

## УРОВНИ ОРГАНИЗАЦИИ ЖИВЫХ СИСТЕМ: КООПЕРОНЫ

© В. Ф. Левченко\*, В. А. Котолупов\*\*

\* Институт эволюционной физиологии и биохимии им. И. М. Сеченова РАН, Санкт-Петербург, Россия;

\*\* Центр системной медицины, Випава, Словения

E-mail: lew@iephb.nw.ru

*Ничто в природе не вечно; все беспрестанно разрушается и восстанавливается, перестраивается, изменяется. Силы природы медленно, но непрерывно работают в двух направлениях: прежнее изменяют и разрушают, новое созидают. Деятельность эта проявляется одинаково и в живой и в так называемой мертвой природе.*

*А. Брэм. Общий очерк царства животных [1].*

### Резюме

Традиционно все живое на Земле обсуждается в контексте структурно-морфологического подхода, в рамках которого рассматриваются различные живые системы (например, организмы и экосистемы), имеющие разные размеры, организацию и использующие различные ресурсы для своего существования. К этим характеристикам добавляют также иногда те или иные функциональные и экологические, но обычно как дополнительные по отношению к структурным. Мы полагаем, что такой традиционный подход хотя и нагляден, но отвлекает от того обстоятельства, что любая живая система должна рассматриваться как неразрывный структурно-функциональный комплекс, причем поддержание существования системы невозможно без процессов, непрерывно происходящих в ней и направленных на сохранение этого комплекса. Это приводит нас к представлению о кооперонах — самосохраняющихся динамических структурах, существующих лишь как результат протекания различных специфически организованных кооперативных процессов (их интенсивности могут варьировать в зависимости от обстоятельств). С нашей точки зрения, все живые системы являются кооперонами разных уровней иерархии. Кооперонами являются также и некоторые другие системы, в частности симбиотические. В рамках этих представлений можно обсуждать функционирование живых систем разных типов организации в новом, более близком физиологам контексте, причем как для случая «нормы», так и для ситуации, когда кооперативные взаимоотношения частей системы нарушаются (например, при системных заболеваниях).

*Ключевые слова:* организм, закономерности функционирования, кооперативные системы.

### Уровни структурной организации и самосохранение

В биологической и философской литературе XX века периодически возникали довольно оживленные дискуссии о различных уровнях организации живых систем [2—16]. К различным типам и уровням организации живых систем относили отдельные одноклеточные и многоклеточные организмы, клетки многоклеточных организмов, иногда популяции, экосистемы, биосферу. Разбиение на уровни проводили обычно с учетом очевидных отличий для биологических систем с разными размерами, организацией и

способами существования, но при этом какого-то единого подхода так и не было выработано. Связано это во многом с тем, что так и не была найдена единая система признаков, одновременно подходящая для неодинаковых живых систем, причем разные авторы подходили к этой проблеме, используя разные подходы, в том числе и принципиально несовместимые друг с другом — структурный и функциональный. Как следует из самих названий, при первом подходе основное внимание уделяется конкретной физико-химической основе живых систем и их структурно-морфологическим особенностям, при втором же — функциональным особенностям.

Не вдаваясь в детали этих дискуссий, отметим, что для каждого уровня выделялся определенный класс объектов со своими наиболее характерными размерами и морфологическими структурами, а также с закономерностями функционирования, развития и эволюции. На наш взгляд, ни структурный, ни функциональный подходы по отдельности не в состоянии описать главные особенности известных нам форм жизни. Хорошо известно, что любая живая система обладает некоторой нестатистической динамической структурой, специфичной для каждого типа живых систем, однако долговременное существование любой такой системы без непрерывного осуществления деятельности, направленной на сохранение ее структуры, невозможно. Разумеется, сохранение структуры подразумевает также и непрерывное поддержание пониженного уровня ее энтропии [3]. С другой стороны, такого рода функционирование возможно лишь именно в рамках весьма специфических структур самой системы. Поэтому и структура живой системы, и ее функционирование всегда неразрывно связаны.

Известно также, что любая живая система обменивается с внешней средой веществом, а также обязательно использует энергию, получаемую извне, и сведения о среде (информацию\*). При этом функционирование системы организовано так, чтобы в каждый момент времени закладывались основы ее последующего существования [3, 17]. Иначе говоря, имеет место феномен, который можно назвать упреждающее поведение (разумеется, на основе прогноза развития ситуации [17—20]). Упреждающие системы в западной литературе называют иногда *anticipatory systems*\*\* Обобщая, можно сказать, что главнейшим функциональным императивом любой живой системы является перманентная активность, направленная на самосохранение, при этом свойства системы как целого не есть простая сумма ее частей, поскольку все части участвуют в совместной, скооперированной и направленной на сохранение целого деятельности. В отличие от жестких программ функциональный императив не предопределяет строго конкретных путей достижения результата. Он указывает лишь на конечный результат, своего рода «цель», иначе говоря, центр аттрактора, куда следует стремиться. Выбор тех или иных подходящих в данный момент способов достижения результата осуществляет сама система. Такое поведение вряд ли было возможным, если бы живые системы не использовали уже накопленный опыт и не обладали теми или иными механизмами памяти (см. далее и [17]).

В рамках упомянутых выше представлений обычно выделяют следующие структурные уровни — органи-

зации, которые упоминаются практически во всех версиях классификации живых объектов [16].

