

**От редакции.**

**Предисловие. О словах (Г.Г.Малинецкий).**

**Предисловие автора ко второму изданию.**

**Предисловие автора. Эволюционная кибернетика - формирующаяся научная дисциплина.**

**Введение.**

**Глава 1. Философские предпосылки эволюционной кибернетики.**

- 1.1. На пути к теории происхождения мышления.
- 1.2. Концептуальные теории.
- 1.3. Заключительные замечания по первой главе.

**Глава 2. Модели возникновения молекулярно-генетических кибернетических систем.**

- 2.1. Модель квазивидов М. Эйгена. Детерминированные и стохастические методы описания модели квазивидов.
- 2.2. Спиновые стекла как модель случайно взаимодействующих элементов. "Спин-стекольная" модель эволюции.
- 2.3. Оценка скорости эволюции в модели квазивидов.
- 2.4. Модель гиперциклов М. Эйгена и П. Шустера.
- 2.5. Модель сайзеров В.А. Ратнера и В.В. Шамина. Гиперциклы или сайзеры?
- 2.6. Адаптивный сайзер - модель возникновения простейшей системы управления.
- 2.7. Выводы по кибернетическим моделям предбиологической эволюции.  
Математические приложения к главе 2.

**Глава 3. Общие модели молекулярно-генетической эволюции.**

- 3.1. Классическая популяционная генетика.
- 3.2. Методы теоретической популяционной генетики.
- 3.3. Молекулярная эволюция: теория нейтральности М. Кимуры.
- 3.4. Другие модели, характеризующие аспекты молекулярно-генетической эволюции.
- 3.5. НК-автоматы С. Кауффмана. Жизнь на границе хаоса и порядка.

**Глава 4. Прикладное эволюционное моделирование.**

- 4.1. Эволюционные алгоритмы.
- 4.2. Генетический алгоритм.
- 4.3. Оценка эффективности генетического алгоритма.

**Глава 5. Искусственные нейронные сети.**

- 5.1. Формальный нейрон.
- 5.2. Немного истории.
- 5.3. Нейросетевая ассоциативная память.
- 5.4. Сеть Хопфилда: нейронная сеть + гамильтониан.
- 5.5. Метод обратного распространения ошибок.
- 5.6. Теория нейронных сетей с точки зрения эволюционной кибернетики.

**Глава 6. Направление исследований "Искусственная жизнь" - эволюционные и нейросетевые методы.**

- 6.1. Искусственная жизнь - жизнь, какой она могла бы в принципе быть.
- 6.2. Типичные модели искусственной жизни.
- 6.3. Модель "ПолиМир" Л. Ягера.
- 6.4. Модель взаимодействия обучения и эволюции Д. Экли и М. Литтмана.

**Глава 7. Направление исследований "Адаптивное поведение".**

- 7.1. From Animal to Animat - модели адаптивного поведения животного и робота.
- 7.2. Компьютерные методы.
- 7.3. Подходы и модели AnimatLab.
- 7.4. Широкий фронт исследований адаптивного поведения.
- 7.5. "Кузнечик" - модель эволюционного возникновения целенаправленного адаптивного поведения.
- 7.6. Развитие модели "Кузнечик" - возникновение естественной разветвленной иерархии целей.
- 7.7. Проект "Мозг Анимата".
- 7.8. Выводы по моделям адаптивного поведения.

## **Заключение.**

### **Предисловие. О словах (Г.Г.Малинецкий)**

Думаю, что эту книгу Владимира Георгиевича Редько - одного из ведущих специалистов России в области адаптивного поведения и нейронных сетей - ждет счастливая судьба.

Во-первых, потому что интерес к этой области исследований очень велик. Например, страница В.Г.Редько, посвященная биокибернетике - BioCyber, является одной из самых посещаемых на сайте Института прикладной математики им.М.В. Келдыша РАН [HYPERLINK](#) . Выступления Владимира Георгиевича на различных научных форумах и в России, и за рубежом очень часто проходят в переполненных залах.

Во-вторых, книга написана легким летящим стилем, который так любят и начинающие, и серьезные профессионалы. Идеи, базовые модели, перспективы идут в этой книге с большим приоритетом по отношению ко всему остальному. Писать такие книги нелегко - подробности, тонкости, детали, многие доказательства, милые сердцу специалиста, приходится беспощадно отбрасывать. Зато читать такие работы очень приятно.

