



Изв. вузов «ПНД», т.10, № 3, 2002

ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ ЭВОЛЮЦИИ

В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель

Перевод с немецкого *Ю.А. Данилов*

- © Оригинал: В. Эбелинг, А. Энгель, Р. Файстель, 1990
- © Перевод с немецкого: *Ю.А. Данилов*, 2001
- © Произведение на русском языке: Эдиториал УРСС, 2001
- © Оформление, оригинал-макет: Эдиториал УРСС, 2001

М.: Эдиториал УРСС, 2001. 328 с.
ISBN 5-8360-0233-9

Предисловие

Вопрос о разработке физикой процессов эволюции возник с тех пор, как появились термодинамика и статистическая физика. Основополагающие идеи в этом направлении были высказаны еще Майером, Гельмгольцем, Клаузиусом, Больцманом, Пуанкаре и другими выдающимися физиками прошлого века. В первые три четверти XIX столетия идеи развития играли в физике лишь относительно узкую роль, но в последней четверти они оказались в самом центре всеобщего интереса. Причины наблюдаемой в наше время интенсификации работ по физике и химии процессов эволюции будут подробно рассмотрены в этой книге. Назовем самые главные предпосылки этой интенсификации:

- разработка Гамовым и другими авторами гипотезы Большого Взрыва и постепенное экспериментальное обоснование вытекающих из этой гипотезы следствий;
- разработка Пригожиным, Хакеном и др. теории самоорганизации (синергетики);
- разработка Эйгеном, Шустер и др. физико-химической теории биогенеза.

Двое из авторов этой книги в своей более ранней работе выдвинули программу «наведения мостов» между уже хорошо разработанной физикой самоорганизации и физикой процессов эволюции (*Ebeling, Feistel, 1982*). В этой книге мы продолжаем намеченную линию, для чего нам в известной мере придется напомнить уже достигнутое состояние интересующей нас области знания. Сложность проблематики не позволяет нам изложить все относящиеся к затронутому кругу проблем основы и все наиболее важные приложения. Особое значение мы придавали изложению стохастической теории, так как единство

необходимого и случайного составляет самую сущность эволюции и тем самым составляет центральный пункт теории. Затем мы обсуждаем вопросы стратегий эволюции и уже наметившиеся технические приложения. Ядро нашего изложения составляют вопросы эволюции информации. Относительно ранних фаз космической эволюции и их теоретико-полевого моделирования наша книга содержит лишь элементарные утверждения и ссылки на литературу для дальнейшего чтения.

Особое значение мы придавали подробному указателю литературы с полными названиями работ, в том числе и журнальных публикаций.

Для замысла этой книги решающее значение имели обсуждения на регулярно работающих семинарах «Необратимые процессы и самоорганизация» и «Система Лотки - Вольтерры» в Берлине, а также на московском семинаре «Синер-гетика». Особую благодарность мы хотели бы выразить своим коллегам М. Конраду, Г. Хакену, Б. Хессу, Ю. Л. Климонтовичу, Л. Кунерту, Г. Линде, А. С. Михайлову, М. Пешелю, И. Пригожину, Ю. М. Романовскому, Г.-П. Швэфелю, Е. Е. Селькову, П. Шустер, М. В. Волькенштейну, Г. Уинстону и Я. Б. Зельдовичу. Мы выражаем свою искреннюю признательность нашим друзьям, сотрудникам и студентам сектора 04 физического факультета университета имени Гумбольдта в Берлине, а также ответственным сотрудникам издательства Akademie - Verlag в Берлине за эффективное сотрудничество. В заключение мы хотели бы выразить особую благодарность Ю.А.Данилову за перевод нашей книги на русский язык и тщательную работу над текстом.

Глава 1

Введение

Скрытая и замкнутая сущность Вселенной не обладает силой, которая могла бы позволить ей оказывать сопротивление мужеству познания.

Георг Фридрих Вильгельм Гегель

1.1. Возникновение сложного

Взглянув на окружающий нас мир, мы обнаружим неисчерпаемое многообразие вещей и явлений: солнце, ветер, дождь и многочисленные сложные погодные процессы, изобилующий формами и красками мир растений, царство животных и окружающий нас рукотворный мир человека. Ночью мы наблюдаем звездное небо и получаем возможность заглянуть в процессы, разыгрывающиеся на больших пространственных и временных расстояниях от нас. Все это - в движении, все развивается.

