильтр включает и компоненты геосферы и компоненты биосферы.

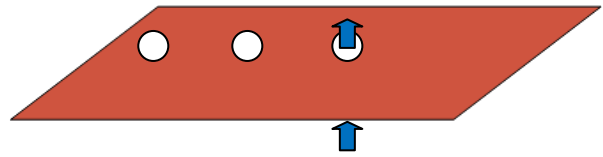


**Рис. 2.** Формирование гигантских флуктуаций мутационного процесса.

Отбор способствует формированию стабильной иерархической структуры, а также устойчивой системы горизонтальных взаимодействий посредством контроля наследственного закрепления приобретенных признаков. Генетический дрейф «работает» в пространстве и времени и направлен на горизонтальное перераспределение признаков между популяциями, а вертикальный перенос генов на закрепление генетического материала в поколениях. В ходе эволюции, находящейся под управлением отбора и дрейфа, за счет эффекта «генетической тяги» могут закрепляться не только положительные, но также нейтральные и умеренно вредные мутации. «Точки приложения» дивергенции и конвергенции – точки бифуркации. При этом наличие в системе «поддерживающих» мутаций служит основой автокаталитических режимов, характерных для автоволновой самоорганизации в активных средах. А дивергенция и конвергенция играют роль направляющих векторов в пространстве и времени в точках бифуркации. Устойчивость эволюционного процесса биосферы определяется диалектическим единством дивергенции и конвергенции в процессе развития эволюционирующих систем и закрепляется на уровне вида.

Естественный отбор можно сравнить с явлением перколяции (рис. 2). Система перколяций (как и естественный отбор) – распределенная пассивная среда, а эволюционирующая биосфера – распределенная активная среда. На уровне микроэволюции каждая отдельная мутация должна

повышать приспособленность, иначе она будет отсеяна отбором. При этом эффект мутаций зависит от ранее закрепившихся. Ограниченность числа допустимых «мутационных траекторий» делает эволюцию в достаточной степени предопределенным, а траектория эволюции в значительной степени определяется случайными процессами, результаты которых на разных этапах могли блокироваться более поздними мутациями. Т.е., большинство возможных вариантов нефункциональны, но практически все функциональные варианты образуют общую сеть прямых и обратных связей. Выбор пути зависит от [6]: набора «разрешающих» мутаций и выбора одного из доступных маршрутов.



**Рис. 3.** Перколяционная решетка популяционного уровня.

Элементарной единицей эволюционного отбора является популяция, единицей устойчивого эволюционирования – биоценоз. Поэтому любой из механизмов регулирования численности и плотности популяций, «работающих» в реакторе микроэволюции, может инициировать формирование водителей ритма и вызвать автоколебательные и автоволновые процессы. В ряде случаев совпадающими по фазе оказываются циклические колебания численности не только разных популяций одного вида, но и разных видов, обитающих в общей экосистеме. Повышение численности и плотности популяции, изменение факторов среды «вынуждает» популяцию к фенотипическим и генотипическим изменениям и способствует синхронизации циклов – возникновению когерентных состояний. Снижение плотности и численности популяции снижает ее ресурс как активной среды, и в этом случае, даже при возникновении водителей ритма, распространение автоволн затруднительно, причем даже в однородной среде [5].

Явление перколяции определяется [7]: параметрами популяции (эффективный размер популяции и наличие закрепившихся мутаций – перколяционный кластер); способом протекания среды; количеством узлов; параметрами в окрестности перехода – порога перколяции. В качестве узлов решетки принимаем эффективный размер популяции для поколений:

$$N_e = n / (1/N_1 + 1/N_2 + \dots + 1/N_n),$$

где  $N_i$  – численность популяции в  $i$ -м поколении.  $N_e$  равно гармоническому среднему из значений  $N_i$  (наиболее близко к наименьшему значению  $N_i$ ). Вероятность закрепления мутаций в популяции –  $P(x)$ . Порог протекания [8] связан с  $N_{эф}$  и количеством закрепившихся на популяционном

уровне мутаций. Вероятность  $PN^{(b)}(x)$  для конечного числа узлов  $N_{эф}$  отлична от нуля при  $0 < x < x_c$  и  $N \rightarrow N_{эф}$ . При некотором минимальном критическом значении доли целых узлов ( $N_{эф}$ ) вероятность существования соединяющего кластера обращается в нуль – порог протекания  $x_c = N_{эф}/N$ .

Процесс биологической эволюции связан с усложнением организмов и, соответственно, с размерами функциональной части генома (МГР) – «программой» развития и функционирования организма. Чем больше размер генома, тем больше вероятность обеспечения большего числа потенциальных «ниш» для новых генов [9]. В эволюционной линии от прокариот к млекопитающим отчетливо прослеживается положительная корреляция между МГР и сложностью организма [9–11]. Принято считать, что к основным механизмам увеличения размера МГР относятся: дупликация фрагментов ДНК, формирование новых функциональных участков ДНК (кодирующих и регуляторных) на основе комбинаторного принципа [10], закономерности эволюции генных сетей [12], появление новых регуляторных последовательностей [13], МГЭ [13, 14].

Безусловно, все эти механизмы чрезвычайно важны, но все они в той или иной мере связаны с мутационными процессами – двигателем биологической эволюции. Мы полагаем, что основным механизмом формирования МГР служат мутации – активатор процесса автоволновой самоорганизации, способствующий формированию гигантских флуктуаций в ходе видообразования, а основным ингибитором – системы репарации, обеспечивающие баланс между стабильностью информации в ДНК и ее эволюционной изменчивостью. И чем сложнее клетка, тем большее количество структурных и регуляторных генов участвуют в процессах репарации ДНК. При этом системы репарации (прямая, эксцизионная, пострепликативная, рекомбинационная) отличаются используемыми субстратами, ферментами и механизмами устранения поврежденных звеньев. Размеры МРГ в пределах большой группы организмов существенно отличаются. Но на каждом этапе усложнения существует свой максимальный размер генома и МГР [9, 11]. При этом увеличение размера МГР как информационной составляющей биологической эволюции способствовало формированию дополнительных степеней свободы для генетических преобразований и, следовательно, росту биоразнообразия.

