

БИОФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ САМООРГАНИЗАЦИИ БИОСФЕРЫ КАК ИЕРАРХИИ АКТИВНЫХ СРЕД

Сидорова А.Э., Твердислов В.А.

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова
ул. Ленинские Горы, 1, стр. 2, г. Москва, 119234, РФ; e-mail: sky314bone@mail.ru
Поступила в редакцию: 09.07.2018.

Аннотация. Рассмотрена биофизическая модель эволюции биосферы на базе представлений о самоорганизации в иерархически сопряженных активных средах. Данный системный подход позволяет по-новому рассмотреть идеи бифуркационного развития биосферы на всех иерархических уровнях биологической эволюции. В модели движущей силой эволюции биосферы служит система связей в иерархия распределенных активных сред, составленных мозаикой биоценозов. Активная среда создает фронтальное «давление естественного отбора». Пассивный фильтр естественного отбора позволяет выйти ветвям эволюции на устойчивую траекторию развития и закрепиться на ней. В отличие от классического филогенетического древа, отражающего принцип вертикальной эволюции биосферы, в данном подходе биосфера – 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.

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

Иерархичность организации и дискретность элементов системы являются принципиально важными условиями биологической эволюции. Дискретность обеспечивает индивидуальные особенности горизонтального и вертикального взаимодействия, определяющие устойчивое развитие популяций, 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. Два этих качества, имеющиеся в своей основе физико-химические закономерности и пришедшие в живую природу из неживой в процессах биопоэза, составляют системную основу эволюционного единства структуры и функций в живых системах.

Распределенный ресурс (энергия, вещество, информация) системы утилизируется связанными между собой «диффузией» нелинейными локальными трансформаторами. Для физико-химической системы – это распространяющаяся в пространстве фаза процесса, для биосферы – это 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 порожаемый ими процесс. В ходе автоволновой самоорганизации активная среда способна сопрягать процессы, соизмеримые в масштабах двумерного горизонтального пространства и времени (когерентность) [1, 2]. Иерархичность биологических систем предопределяет возможность сопряжения процессов разного масштаба в пространстве и времени. Хиральность структур смежных иерархических уровней делает возможной их устойчивую стратификацию [1, 2].

В отличие от классического филогенетического древа, отражающего принцип вертикальной эволюции биосферы, в нашем представлении биосфера – единая живая система, эволюционирующая по законам, определяемым отбором, переносом генов, конвергенцией и дивергенцией – механизмами эволюции. Эта трехмерная сеть прямых и обратных, положительных и отрицательных связей в распределенной трехмерной системе позволяет нам рассматривать эволюционирующую биосферу как иерархию активных сред (рис. 1).

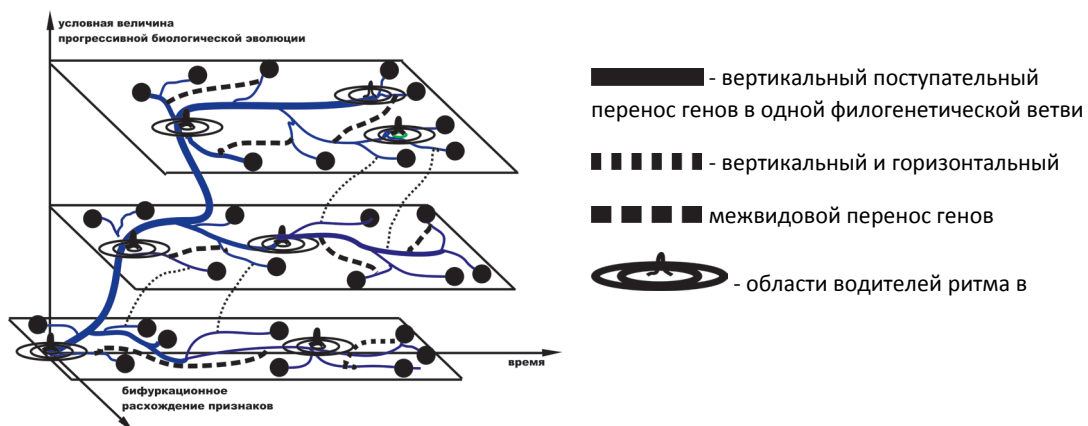


Рисунок 1. Трехмерная сеть активной среды иерархических уровней эволюции биосферы