С самого начала существования человечества люди созерцали парциальные процессы эволюции нашего мира, и всегда находились такие личности, которые поднимались над повседневными заботами и ставили далеко идущие вопросы. Что кроется за непрерывной сменой и развитием, рождением и гибелью? Почему так много одних явлений происходит без видимых причин, тогда как другие явления столь регулярны и взаимосвязаны? От накопленной жизненной мудрости стариков, передающих свой опыт молодым, через первые «научные» записки к основам научных знаний наших дней путь был длинным и трудным. Из многообразия пережитого необходимо было извлекать существенное и абстрагироваться от несущественного, намечать упрощенную модель. Когда за внешне совершенно различными явлениями удавалось обнаружить одну и ту же сущность, например, единое физическое строение атомов всех химически столь

различных элементов, это всегда становилось значительным шагом в познании мира. Наиболее радикально такая редукция к существенному происходила в физике. Ныне наиболее существенное содержание основных законов нашего мира спрессовано в немногочисленных теориях и уравнениях, и ведется напряженная работа по достижению объединения и этих теорий. Ведется поиск элементарных «кирпичиков» мироздания, и, судя по всему, построение единой теории станет возможным в обозримом будущем. Нет никаких сомнений в том, что такая единая теория мельчайших «кирпичиков» мироздания будет иметь огромное научное, теоретико-познавательное и практическое значение.

Но достаточно ли мы знаем для того, чтобы построить такую теорию? Все ли известно нам о веществе, если мы понимаем строение атомов? Достаточно ли мы сведущи в архитектуре, если основательно разбираемся в черепице? Целое часто представляет нечто большее, чем сумму отдельных частей. Именно это «большее» и представляет собой тот стержень, вокруг которого разворачивается в основном действие в нашей книге. Как получается, что при наложении физических процессов совершенно неожиданно возникают новые свойства? Как может быть, что из многих «мертвых» молекул возникает нечто живое? Существуют ли какие-нибудь законы помимо известных элементарных законов физики? Как может возникнуть сам собой сложный современный мир? Таковы вопросы, изучением которых занимается молодой раздел физики - физика процессов эволюции.

С давних пор физика представляет собой научную дисциплину, которая изучает самые общие, самые универсальные и самые фундаментальные законы природы и облачает их в как можно более строгую математическую форму. То же можно сказать и о физике процессов эволюции: занимаясь ею, мы хотим установить, какие правила и законы управляют развитием сложного, и тем самым определить структуру и функцию сложных процессов и образований. Мы ищем такие законы, которые, как и «обычные» физические законы, не зависят от того, являются ли исследуемые объекты физическими, химическими, биологическими или даже социальными структурами. Иначе говоря, мы пытаемся навести мосты между физикой неживого и физикой живого. Правда, и поныне имеется немало открытых вопросов, а иногда нам неизвестна даже правильная постановка вопросов. Однако имеются и установившиеся утверждения, концепции и идеи, и о них-то и пойдет речь в нашей книге.

1.2. Какую цель ставит перед собой физика процессов эволюции?

Опыт повседневной жизни и целенаправленное наблюдение процессов в природе и общественных явлений учат нас, что многие сложные системы, состоящие из большого числа взаимодействующих подсистем, при определенных условиях обладают способностью к самоорганизации и эволюции. Самым замечательным тому примером могут служить живые существа и их развитие на нашей планете. Сколь ни очевиден этот факт, научная интерпретация его весьма сложна и требует слияния результатов исследований многих областей науки. Основная задача настоящей книги состоит в систематическом изложении возможного вклада физики в разработку этой чрезвычайно сложной проблематики.

Под самоорганизацией мы понимаем в дальнейшем необратимый процесс, приводящий в результате кооперативного действия подсистем к образованию более сложных структур всей системы. Самоорганизация - элементарный процесс эволюции, состоящей из неограниченной последовательности процессов самоорганизации. Термин «самоорганизация» используется в этой книге в смысле

Пригожина для обозначения диссипативной самоорганизации, т.е. образования диссипативных структур. Наряду с диссипативной самоорганизацией существуют и другие формы самоорганизации, такие, как консервативная самоорганизация (образование структур кристаллов, биополимеров и т. д.) и дисперсионная самоорганизация (образование солитонных структур). Такие формы самоорганизации упоминаются в нашей книге лишь бегло.