1. Одноклеточные организмы, у которых в качестве отдельных структурно-функциональных блоков — подсистем выступают клеточные органеллы.

2. Многоклеточные организмы, для которых подсистемами являются клетки, органы.

3. Экосистемы, в которых подсистемами являются отдельные организмы и видовые популяции, или же (в крупных биогеоценозах) еще и другие экосистемы меньшего масштаба и ранга [17, 21].

4. Биосфера, для которой подсистемами являются биогеоценозы.

Иногда в качестве отдельного структурного уровня выделяют также и клетки многоклеточного организма, но это признается не всеми, поскольку эти клетки обычно не могут существовать и (или) размножаться вне организма [6, 9, 15].

С одной стороны, каждая из живых систем указанных уровней организации относительно автономна, с другой — зависит от других. Степень ее автономности тем ниже, чем чувствительнее она к вариациям условий внешней по отношению к ней среды, что обычно связано с большим разнообразием факторов, одновременно необходимых для поддержания целостности такой системы. Полностью открытая система фактически растворяется в среде и не существует как отдельная единица жизни. В то же время, если обособление от среды велико и система длительное время не обменивается веществом с окружающим миром, а для производства внутренних процессов не получает извне энергию, то и в этом случае систему нельзя назвать живой, поскольку отсутствует один из главнейших функциональных атрибутов живого — обмен веществ. Гипотетическую ситуацию полного отсутствия взаимодействия с внешней средой можно назвать абсолютной автономностью. Очевидно, что все живые системы непрерывно балансируют между открытостью и замкнутостью. Некоторые из вышеупомянутых вопросов рассмотрены в работах [16, 22], где, помимо объектов упомянутых структурных уровней, обсуждаются также свойства тканей и популяций.

### О функциональной организации. Кооперативность и коопероны

Однако помимо упомянутого выше и построенного на основе традиционных подходов разбиения по структурным уровням организации, можно подойти к проблеме классификации и взаимоотношений живых систем в природе с иных позиций, используя некоторые идеи функционального подхода, а также представления о кооперативных системах [8, 22, 23]. Кооперативная система — это такая относительно автономная система, свойства которой определяются всей совокупностью входящих в нее элементов, однако простое суммирование свойств составляющих элементов без учета особенностей их взаимоотношений друг с другом не позволяет объяс-

\* Здесь мы не будем обсуждать разные подходы к сложному понятию «информация», а отметим лишь, что в биологическом контексте существенными являются только такие информационные сообщения, воспринимаемые живой системой, которые приводят к изменению ее выживаемости [17].

\*\* См., например, <http://www2.ulg.ac.be/mathgen/CHAOS/>.

нить все свойства такой системы как целого. Образно говоря, целое оказывается больше, чем простая сумма частей.\* Причиной этого является то, что функционирование частей кооперативной системы и их специфические реакции на внешние воздействия (как на всю систему, так и на ее отдельные элементы) являются взаимосогласованными. Разумеется, это невозможно без особым образом организованных взаимодействий между частями системы, или, точнее, невозможно в случае отсутствия обмена между ними информационными и управляющими сообщениями, в ответ на которые свойства частей и всего целого закономерно изменяются в соответствующем направлении. Иначе говоря, весь «секрет» кооперативной системы заключается в особенностях взаимоотношений между частями, т. е. в особенностях ее внутренней организации. Очевидно, что индивидуальные свойства частей кооперативной системы важны, но это еще не все, что определяет ее свойства как целого. Существенно также, что на биологическом языке упомянутые взаимоотношения частей можно назвать симбиотическими по типу мутуализма [15, 23].

Иногда, говоря о взаимосогласованном поведении элементов какой-либо системы, — а живые системы именно таковы, — используют также слово «системность». Идеи, наводящие на мысли о том, что весь биологический мир обладает системностью, состоит из специфических кооперативных систем и сам по себе является кооперативной системой, высказывались многократно и с давних времен, но только в последнее время они начали находить свое отражение в научном мировоззрении. Достаточно вспомнить книгу Ф. Капра «Паутина жизни» [24], в названии которой используется образ из мифологии северо-американских индейцев о взаимосвязи — «паутине» — всего живого на Земле. Еще более сложные конструкции, подразумевающие гипотетические взаимоотношения между элементами всего сущего, нашли свое отражение в буддизме.

Представления о кооперативности в физических системах были впервые предложены, видимо, Фаулером при рассмотрении скачкообразных изменений, происходящих иногда при фазовых переходах [8]. Например, переход газ → жидкость при сжатии газа в условиях, когда температура ниже критической, происходит скачкообразно, вследствие включения механизмов положительной обратной связи: уменьшение объема увеличивает взаимопритяжение молекул, что, в свою очередь, приводит к дальнейшему уменьшению объема. Поскольку в процессе этого перехода элементы системы действуют как бы согласованно, их поведение считается кооперативным; в качестве меры изменения степени кооперативности предлагается использовать величину, пропорциональную энергии, отбираемой из среды в течение фазового перехода [8].

\* См., например, «кооперативная система» в Википедии <http://ru.wikipedia.org/>. Любопытно, что почти такие же слова, относительно того, что целое больше суммы своих частей, приводятся и в статье про «холизм», однако там этот подход назван идеалистическим.