В [15, 16] геном рассматривается как гиперцикл. Согласно теории гиперциклов Дарвина–Эйгена, гиперциклы – это способ объединения самовоспроизводящихся макромолекул в замкнутые автокаталитические химические циклы, т.е. естественный отбор на уровне молекул [17]. Где порог Эйгена – предел, ограничивающий достоверность репликации: если произведение частоты мутаций и информационной емкости

системы (размер генома) ниже порога Эйгена – стабильное наследование, а если выше порога – мутационная катастрофа и вымирание. Известно, что в состоянии самоорганизованной критичности в которых система приобретает масштабную инвариантность [17]. В отличие от модели Бака и Снеппена (BS-модель) [17], в основе которой численность видов, мы полагаем, что в модели эволюции биосферы на каждой ступени иерархической сложности организмов в качестве предела этой сложности может рассматриваться МРГ. В нашей бифуркационной модели, в отличие от теории Эйгена, «порог» – это не катастрофа для системы, а появление нового качественного состояния за счет укоренения мутаций. Системы с большим количеством взаимодействующих элементов, благодаря накоплению малых флуктуаций и возникновению гигантской флуктуации переходят в новое качественное состояние через критические точки – состояния самоорганизованной критичности. В этом случае в системе существуют два состояния устойчивости, и одно соответствует состоянию самоорганизованной критичности в процессе видообразования – размер МГР на основных этапах эволюции больших групп организмов.

## Заключение

Изложенные представления фактически отражают нелинейность биологических процессов в автоволновой гипотезе эволюции биосферы на основных иерархических уровнях. Построенная на представлениях о бифуркациях идея биологической эволюции отражает единство двух противоположностей – прогресса и необратимости в эволюции. С физической точки зрения мы имеем дело с кинетической необратимостью. Термодинамическая необратимость проявляется в макроэволюции, а кинетическая – в микроэволюции.

## Список литературы

1. Шрёдингер Э. *Что такое жизнь с точки зрения физики?* М.: РИМИС, 2009. 176 с.
2. Эбелинг В., Энгель А., Файстель Р. *Физика процессов эволюции*. М: Эдиториал УРСС, 2001. 328 с. (Пер с нем. Ebeling V.W., Engel A., Feistel R. *Physik der Evolutionsprozesse*. Berlin: Akademie-Verlag, 1990).
3. Хакен Г. *Синергетика*. М.: Мир, 1980. 405 с.
4. Пригожин И., Стингерс И. *Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой*. М.: Прогресс, 1986. 432 с. (Пер. с англ. Prigogin I., Stengers I. *Order out of chaos. Men's new dialogue with nature*. London: Heinemann, 1984).
5. Сидорова А.Э., Твердислов В.А. Самоорганизация в иерархии активных сред как движущая сила эволюции биосферы. *ВМУ*.

- Серия 3. Физика. Астрономия. 2012. № 2. С. 65–69.
6. Starr T.N., Picton L.K., Thornton J.W. Alternative evolutionary histories in the sequence space of an ancient protein. *Nature*. 2017. V. 549. P. 409–413. doi: [10.1038/nature23902](https://doi.org/10.1038/nature23902).
  7. Соколов И.М. Размерности и другие геометрические критические показатели в теории протекания. *УФН*. 1986. Т. 150. № 2. С. 221–255.
  8. Broadbent S.R., Hammerslae J.M. Percolation process. 1. Crystals and mazes. *Proc. Cambridge Philos. Soc.* 1953. V. 53. P. 629–641.
  9. Sharov A.A. Genome increase as a clock for the origin and evolution of life. *Biology Direct*. 2006. V. 1. P. 17.
  10. Patthy L. Genome evolution and the evolution of exon shuffling – a review. *Gene*. 1999. V. 238. № 1. P. 103–114.
  11. Марков А.В., Анисимов В.А., Коротаев А.В. Взаимосвязь размера генома и сложности организма в эволюционном ряду от прокариот к млекопитающим. *Палеонтологический журнал*. 2010. № 4. С. 3–14.
  12. Колчанов Н.А., Ананько Е.А., Колпаков Ф.А. и др. Генные сети. *Молекулярная биология*. 2000. Т. 34. С. 533–544.
  13. Mikkelsen T.S., Wakefield M.J., Aken B., et al. Genome of the marsupial *Monodelphis domestica* reveals innovation in noncoding sequences. *Nature*. 2007. V. 447. № 7141. P. 167–177.
  14. Miller W.J., McDonald J.F., Nouaud D., Anxolabehère D. Molecular domestication – more than a sporadic episode in evolution. *Genetica*. 1999. V. 107. P. 197–207.
  15. Eigen M., Schuster P. The hypercycle. A principle of natural self-organization. Part A: emergence of the hypercycle. *Naturwiss*. 1977. V. 64. № 11. P. 541–565.
  16. Эйген М., Шустер П. *Гиперцикл. Принципы самоорганизации макромолекул*. М.: Мир, 1982. 270 с.
  17. Бак П. *Как работает природа: теория самоорганизованной критичности*. Москва: УРСС: Либроком, 2013. 269 с. (Пер. с англ. Бак Р. *How Nature Works. The Science of Self-Organized Criticality*. Springer-Verlag, 1996).