Значение самоорганизации и эволюции для естественных и общественных процессов очевидно, и изучение ее закономерностей стало предметом бесчисленных исследований со времен Канта, Гегеля, Маркса и Дарвина. С другой стороны, в последнее время физика самоорганизации в открытых системах сформировалась в качестве новой области физики. Эта наука занимается изучением закономерностей нелинейных кооперативных процессов вдали от термодинамического равновесия; ее основные идеи восходят к Шрёдингеру, Тьюрингу, Берталанфи, Пригожину, Эйгену и Хакену. В настоящее время физика самоорганизации переживает период определенного завершения, появились первые обзоры и монографии, последовательно излагающие весь круг затрагиваемых проблем (*Glansdorff, Prigogine, 1971; Жаботинский, 1974; Романовский, Степанова и Чернавский, 1984; Эбелинг, 1979; Хакен, 1980; Haken, 1983; Николис и Пригожин, 1979, 1990; Пригожин, 1979; Ebeling, Klimonovich, 1984; Hofbauer, Sigmund, 1984; Васильев и др., 1987; Feistel, Ebeling, 1989*).

Решающее значение для создания физики самоорганизации имели развитие и разработка методологии следующих дисциплин:

- а) термодинамики необратимых процессов в открытых системах;
- б) нелинейной механики, электрофизики и физики лазеров;
- в) химической кинетики сильно неравновесных процессов;
- г) нелинейной динамики популяций и экологии;
- д) нелинейной теории регулирования, кибернетики и системного анализа.

Из приведенного выше перечня отчетливо виден междисциплинарный характер физики самоорганизации. Исходя из этого, физик Хакен предложил для новой области науки название синергетика (*Хакен, 1980; Haken, 1973, 1975, 1981*). Синергетика, по Хакену, должна охватывать все проблемы, связанные с образованием упорядоченных структур в сложных системах в результате кооперативного поведения подсистем. Если относительно названия новой области не удалось прийти к единому мнению, то интерес ученых к постановке проблем самоорганизации ныне, как показывает резкое увеличение оригинальных работ и монографий, не вызывает никаких сомнений. Таким образом, контуры физики самоорганизации очерчены достаточно четко, чего нельзя сказать о физике процессов эволюции. Цель настоящей работы состоит в том, чтобы навести мост между физикой самоорганизации и физикой процессов эволюции.

Разумеется, мы должны прежде всего задать себе вопрос, разумно ли вообще наше намерение. Не суждено ли ему разбиться вдребезги о такой общеизвестный факт, как то, что даже отдельная клетка неизмеримо сложнее любого традиционного объекта физического исследования? Мы хотим поделиться с читателем своими взглядами по этому вопросу, сформулировав их в нескольких фразах. Законы физики остаются в силе и действуют беспрепятственно и в области процессов эволюции. Никаких исключений никто и никогда не наблюдал, и их никто не ожидает. Физика входит в самые общие основы процессов эволюции, поскольку она указывает возможности и запреты. С другой стороны, мы считаем, что физика сама по себе не в состоянии установить основные законы и сущность эволюции, поскольку в этом круге вопросов необходимо учитывать весьма сложные аспекты. Поэтому стремиться надлежит не к тому, чтобы, например,

«свести Дарвина к Пригожину», а к тому, чтобы вооружить тех, кто изучает эволюцию, добытыми физиками достоверными знаниями и фактами, которые могут оказаться полезными при решении чрезвычайно сложных проблем эволюции. Позицию физиков относительно решения этих проблем мы продемонстрируем на двух подходящих к случаю примерах.

Николис и Пригожин пишут (*Николис, Пригожин, 1979, с. 20*): «В каком-то смысле мы находимся в положении пришельца с другой планеты, который, обнаружив пригородный дом, хочет разобраться в сути этого явления. Конечно, дом сам по себе не противоречит законам механики, иначе он развалился бы. Однако это не относится к существу дела, поскольку интерес представляют технология, которую использовали строители дома, потребности его обитателей и т.д. Понять все это невозможно, не имея представления о соответствующей цивилизации». Здесь, как мы отчетливо видим, позиция физика состоит в сотрудничестве с биологами и представителями других наук, занимающихся исследованием эволюции. При возведении здания эволюции физик выполняет функции специалиста по статике сооружений: он может выполнять важные совместные работы, но в решающих вопросах относительно смысла, цели и назначения здания должен присоединяться к мнению архитекторов.