Нередко кооперативному поведению (хотя обычно такой термин не употребляется) уделяется внимание в работах по биофизике и биохимии, посвященных ферментам, иммунной и эндокринной системам. В этом случае ферменты иногда рассматриваются не только в биохимическом, но также и в кибернетическом контексте, а именно как трансляторы, преобразователи и переключатели в процессах передачи биохимических сигналов (в этом случае их иногда называют просто «факторами»). При этом нередко обсуждаются весьма сложные нелинейные системы с отрицательными и положительными обратными связями [8, 25—27].

Системы, в которых продукты реакций стимулируют протекание процессов, необходимых для собственного производства, называются автокаталитическими, иногда аллостерическими [8]. Такие системы, разумеется, тоже являются кооперативными. Яркий пример автокаталитической кооперативной системы с положительными обратными связями, крайне чувствительными к условиям протекания реакций, дают так называемые модельные гиперциклы Эйгена: РНК → белок → РНК и т. д. [28] Гиперциклы, кроме того, являются в терминологии Эйгена самоинструктирующимися, поскольку способны в некотором ограниченном диапазоне условий среды к адаптивным реакциям: при вариациях условий цикл сохраняется за счет того, что некоторые из его звеньев замещаются иными звеньями с другими компонентами, которые оказываются актуально более подходящими. Гиперциклы являются также и самосохраняющимися вследствие способности к адаптивному поведению.

Далее нас будут интересовать не любые кооперативные системы, а самосохраняющиеся, т. е. такие, функционирование которых направлено на поддержание собственной целостности, в том числе посредством адаптаций к среде. Самосохраняющаяся кооперативная система представляет собой устойчивый структурно-функциональный комплекс и выступает как единое целое в некотором диапазоне внешних условий. Чтобы избежать в дальнейшем использования довольно громоздких словосочетаний, мы будем называть такие комплексы кооперонами.\* Структура кооперона является своего рода субстратом для поддержания процессов, обеспечивающих его сохранение. Концептуально данный подход использует идеи не только физики, химии и кибернетики, но и общей теории систем, в частности представления о самоорганизации. Примером кооперона в неживой природе являются упомянутые модельные автокаталитические самоинструктирующиеся гиперциклы Эйгена. В живой природе именно адаптирующиеся к изменениям среды самосохраняющиеся системы являются первыми «кандидатами» на роль кооперонов. В некото-

\* В англоязычной литературе словосочетание «cooperon propagator» используется в одной из моделей, созданной для описания процесса сверхпроводимости. При этом речь также идет о кооперативном поведении, но пар частиц, ответственных за эффект. Мы полагаем, что это обстоятельство не является препятствием для использования лингвистически удачного, на наш взгляд, термина «кооперон» в биологии, причем в гораздо более широком контексте.

рых случаях коопероны могут возникать в результате спонтанной самоорганизации, например, при становлении новой экосистемы.

Существенно, что все части такой относительно автономной системы — кооперона объединены замкнутыми причинно-следственными отношениями, т. е. последствия индивидуальной активности любой из частей рано или поздно «возвращаются» к ней назад в виде изменений других частей и (или) всего целого, но не затухают в системе и окружающей среде. При этом важны не столько частные индивидуальные особенности частей (например, внутренняя морфологическая структура и размеры), сколько значимость их деятельности в рамках всей системы. Ситуация напоминает ту, которую Сартр в художественной форме выразил словами «каждый ответственен за все» [29]. Разумеется, уровень упомянутой индивидуальной активности частей не должен быть слишком малым (должен быть выше уровня шумов), а в число компонентов кооперона должны быть включены все те объекты, которые участвуют в организации замкнутых причинно-следственных отношений. Эти вопросы требуют тщательного специального рассмотрения, и мы пока ограничимся здесь только общими представлениями.

Важно также отметить, что коопероны могут включать в себя в качестве частей другие коопероны, а также объекты, принадлежащие различным структурно-функциональным уровням живого. Это возможно, поскольку при осуществлении кооперативного поведения, как уже говорилось выше, принципиальна роль частей в обеспечении процессов, поддерживающих существование целого, но не любые их индивидуальные особенности. Образно говоря, для системы важны не столько специфические «личные качества» элементов, сколько эффективность исполнения ими обязанностей в соответствии с «должностью». Например, в качестве разных частей одного и того же кооперона могут одновременно выступать и отдельные организмы, и популяции организмов (как это бывает в локальных экосистемах вокруг отдельно расположенных средообразующих деревьев), или же отдельные органы и некоторые специализированные клеточные популяции (например, популяции клеток коры надпочечников или клеток передней доли гипофиза, участвующие в синтезе гормонов).

В ряде случаев те или иные структурные уровни организации практически совпадают с очевидными уровнями кооперации. Например, клетки многоклеточного организма несомненно являются сравнительно автономными кооперонами. Понятно, что и весь организм — это тоже кооперон, а не просто некая механическая совокупность клеток, тканей и органов. Иначе говоря, как и в случае традиционного разбиения на отдельные структурные уровни, возможны ситуации, когда некоторые коопероны включают в себя иные коопероны или же их устойчивые совокупности. Соответственно здесь тоже имеется своеобразная иерархичность. В то же время, важно отметить, что структурные и кооперативные уровни не всегда совпадают, поскольку кооперонами могут являться не только клетки и органы, но и морфологически не оформлен-

ные (распределенные) физиологические системы. В качестве примера можно указать на такую относительно автономную систему всего организма, как пищеварительную. Понятно, что уровень иерархии любой из взаимодействующих кооперативных систем определяется ее способностью регулировать условия существования других систем. Например, кооперон целого организма управляет иными, сравнительно более частными, внутренними системами, имеющими различные функции, организацию и морфологическую структуру.