Эволюционный процесс можно уподобить потоку, который вызывается или всасывающим или нагнетающим насосом, а естественный отбор – это «фильтр» в движущемся потоке. Отбор может только определить траектории развития отдельных популяций и видов на данный момент времени и в данном биоценозе. Движущей силой эволюции биосферы - «нагнетающим насосом» - служит иерархия распределенных активных сред, составленных мозаикой биоценозов. С физической точки зрения мы имеем дело с «машинами» разного уровня организации. В отличие от пассивной среды, в которой возможны малые флуктуации, активная среда способна формировать регулярные в пространстве и времени гигантские флуктуации, подобно протуберанцам на Солнце. В отличие от «малых» флуктуаций «гигантские флуктуации» обретают структуру. В целом, активная среда создает фронтальное «давление естественного отбора». С этими гигантскими флуктуациями как раз и «работает» внешний пассивный фильтр естественного отбора, позволяющий выйти данной ветви эволюции на устойчивую траекторию развития и закрепиться на ней. Среда с локальными неоднородностями может выступать в роли эффективного однонаправленного автоволнового фильтра [1, 2].

Отбор способствует формированию регулярной и 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. «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 в физико-химии – протеканием среды. Перколяции могут наблюдаться в решетках или других конструкциях, в том числе непрерывных, состоящих из большого числа подобных элементов или непрерывных областей, если такие распределенные системы находятся, подобно триггеру, в одном из двух устойчивых состояний. Иными словами, перколяция - это момент появления такого состояния системы, при котором образуется хотя бы один непрерывный путь через соседние проводящие узлы между противоположными краями системы. Система перколяций (как и естественный отбор) – распределенная пассивная среда, тогда как эволюционирующая биосфера – распределенная активная среда. В целом, активная среда создает фронтальное «давление естественного отбора» через гигантские флуктуации, с которыми как раз и «работает» внешний пассивный фильтр естественного отбора, позволяющий выйти данной ветви эволюции на устойчивую траекторию развития и закрепиться на ней. Поэтому движущей силой эволюции мы называем иерархию распределенных активных сред, составленных мозаикой биоценозов [1, 2].

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 [1]. В качестве узлов перколяционной решетки отбора принимаем эффективный размер популяции. порог протекания [3] связан с $N_{эф}$ и количеством закрепившихся на популяционном уровне мутаций. Вероятность $P_N(b)(x)$ 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 – это порог протекания. Т.е. 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 геном, тем больше вероятность обеспечения большего числа потенциальных «ниш» для новых генов [4]. В эволюционной линии от прокариот к млекопитающим отчетливо прослеживается положительная корреляция между МГР и сложностью организма [5, 6]. 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 [5], с закономерностями эволюции генных сетей [7, 8], МГЭ [8, 9]. 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 [4, 6]. При этом увеличение размера МГР как информационная составляющая биологической эволюции способствовало формированию дополнительных степеней свободы для генетических преобразований и, следовательно, росту биоразнообразия.

В [10] 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. 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. При этом рост размеров генома связан с увеличением сложности организмов в ходе эволюции, т.е. с минимальным размером генома. С одной стороны, увеличение размера генома связано с увеличением с ростом его информационной емкости (в пределах таксонов рост генома может и не выявляться, как, например, в эволюции птиц и прокариот преобладающей тенденцией, вероятно, было уменьшение размера генома), и, с другой стороны, способствовало росту биоразнообразия, предоставив дополнительные степени свободы для генетических комбинаций. Известно, что 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 которых система приобретает масштабную инвариантность [11]. В отличие от модели Бака и Снеппена (BS-модель), 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 этом случае в бифуркационной модели активной среды 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 отражают не только нелинейность биологических процессов в биофизической модели самоорганизации биосферы как иерархии активных сред, но, главное, формулируют подход к пониманию природы распределенной движущей силы эволюционного процесса как кооперативного пространственно-временного явления. В основе своей физико-химического, а по проявлениям и функциям – биологического. 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 / References:

1. Сидорова А.Э., Твердислов В.А. Самоорганизация в иерархии активных сред как движущая сила эволюции биосферы. *ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия*, 2012, т. 68, № 2, с. 65-69. [Sidorova A.E., Tverdislov V.A. Self-Organization as the Driving Force for the Evolution of the Biosphere. *Moscow University Physics Bulletin*, 2012, vol. 68, no. 5, p. 405-410. (In Russ.)]
2. Твердислов В.А., Сидорова А.Э., Яковенко Л.В. *Биофизическая экология*. Монография. М.: УРСС, 2012, 544 с. [Tverdislov V.A., Sidorova A.E., Yakovenko L.V. *Biophysical ecology*. Monograph. M.: URSS, 2012, 544 p. (In Russ.)]
3. Broadbent S.R., Hammerslae J.M. Percolation process. 1. Crystals and mazes. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 1953, vol. 53, pp. 629-641.
4. Sharov A.A. Genome increase as a clock for the origin and evolution of life. *Biology Direct*, 2006, vol. 1, p. 17.
5. Patthy L. Genome evolution and the evolution of exon shuffling – a review. *Gene*, 1999, vol. 238, no. 1, pp. 103-114.
6. 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. [Markov A.V., Anisimov V.A., Korotaev A.V. The relationship between the size of the genome and the complexity of the organism in the evolutionary series from prokaryotes to mammals. *Paleontological Journal*, 2010, no. 4, pp. 3-14. (In Russ.)]
7. Колчанов Н.А., Ананько Е.А., Колпаков Ф.А. [и др.] Генные сети. *Мол. биол.*, 2000, т. 34, с. 533-544. [Kolchanov N.A., Ananko E.A., Kolpakov F.A. Gene networks. *Mol. Biol.*, 2000, vol. 34, pp. 533-544. (In Russ.)]
8. Mikkelsen T.S., Wakefield M.J., Aken B. [et al.] Genome of the marsupial *Monodelphis domestica* reveals innovation in noncoding sequences. *Nature*, 2007, vol. 447, no. 7141, pp. 167-177.
9. Miller W.J., McDonald J.F., Nouaud D., Anxolabehère D. Molecular domestication – more than a sporadic episode in evolution. *Genetica*, 1999, vol. 107, pp. 197-207.
10. Eigen M., Schuster P. The hypercycle. A principle of natural self organization. Part A: emergence of the hypercycle. *Naturwiss*, 1977, vol. 64, no. 11, pp. 541-565.
11. Per Buck. *How nature works: the theory of self-organized criticality*. Moscow: URSS: Librocom, 2013, 269 p.

BIOPHYSICAL MODEL OF SELF-ORGANIZATION OF THE BIOSPHERE AS THE HIERARCHY OF ACTIVE MEDIA**Sidorova A.E., Tverdislov V.A.**

Lomonosov Moscow State University

Leninskie Gory St., 1/2, Moscow, 119234, Russia; e-mail: syoanya@yandex.ru

Abstract. A biophysical model of the evolution of the biosphere is considered on the basis of ideas about self-organization in hierarchically conjugate active media. This systematic approach allows us to re-examine the ideas of the bifurcation development of the biosphere at all hierarchical levels of biological evolution. In the model, the driving force behind the evolution of the biosphere is the hierarchy of distributed active media composed of a mosaic of biocenoses. The active medium creates a frontal "pressure of natural selection". A passive filter of natural selection allows branches of evolution to escape to a stable trajectory of development and gain a foothold on it. Unlike the classical phylogenetic tree, which reflects the principle of the vertical evolution of the biosphere, in this approach the biosphere is a single organism evolving according to the laws determined by selection, gene transfer, convergence and divergence – the mechanisms of evolution. This three-dimensional network of direct and feedback links allows us to consider the evolving biosphere as a hierarchy of active media.

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