Непревзойденное художественное описание того положения, в котором оказывается пришелец на чужой планете, принадлежит Станиславу Лему. Фантазия Лема породила планету Солярис, поверхность которой покрыта «живым Океаном», своеобразные формообразования которого остаются загадочными и непонятными для земных наблюдателей, придумывающих для них самые необычные названия. Особенно отличается в измышлении названий для причудливых формообразований приверженец систематики Гизе: «Столько лет тянулись непримиримые споры по поводу всего происходящего в «долгунах», миллионы которых бороздят необъятные просторы живого Океана. Их считали какими-то органами, полагая, что в них происходит обмен веществ, процессы дыхания и пищеварения и что-то еще, о чем помнят теперь лишь пыльные библиотечные полки. Каждая из этих гипотез была опровергнута тысячами труднейших, а подчас и опасных опытов...

Антропоморфизм (или зооморфизм) вновь и вновь проглядывал в отчаянных поисках исследователей, они усматривали в различных видоизменениях живого Океана то «органы чувств», то «конечности»; какое-то время ученые принимали за «конечности» «хребетники» и «мелькальцы». Но эти протуберанцы живого Океана, вздымающиеся иногда на две мили в атмосферу, так же можно назвать «конечностями», как землетрясения - «гимнастикой» земной коры.

Насчитывается около трехсот форм, повторяющихся с относительным постоянством и порождаемых живым Океаном сравнительно часто. За сутки можно обнаружить несколько десятков или сотен их на поверхности. Самые «нечеловеческие», то есть абсолютно не похожие ни на что земное, формы, по утверждению школы Гизе, - это симметриады ...

Хотя от этих исполинов могут сниться кошмары, самое страшное в симметриадах вовсе не их вид. Ужас наводит скорее то, что в границах симметриад нет ничего постоянного и определенного, там не действуют даже физические законы. Именно исследователи симметриад настойчивее всех утверждают, что живой Океан разумен»¹.

Но довольно о Станиславе Леме с его неповторимыми видениями чуждого людям мира, ускользающего от человеческого понимания. Земной физик, занимающийся изучением эволюционных процессов на нашей планете, находится в

¹ Станислав Лем. Солярис / Пер. Г. Гудимовой и В. Перельман // Станислав Лем. Избранное. М.: Прогресс, 1976. С. 125-130.

более благоприятной ситуации, чем исследователь Соляриса у Станислава Лема. Он может, во-первых, исходить из того, что нарушение физических законов никогда не наблюдалось и потому может быть исключено из рассмотрения, а во-вторых - рассчитывать на сотрудничество соответствующих специалистов. Обе основные позиции должны стать исходным пунктом любых последующих рассуждений.

Соответствующие специалисты заведомо принесут с собой понимание того, что в дальнейшем язык физиков станет пригодным для описания областей знания, не относящихся к физике. К физикам в полной мере относится то, что Гете некогда сказал о математиках: «Физики (в оригинале у Гете - математики) - своего рода французы: стоит сказать им что-нибудь, как они переведут это на свой язык, и тогда получается нечто совсем другое».

Язык выступает здесь лишь как внешняя форма определенного метода подхода к исследованию вещей, о котором Ромпе и Тредер (*Rompe, Treder, 1979*) говорят следующее: «Культивируемая физикой методика исследования есть не что иное, как единственно возможный путь точного познания природы, ставящего своей целью овладение природой. Оно не ограничивается рамками физики и отнюдь не является монополией физики».

С другой стороны, исследования процессов эволюции привнесли в физику новое мышление и новый метод работы, которые до того были достоянием только биологических и общественных наук: историческое мышление и исторический метод. Эволюция по самой своей сути является историческим процессом. Результаты эволюционных процессов, как правило, могут быть поняты не из их мгновенного состояния, а лишь на основе исследования истории их возникновения.

Именно в этом смысле мы ставим также старый вопрос: что такое жизнь? Какие свойства живой системы не могут быть описаны или объяснены в рамках традиционной физики и химии? Мы убеждены в том, что исследование эволюции требует междисциплинарного и исторического подхода. Именно поэтому физика процессов эволюции не может сводиться к совокупности законов и методов, а должна включать в себя также историю физических аспектов эволюции.