Все это свидетельствует в пользу того, что традиционные способы подразделения частей живых систем на основании только привычных структурных уровней и морфологических особенностей бывают недостаточными. Чисто морфологический метод прекрасно справляется с описанием строения трупов, но не может обеспечить адекватное рассмотрение живого организма, «наполненного» еще и множеством взаимосогласованных кооперативных процессов.

Специально хотелось бы обратить внимание на то, что традиционные разбиения на структурные уровни, включающие в себя клетки, органы, организмы, экосистемы и т. д., не считаются в случае данного подхода ошибочными, однако рассматриваются как частные, поскольку феномен кооперативности выпадает из их поля зрения. Например, в рамках чисто структурного подхода весьма трудно обсуждать такую важнейшую характерную особенность любого организма, как поддержание гомеостаза [22, 30—32], что невозможно без кооперативного поведения его частей. Поэтому можно представить, что включение кооперонов в объекты исследования физиологии, экологии и других биологических дисциплин в ряде случаев не только корректно, но и продуктивно.

Говоря о кооперонах, следует также отнести к их числу различные симбиотические конструкции, вопрос о выделении которых (не всех) в качестве отдельных единиц жизни обычно стараются обходить стороной. Ярким примером могут служить лишайники, состоящие из организмов разных, весьма далеких таксономических групп — водорослей и грибов. Для лишайников создана весьма сложная специальная таксономическая система, но даже лишайнологи не всегда решаются использовать при обсуждении их жизнедеятельности организменный подход. Другой интересный пример симбиотических конструкций демонстрируют некоторые водоросли семейства вольвоксовых (*Volvocaceae*), объединяющиеся в самосохраняющиеся, напоминающие организмы колонии, которые состоят из генетически однородных, но структурно и функционально дифференцированных и как бы слипшихся одноклеточных организмов [33]. Еще один своеобразный пример организменноподобной кооперативной системы дает муравейник [34]. Обращаясь к организму, можно упомянуть сравнительно автономные объединения из нескольких различных клеток, которые формируют морфологические единицы ткани. Первоначально в контексте идей Уголева [22, 23] они были названы «функционами» [16], позднее — «гистионами» [35]. В многоклеточных организмах на тех или

иных этапах онтогенеза и при некоторых заболеваниях, например онкологических, могут, видимо, возникнуть специфические кооперативные саморегулирующиеся структурно-функциональные конструкции, которые обладают элементами самосохранения и являются кооперонами. Известные в психофизиологии зависимости тоже, скорее всего, могут обсуждаться как самосохраняющиеся процессы, формирующие стойкие, специфические изменения в тех или иных органах и (или) во всем организме.

Сложившиеся специфически организованные взаимоотношения между компонентами кооперона обеспечивают его длительное существование в некотором диапазоне условий. Суммируя вышесказанное, следует отметить, что, во-первых, взаимоотношения между компонентами носят симбиотический (по типу мутуализма) характер, во-вторых, таковы, что оказывается возможным адаптивное поведение всей системы [17, 32]. То, что система способна в целях самосохранения менять взаимодействие со средой, в том числе управляя внутренними процессами, например переключая их ветви, в сущности означает, что она является кибернетической со всеми характерными в этом контексте атрибутами — рецепторами, памятью, эффекторами и т. п. Таким образом, мы приходим к следующему, хотя и не во всем точному, описанию кооперона: это автономная, функциональная, кибернетическая, мутуалистическая и самоподдерживающая свою целостность система.

Сравнительно небольшие вариации условий среды могут быть причиной адаптаций к новым условиям, в процессе которых возможны как обратимые, так и необратимые изменения компонентов кооперона. Если речь идет о биосфере и биоценозах, то к обратимым изменениям относятся сукцессионные сдвиги видового состава некоторых экосистем, а к необратимым — смены видового состава, в том числе вследствие эволюционных процессов [36]. В случае организмов также возможны необратимые изменения, в частности на ранних этапах онтогенеза, как следствие модулирующих онтогенез воздействий [37]. Если же условия среды изменяются радикально, то кооперативность поведения компонентов системы нарушается, возникает кризис системы и она разрушается [17, 31, 32, 38].

Выше мы привели примеры, чтобы показать, что традиционно обсуждаемые так называемые «живые системы» являются кооперонами. Но можно пойти дальше и предположить, что кооперон — это еще более широкое понятие, нежели живая система в привычном для биологии понимании, а важнейшие функциональные свойства последней просто повторяют общие свойства кооперонов. В связи с этим хотелось бы коротко остановиться на некоторых особенностях функционирования живых систем, которыми, на наш взгляд, обладают и сами они и коопероны.

Вряд ли требует специального объяснения тот факт, что изменения, которые происходят в биологической системе в случае возникновения тех или иных обстоятельств, определяются необходимостью выживания. Это названо нами как «принцип приоритетной активности», которая обычно направлена на самосо-

хранение [32]. Если ситуация встречалась ранее, то для нее обычно уже имеются инструкции функционирования, сохраненные памятью системы, которые и используются ею при этом. В случае незнакомых ситуаций оказывается необходимым поиск новых способов функционирования, для чего живые системы используют либо механизмы прогнозирования (если это для них возможно), либо случайный, эвристический поиск. Оба случая известных и неизвестных ситуаций обобщаются в рамках представлений о кибернетических аспектах функционирования живого [16, 17]. В связи с этим хотелось бы упомянуть о так называемом всегда бодрствующем «демоны жизни» — главной конструкции, основанной на функциональном императиве любой живой системы, подчиняющей себе все ее частные инструкции функционирования. Сущность этой инструкции заключается в том, чтобы сохранять систему и поддерживать непрерывность процесса жизни при любых обстоятельствах [17, 39].\* Собственно из всех этих рассуждений следует, что кооперон является материальным воплощением процессов или, шире, причинно-следственных отношений, организованных особым способом (в данном случае под контролем «демона жизни»), что может показаться до определенной степени непривычным в контексте обычной логики.\*\*

В заключение этого раздела еще раз отметим, что коопероны, являясь относительно автономными функциональными системами, могут включать в себя иные коопероны, т. е. имеют свои уровни организации и иерархии. В масштабе планеты всех объединяет кооперон самого высокого уровня — биосфера, на более низких уровнях находятся крупные биогеоценозы и экосистемы, а также, видимо, социо- и техноценозы [40, 41]. Далее следует выделить важную крупную группу самостоятельно существующих организмов, включающую в себя одноклеточные и многоклеточные организмы. Последние состоят из дифференцированных клеток разных типов, которые также являются ограниченно автономными, самосохраняющимися кооперативными системами. Нельзя не упомянуть также и о внутриклеточном уровне, где, судя по всему, тоже существуют специфические коопероны.

### О закономерностях развития и эволюции кооперонов

Выше мы предложили ввести представление о кооперонах как о своего рода новой «координате» для описания живых систем. Разумеется, было бы интерес-

\* Эта идея по аналогии с известным среди физиков т. н. «демоном Максвелла» была предложена совместно с замечательным, но, к сожалению, уже покойным физиком-теоретиком Валентином Харциевым (см. нашу совместную работу) [39].

\*\* Традиционно, по крайней мере в случае индоевропейских языков, субъект действия — это сущность, обладающая телесностью и обозначаема, как правило, существительным, в то время как с процессами и функционированием сопоставляются глаголы.

но выяснить, каковы законы развития и эволюции кооперона. Это удобно сделать, если рассмотреть общие закономерности, предлагаемые в разных биологических науках. Поскольку в некоторых случаях кооперативные и структурные уровни практически совпадают, то те закономерности, которые одновременно являются общими для разных структурных уровней, логично отнести и кооперонам.

Известно, что существует несколько эволюционных принципов, которые применимы к организмам, экосистемам и биосфере [20, 42]. Оказалось также, что эти принципы применимы не только в эволюционной экологии и эволюционной физиологии, но также и в биологии развития, в частности в эмбриологии, где эволюционным закономерностям соответствуют закономерности эмбриогенеза, описанным в работах [16, 17, 42], где обсуждаются теоретические положения работ [30, 43—50]. Коротко упомянутые принципы эволюции и развития различных биосистем приведены ниже.\*

1. Интенсификация процессов, обеспечивающих или функции физиологических и экологических систем, или, шире, функции функционально обособленных компонентов биосистемы.

2. Возрастание мультифункциональности компонентов биосистемы.

3. Возрастание дублируемости компонентов биосистемы, выполняющих ту или иную функцию.

4. Надстройка Орбели: новые функции не просто замещают старые, а наслаиваются на старые, подменяют их, управляют ими (этот принцип выполняется даже в случае информационных систем и техноценозов) [50].

5. Непрерывная преемственность изменений.

6. Стадийность изменений (речь идет об ароморфозах, происходящих в процессе развития экосистем и биосферы, или морфозах, в эмбриогенезе).

7. Комплексность и взаимная согласованность изменений компонентов биосистемы (выживаемость в процессе изменений не должна уменьшаться). На экосистемном уровне данный принцип проявляется в процессах взаимоспециализации видовых популяций. В физиологии он нашел свое отражение в морфологической корреляции разных признаков в целостном организме.

Видимо, следует также обратить внимание еще на одну из важных тенденций развития и эволюции, подробно рассмотренную для организмов в работе [35], которую можно сформулировать следующим образом.

8. Усиление структурно-функциональной специализации компонентов биосистем. Хотя процесс усиления специализации не всегда идет равномерно и возможны некоторые исключения, например рекапитуляция, но это не изменяет его основной направленности.

Таким образом, мы видим, что существует целая группа закономерностей, проявляющихся на разных

структурных уровнях живого и, что существенно, как в случае эволюционных процессов, так и в случае процессов развития. На аналогии между процессами эволюции и развития обращали свое внимание многие ученые, в частности Любищев, Шмальгаузен, Берг, Лима де Фария [14, 15, 51—54]. Если попытаться коротко просуммировать их взгляды на эту проблему, то получается, что развитие представляет собой, образно говоря, «уक्रощенную» и направленную эволюцию частей системы и ее самой. Во избежание неясностей отметим, что в соответствии с одной из версий терминологии, предложенной Любищевым, под эволюцией мы понимаем процесс, который в отличие от развития может иметь элементы эвристики, т. е. является в некоторых аспектах непредопределенным [16, 52].