История эволюции есть история возникновения все более сложных структур из более простых; ведь суть эволюции состоит как раз в интеграции более простых элементов в целостные образования более высокого уровня, т. е. в более сложные системы, характеризующиеся новыми качествами.

Наиболее важными фазами эволюции окружающего нас мира были следующие:

- космическая эволюция (Большой Взрыв, образование элементарных частиц, формирование атомов и молекул, возникновение галактик, звезд и планет, образование «фотонной мельницы»);

- химическая эволюция (образование системы химических элементов и соединений, возникновение органических соединений, полимеризация в цепи органических молекул);

- геологическая эволюция (образование структур земной коры, гор, вод и т.д.);

- эволюция протоклетки (самоорганизация биополимеров и хранение информации на молекулярном уровне, пространственная индивидуализация, возникновение молекулярного языка);

- дарвиновская эволюция (развитие видов животных и растений и их взаимодействие, возникновение экосистемы на Земле);

- эволюция человека (развитие труда, языка и мышления);

- эволюция общества (развитие распределения труда, общественная организация, техника, общественные формации и т.д.);

- эволюция информации и обмена информации (обогащение и хранение знания, развитие связи, науки и т.д.).

Существенная задача «физики эволюции» состоит в том, чтобы разработать физические основы, необходимые для понимания этих отчасти весьма сложных процессов. Во избежание недоразумений сформулируем нашу точку зрения еще раз:

для понимания сложных процессов одной лишь физики недостаточно, но весьма существенные аспекты эволюционных процессов не могут быть поняты без физики. Наконец, физик, занимающийся проблемами эволюции, должен способствовать не только углублению знаний, но и (в соответствии с традициями своей науки) их техническому использованию. Эволюционные стратегии берут начало в работах Бремермана (*Bremermann, 1970*), Рехенберга (*Rechenberg, 1973*), Холланда (*Holland, 1975*) и Швевеля (*Schwefel, 1977*). Авторы настоящей книги убеждены, что перед эволюционными методами открывается прекрасное будущее, и усматривают в их разработке основное назначение физики процессов эволюции.

Эволюционистическое мышление, т.е. понимание мира как процесса эволюции, существовало еще у древних греков. Именно оно неизменно находилось и находится в фокусе мировоззренческих споров (см., например, *Fuchs-Kittowski, 1976; Löther, 1972; Ley, 1975; Hörz, 1974; Hörz, Wessel, 1983*), поскольку, как заметил Энгельс, всегда было «источником дальнейшего прогресса». Современное эволюционистическое мышление сложилось в XVIII и XIX веках и неразрывно связано с великими именами Канта, Гегеля, Маркса, Дарвина и Клаузиуса. Своего рода предтечей стало сочинение Канта «Всеобщая естественная история и теория неба». В нем Кант предпринял попытку объяснить происхождение мира, исходя из физических законов, и в необычайно остром полемическом стиле утверждал: «Если отрешиться от старых лишенных каких бы то ни было оснований предрассудков и дурацкой мировой мудрости, которая пытается под многозначительной миной скрыть глубокое невежество, то я надеюсь, опираясь на противоречивые основы, обосновать свое незыблемое убеждение в том, что мир от самого сотворения может быть познан, исходя из общих законов природы, как механическое развитие». То, что Кант - с немалой претензией - сделал для исследования космической эволюции, Гегель совершил для открытия наиболее общих законов диалектики. Марксу мы обязаны знанием некоторых законов общественной эволюции, а Дарвину (1938) - обоснованной теорией происхождения видов. Дарвин сформулировал принцип отбора и продемонстрировал его значение для эволюции в биологии. К сожалению, слишком мало кому известно, что лингвист Шлейхер около 1850 г. совершенно независимо от Дарвина установил аналогичный принцип для развития естественных языков и тем самым заложил основы теории эволюции языковой коммуникации (*Schleicher, 1863; Scharf, 1975*). Наконец, нельзя не упомянуть о великой заслуге Клаузиуса в формулировке важнейшего физического закона процессов эволюции - второго начала термодинамики. К Клаузиусу восходят и первые соображения относительно физически обоснованных моделей космического развития. Сколь ни сомнительным может казаться с современной точки зрения вывод Клаузиуса о «тепловой смерти» Вселенной, именно этот вывод послужил толчком к развитию теоретической мысли, которая в работах Эйнштейна, Фридмана и Гамова привела к ныне широко принятой релятивистско-термодинамической модели эволюции.