Пытаясь разобраться в закономерностях развития и эволюции кооперонов, нельзя также не вспомнить о нескольких общебиологических принципах, предложенных в 90-х годах прошлого столетия Я. И. Старобогатовым. В своих, к сожалению, неопубликованных лекциях (тезисно см. [55]) он подчеркивал, что биологические науки в своей совокупности изучают, так или иначе четыре природных феномена: жизнь и жизнедеятельность как таковые, организм, разнообразие живого (теперь это принято называть биологическим разнообразием) и биосферу. Помимо того, что основные объекты, изучаемые в каждом из этих аспектов, неразрывно между собой связаны, т. е. не могут рассматриваться вне связи с остальными, здесь нетрудно увидеть также и проявление в той или иной форме одних и тех же законов или, говоря словами Я. И. Старобогатова, принципов.

1. Отбор. Это главнейший принцип, без которого невозможно допустить существование остальных. В классической его формулировке используются слова «выживание наиболее приспособленных». Однако эта формулировка (по чисто историческим причинам) относится к организмам и используется при обсуждении механизмов поддержания разнообразия. Более широкой, общей формулировкой, пригодной для всех феноменов, является следующая: сохранение оптимального варианта. Очевидно, что это принцип применим и для случая кооперонов.

2. Системогенез (понимаемый в широком смысле, а не только как синхронное созревание отдельных частей в процессе онтогенеза): в ходе отбора из отдельных элементов образуются устойчивые структурные и функциональные конструкции, своего рода блоки. Например, даже на самых начальных этапах возникновения жизни появляются последовательности химических реакций, которые без принципиальных изменений участвуют далее в разных жизненных процессах вплоть до настоящего времени. Этот принцип объясняет также возникновение тканей, органов и иных сохраняющихся в процессе эволюции структур. Биосфера, видимо, тоже возникла именно как единая система, состоящая по крайней мере из двух функциональных блоков — продуцентов и редуцентов, что, несмотря на произошедшие осложнения, сохраняется до сих пор.

3. Непрерывная оптимизация, которой способствует отбор. Для возникновения и фиксации принципов

\* Под биосистемами здесь мы понимаем различные, относительно автономные и демонстрирующие собственную жизнедеятельность системы, в том числе организмы, экосистемы, биосферу [16, 17].

ально новых конструктивных изобретений, перестроек системы в процессе ее эволюции или развития требуется, чтобы новое было лучше (или по крайней мере не хуже), чем старое. Это четко отличает изобретения природы от изобретений человека. Человек может довольно долго использовать неудачную конструкцию или модель, постепенно доводя ее до оптимального варианта. В живой же природе любая новая конструкция, даже крайне перспективная, если поначалу менее эффективна в сравнении с уже существующими (разумеется, при имеющихся условиях), обречена обычно на уничтожение. Вероятно, этим объясняется отсутствие в живой природе аналогов некоторых придуманных человеком удобных приспособлений и конструкций, например колеса у многоклеточных организмов. Тем не менее, как свидетельствует вся история жизни на Земле, данные ограничения не являются абсолютным препятствием для эволюции живого.

4. Автоканализация эволюции и развития (онтогенеза). Это означает, что в отсутствие принципиальных перестроек, например ароморфозов, биосистемы с каждым шагом своего развития или эволюции сужают количество возможных вариантов дальнейшего движения в этом направлении. Это происходит вследствие возникновения дополнительных, практически необратимых морфофункциональных и морфогенетических ограничений [14, 16, 17, 47, 48, 54, 55]. В конце концов, невозможность адаптироваться к меняющимся обстоятельствам может привести к гибели системы: если же из ее компонентов возникает новая система, то она тоже развивается по тем же принципам.

Приведенные выше восемь принципов (см. с. 000), относящихся к структурно-функциональной эволюции и развитию, сформулированных исходно физиологами, и четыре общебиологических, также касающихся эволюции и развития, но являющихся во многом следствиями концепции отбора Дарвина [56], охватывают очень широкий круг известных в эволюционной биологии явлений. Количество частных принципов, описывающих жизнедеятельность и гомеостаз [30, 57], можно, по-видимому, расширить, если рассматривать, например, еще функциональные и кибернетические аспекты жизни [22, 32, 35, 50, 58].

На наш взгляд, все эти принципы и закономерности не только описывают процессы развития и эволюции различных известных биосистем, обсуждаемых в традиционном структурно-функциональном аспекте, и кооперонов, но могут также помочь в объяснении особенностей их возникновения и развития.

### Заключение и некоторые выводы

Представления о кооперонах позволяют, на наш взгляд, связать между собой в рамках одной концепции структурный и функциональный подходы, а также обсуждать устойчивые схемы процессов, организующих коопероны на самых разных уровнях организации живого. Собственно кооперон — самосохраняющаяся динамическая структура, существующая только как результат протекания спе-

цифически организованных процессов, поддерживающих существование ее самой и собственных компоненто в, — можно рассматривать как своеобразную единицу жизни, но в ином, не в привычном морфологическом контексте. В пользу того, что это может быть продуктивным, говорит, например, тот факт, что в рамках чисто структурно-морфологического контексте. В пользу того, что это может быть продуктивным, говорит, например, тот факт, что в рамках чисто структурно-морфологического подхода трудно отличить живой организм от только что умершего (если, разумеется, не каких-нибудь несовместимых с жизнью очевидных нарушений его целостности).

Таким образом, все живое на Земле — это сложная самосохраняющаяся кооперативная конструкция — «паутина жизни» [24], состоящая из взаимодействующих кооперонов и сама являющаяся коопероном самого высокого уровня — биосферой. Традиционно ее части рассматриваются в структурно-морфологическом контексте, т. е. как живые системы, имеющие различные размеры, организацию и способы существования. Все они так или иначе способствуют формированию как общей, так и локальных сред существования, поскольку участвуют в биосферном круговороте и информационном обмене (т. е. могут иногда выступать друг для друга в качестве источников важной для выживания информации [32]). Данный подход позволяет также естественно включать в число систем, проявляющихся некоторые свойства живого, такие, которые обычно не обсуждаются в биологии и медицине, например различные симбиотические системы, социо- и техноценозы [14, 17, 40, 41, 50, 58]. В рамках изложенных представлений можно обсуждать не только функционирование живых систем разных уровней организации в обычных для них условиях, но и такие изменения в этих системах, которые связаны с нарушениями кооперативных взаимоотношений внутри них, например при некоторых системных заболеваниях.

### Список литературы

- [1] Брэм А. Э. Общий очерк царства животных // Жизнь животных. Т. 1. М., 1992.
- [2] Бауэр Э. Теоретическая биология. СПб., 2002.
- [3] Шредингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика. М., 1972.
- [4] Руттен М. Происхождение жизни. М., 1973.
- [5] Шкловский И. С. Вселенная, жизнь, разум. М., 1976.
- [6] Платонов Г. В. Жизнь, наследственность, изменчивость. М., 1978.
- [7] Волькенштейн М. В. Физика и биология. М., 1980.
- [8] Волькенштейн М. В. Биофизика. М., 1981.
- [9] Фролов И. Т. Жизнь и познание. М., 1981.
- [10] Фолсом К. Происхождение жизни. М., 1982.
- [11] Левченко В. Ф., Старобогатов Я. И. Два аспекта эволюции жизни: физический и биологический // Физика: проблемы, история, люди. Л., 1986. С. 102—142.
- [12] Моисеев Н. Н. Алгоритмы развития. М., «Наука», 1987.
- [13] Левченко В. Ф. Физическая модель эволюции биосистем // Ж. общ. биол. 1984. Т. 45. С. 158—163.