Разумеется, в связи с исследованием различных фаз эволюции следовало бы назвать еще много других имен; например, в связи с космической эволюцией - имена Гельмгольца, Больцмана, Хаббла, Толмена, Шрёдингера, Альфера, Зельдовича, Пензиаса и Вильсона, в связи с химической эволюцией - имена Оствальда, Опарина, Кальвина, Бернала, Ури и Миллера, в связи с геологической эволюцией - имена Лайеля, Вегенера и Вернадского, в связи с биологической эволюцией -

имена Геккеля, Т. Хаксли (Гексли), Холдейна, Райта, Фишера, Четверикова, Лотки, Вольтерры, Дж. Хаксли, Тимофеева-Рессовского, Шмальгаузена, Т. Добжанского, Дельбрюка, Эйгена и многих других.

* * *

Содержание

Предисловие

Глава 1. Введение. 1.1. Возникновение сложного. 1.2. Какую цель ставит перед собой физика процессов эволюции? 1.3. Об общей структуре процессов эволюции

Глава 2. Сценарий эволюции Метагалактики, Земли и жизни. 2.1. Большой Взрыв и расширение. 2.2. Многократное нарушение симметрии и возникновение элементов. 2.3. Структурирование протоплазмы и образование фотонной мельницы. 2.4. Возникновение жизни

Глава 3. Термодинамические условия эволюции. 3.1. Энергия и энтропия. 3.2. Начала термодинамики и самоорганизация. 3.3. Глобальные условия самоорганизации. 3.4. Локальные равновесия и критерии эволюции. 3.5. Термодинамические действующие силы эволюции Земли. 3.6. Термодинамика самоорганизации живых организмов. 3.7. Термодинамика экологических систем

Глава 4. Неустойчивости и пространственно-временные структуры. 4.1. Термодинамические неустойчивости. 4.2. Кинетические неустойчивости в жидких средах. 4.3. Кинетические неустойчивости в химических системах

Глава 5. Самовоспроизведение. 5.1. Динамика простого самовоспроизведения. 5.2. Стохастика простого самовоспроизведения. 5.3. Самовоспроизводящиеся автоматы. 5.4. Динамика нелинейного самовоспроизведения. 5.5. Стохастика нелинейного самовоспроизводства. 5.6. Самовоспроизводство в сложных системах

Глава 6. Процессы конкуренции и отбора. 6.1. Эволюция как проблема оптимизации. 6.2. Отбор в случае простой конкуренции. 6.3. Конкуренция и отбор в сетях. 6.4. Сосуществование и гиперотбор. 6.5. Отбор в сложных системах

Глава 7. Индивидуальное развитие как новая стратегия эволюции. 7.1. Роль онтогенеза в эволюции. 7.2. Дискретные модели циклов жизни. 7.3. Модель старения Маккендрика - фон Ферстера. 7.4. Процессы отбора в моделях с непрерывным старением. 7.5. Сложные возрастные структуры

Глава 8. Мутации и спирали эволюции. 8.1. Частота ошибок при последовательной репликации. 8.2. Основы теории Эйгена - Шустер. 8.3. Стохастика процессов эволюции. 8.4. Игра в имитацию. 8.5. Инновации в сложных системах

Глава 9. Эволюция в пространстве фенотипов. 9.1. Адаптивный ландшафт. 9.2. Скачкообразный характер эволюции в простой модели. 9.3. Индивидуальное развитие фенотипа

Глава 10. Фрустрация и иерархическое упорядочение. 10.1. Дарвиновская эволюция как задача фрустрированной оптимизации. 10.2. Некоторые результаты теории спиновых стекол. 10.3. Модель Андерсона пребиологической эволюции

Глава 11. Эволюция информации. 11.1. Переработка информации как процесс самоорганизации. 11.2. Информация и жизнь. 11.3. Биопоследовательности и дерево эволюции. 11.4. Энтропия и сложность. 11.5. Генетический язык и грамматика биопоследовательностей

Глава 12. Перспективы использования. 12.1. Проблемы энергии, материалов и физических элементов. 12.2. Проблемы автоматизации и оптимизации. 12.3. Проблемы биотехнологии. 12.4. Ассоциативная память. 12.5. Сетевые автоматы и нейрокомпьютеры

Послесловие к русскому изданию

Литература

Предметный указатель