- [14] Раутиан А. С. Палеонтология как источник сведений о закономерностях и факторах эволюции // Современная палеонтология. М., 1988. Т. 2. С. 76—118.
- [15] Птицына И. Б., Музалевский Ю. С. Определение понятия «жизнь» в рамках биологии. Предисловие к новому изданию: Э. Бауэр. Теоретическая биология. СПб., 2002. С. 50—77.
- [16] Левченко В. Ф. Модели в теории биологической эволюции. СПб., 1993.
- [17] Левченко В. Ф. Эволюция биосферы до и после происхождения человека. СПб., 2004.
- [18] Rosen R. Anticipatory systems: Philosophical, mathematical, and methodological foundations. 1985.
- [19] Rosen R. Life itself. Comprehensive Inquiry into the nature, origin, fabrication of life. 1991.
- [20] Levchenko V. F. The seed if life // Intern. J. Comp. Anticipatory Systems (Belgium), 2001. V. 13. P. 62—76.
- [21] Левченко В. Ф., Старобогатов Я. И. Физико-экологический подход к анализу эволюции биосферы // Эволюционная биология: история и теория. СПб., 1999. С. 37—46.
- [22] Уголев А. М. Естественные технологии биологических систем. Л., 1987.
- [23] Уголев А. М. Концепция универсальных функциональных блоков и дальнейшее развитие учений о биосфере, экосистемах и биологических адаптациях // Ж. эвол. биохим. и физиол. 1990. Т. 26. С. 441—454.
- [24] Капра Ф. Паутина жизни. Новое научное понимание живых систем. Киев; М., 2002.
- [25] Ройт А. Основы иммунологии. М., 1991.
- [26] Поленов А. Л. Эволюция гипоталамо-гипофизарного нейроэндокринного комплекса // Эволюционная физиология. Ч. 2. Л., 1983. С. 53—109.
- [27] Лейбсон Л. Г. Происхождение и эволюция эндокринной системы // Эволюционная физиология. Ч. 2. Л., 1983. С. 3—52.
- [28] Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М., 1973.
- [29] Сартр Ж. П. Экзистенциализм — это гуманизм // Тошнота. Избранные произведения. М., 1994.
- [30] Наточин Ю. . Некоторые принципы эволюции функций на клеточном, органном и организменном уровнях (на примере почки и водно-солевого гомеостаза) // Ж. общ. биол. 1988. Т. 49. С. 291—303.
- [31] Котолупов В. А., Левченко В. Ф. «Зональная модель» описания гомеостаза // Ж. эвол. биохим. и физиол. 2009. Т. 45. С. 244—250.
- [32] Котолупов В. А., Левченко В. Ф. Мультифункциональность и гомеостаз. Закономерности функционирования организма, важные для поддержания гомеостаза // Ж. эвол. биохим. и физиол. 2009. Т. 45. С. 91—99.
- [33] Десницкий А. Г. Механизмы и эволюционные аспекты онтогенеза рода *Volvox* (Chlorophyta, Volvocales) // Бот. ж. 1991. Т. 65. С. 657—668.
- [34] Дольник В. Р. Непослушное дитя биосферы. Беседы о человеке в компании птиц и зверей. М., 1994.
- [35] Савостьянов Г. А. Основы структурной гистологии. Пространственная организация эпителиев. СПб., 2005.
- [36] Левченко В. Ф., Старобогатов Я. И. Сукцессионные изменения и эволюция экосистем (некоторые вопросы эволюционной экологии) // Ж. общ. биол. 1990. Т. 51. С. 619—631.
- [37] Харрисон Дж., Уайнер Дж., Тэннер Дж., Барникот Н., Рейнолдс В. Биология человека (монография). М., 1979.
- [38] Славинский Д. А. Закономерности кризисных этапов развития экосистем на примере динамики структурно-функциональных изменений: Автореф. канд. дис. СПб., 2006.
- [39] Levchenko V. F., Khartsiev V. E. «The Life Demon» and Auto-regulation of evolutionary process // Intern. J. Comp. Anticipatory Systems (Belgium). 2000. V. 10. P. 31—44.
- [40] Кричевский С. В. Аэрокосмическая деятельность. М., 2007.
- [42] Олескин А. В. Биополитика. Политический потенциал современной биологии: философские, политологические и практические аспекты. М., 2001.
- [42] Левченко В. Ф. Эволюционная экология и эволюционная физиология что общего? // Ж. эвол. биохим. и физиол. 1990. Т. 26. С. 455—461.
- [43] Гинецинский А. Г. Об эволюции функций и функциональной эволюции. М.; Л., 1961.
- [44] Крепс Е. М. Об эволюционной физиологии. Ч. 1 // Эволюционная физиология. Л., 1979. С. 3—11.
- [45] Наточин Ю. В. Функциональная эволюция: истоки и проблемы // Ж. эвол. биохим. и физиол. 1987. Т. 23. С. 372—389.
- [46] Орбели Л. А. Основные задачи и методы эволюционной физиологии // Эволюционная физиология. Ч. 1. Л., 1979. С. 12—23.
- [47] Северцов А. Н. Главное направление эволюционного процесса. Морфобиологическая теория эволюции. М., 1967.
- [48] Северцов А. С. Направленность эволюции. М., 1990.
- [49] Зусман М. Биология развития. М., 1977.
- [50] Менишуткин В. В., Наточин Ю. В., Черниговская Т. В. Общие черты эволюции функциональных гомеостатических и информационных систем // Ж. эвол. биохим. и физиол. 1992. С. 623—636.
- [51] Берг Л. С. Труды по теории эволюции 1922—1930 (посмертно). Л., 1977.
- [52] Любищев А. А. Проблемы формы, систематики и эволюции организмов. М., 1982.
- [53] Шмальгаузен И. И. Пути и закономерности эволюционного процесса. М., 1982.
- [54] Лима де Фариа. Эволюция без отбора. М., 1991.
- [55] Алимов А. Ф., Левченко В. Ф., Старобогатов Я. И. Биоразнообразие, его охрана и мониторинг // Мониторинг биоразнообразия. М., 1997. С. 16—24.
- [56] Дарвин Я. Происхождение видов. СПб., 1991.
- [57] Хлебович В. В. Уровни гомеостаза // Природа. 2007. № 2.
- [58] Котолупов В. А., Яковенко Л. В. Общие закономерности функционирования живых систем: системный подход в биологии и медицине (на русском и английском языках) // Пятый Международный аэрокосмический конгресс IAC-06, 27—31 августа, 2006. Сборник трудов. М., 2006. С. 543—546. На английском языке — там же: General Rules of Living Systems Functioning; Systems Approach in Biology and Medicine. P. 358—360.

Поступила 16 VII 2009

## LEVELS OF ORGANIZATION OF LIVING SYSTEMS: COOPERONS

© *V. F. Levchenko\** and *V. A. Kotolupov\*\**

\* Sechenov Institute of Evolutionary Physiology and Biochemistry, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russia;  
\*\* Center of Systemic Medicine, Vipava, Slovenia

## ABSTRACT

All creatures living on Earth are traditionally discussed in the context of structural-morphological approach, in frame of which there are considered various living systems (for instance, organisms and ecosystems) that have different sizes and organization and use different resources for their existence. These characteristics are sometimes added by some particular functional and ecological characteristics, but usually with respect to the structural ones. We believe that such traditional approach, although illustrating, but distracts from the circumstance that any living systems is to be considered an integrated structural-functional complex, the maintenance of existence of this system being impossible without the processes occurring constantly in it and aimed at preserving this complex. This leads us to the concept of *cooperons* — the self-preserved dynamic structures existing only as a result of various specifically organized cooperative processes (their intensities can vary depending on circumstances). From our point of view, all living systems are cooperons of different hierarchy levels. Some other systems, specifically the symbiotic ones, also are cooperons. In frame of this concept, it is possible to discuss functioning of living systems of different types of organization in a new context closer to physiologists, both for the case of «norm» and for the situation when the cooperative interrelations of parts of the system are impaired (for instance, in systemic diseases).

*Key words:* organism, regularities of functioning, cooperative systems.