В-третьих, среди главных идей нашей эпохи - идея эволюции. И если прочно стоять на научной почве, то следует признать, что целостная картина мира будет построена только после того, как удастся достаточно ясно и строго объяснить возникновение и развитие многих ключевых сущностей. Среди таковых: Вселенная, Солнечная система, жизнь, общество, мышление. При этом, если, следуя Лапласу, отвергнуть гипотезу о Творце, то приходится опираться на идеи саморазвития, самодвижения, самоорганизации. (Поэтому неудивительно, что настоящая книга издается в серии, посвященной теории самоорганизации - синергетике.) Главная тема книги - возникновение мышления в ходе эволюции. В настоящее время удалось далеко продвинуться в понимании этого феномена, опираясь на достижения нейробиологии, когнитивной психологии, компьютерных наук и теории нейронных сетей.

Удивительно, но в наши нелегкие для науки и общества времена вопросы, связанные с такой фундаментальной проблемой, как мышление, вызывают огромный интерес. Например, книга Роджера Пенроуза "Новый ум короля. О компьютерах, мышлении и законах физики".

И хотя книга В.Г. Редько говорит сама за себя, еще несколько слов о ней сказать стоит. Пожалуй, скорее не о ней, а о ее названии.

Кто-то из американских классиков научно-популярного жанра заметил, что каждая формула в книге уменьшает число потенциальных читателей вдвое. Наверно, то же можно

сказать и о названии. Опыт издательства показывает, что незнакомые слова и сочетания отпугивают и товароведов, заказывающих книги, и продавцов, стремящихся засунуть странную книгу в дальний угол, и читателей, считающих, что это точно написано не для них.

Поэтому поясню название и его связь с синергетикой.

Итак, *синергетика* - это междисциплинарный подход, который активно развивается в науке уже 35 лет. Название "синергетика" означает в переводе с греческого "совместное действие". Это название придумал немецкий физик-теоретик Герман Хакен, вложив в него два смысла.

Во-первых, это подход, исследующий возникновение новых качеств у сложных систем, подсистемы которых такими качествами не обладают. Например, нервная клетка - нейрон, кажется, с точки зрения биофизики, представляется сейчас довольно простым объектом. Но их совокупность, во многом возникающая благодаря самоорганизации, - это уже чудо из чудес - мозг. *Самоорганизация* - одно из ключевых понятий синергетики.

Во-вторых, это междисциплинарный подход, развитие которого требует совместных усилий представителей различных научных дисциплин.

Итак, синергетика занимается универсальными свойствами сложных объектов, процессами самоорганизации, возникновением новых качеств у целого, которыми не обладают части.

Предшествующим междисциплинарным подходом, получившим большую известность и позволившим решить ряд важных задач, стала *кибернетика*. Этот подход, по мысли его создателя Норберта Винера, должен был раскрыть универсальные законы управления в технологических и живых системах, в обществе. Одним из ключевых понятий кибернетики стало понятие "черного ящика" - объекта, структура которого неважна, но который в ответ на заданные входные воздействия дает определенный выход.

Но развитие науки показало, что понимание многих явлений требует "раскрыть черный ящик". В частности потому, что очень часто в ответ на многие внешние воздействия "черный ящик" меняет свою структуру, организацию, поведенческие стратегии, если хотите. А это уже епархия синергетики.

Впрочем, многие идеи, проблемы, подходы синергетика унаследовала от своей предшественницы кибернетики. Наверно, для междисциплинарных подходов это естественно. И яркий пример этого - та книга, которую вы держите в руках. С одной стороны, в ней речь идет о рефлексах, инстинктах, мышлении - сущностях, связанных с управлением в живых системах. С другой стороны, об их возникновении - об адаптации и самоорганизации, происходящих в ходе эволюции.

В своем развитии синергетика прошла три эпохи. В каждой из них она предложила свой круг проблем, идей, методов и областей приложения. Или, говоря языком одного из классиков философии науки Томаса Куна, создала свою парадигму. По Куну, парадигма - это, с одной стороны, стандарт исследований, в основе которого лежит блестящее достижение. С другой - "генератор задач", который позволяет предлагать и решать интересные содержательные проблемы.

Первая парадигма связана с возникновением упорядоченности в сложных пространственно-распределенных системах. Последние описываются уравнениями в частных производных и потенциально имеют бесконечно много степеней свободы. Однако в ходе самоорганизации выделяются несколько ведущих переменных - *параметров порядка*, - которые и определяют динамику всех остальных степеней свободы. При этом для самоорганизации принципиальную роль играют диссипативные процессы, связанные с рассеянием энергии (вязкость, теплопроводность и др.). Естественно, чтобы восполнять потери энергии, система должна быть открытой - способной к обмену с окружающей средой. Упорядоченность, которая возникает в ходе самоорганизации, стали называть *диссипативными структурами*, а парадигму - *парадигмой диссипативных структур*.

Такие структуры могут быть очень многообразными и обладать исключительно интересными свойствами. Но наибольшую известность получили два "предельных случая" - стационарные и нестационарные диссипативные структуры.

Структуры первого типа были открыты еще в 1952 году выдающимся математиком Аланом Тьюрингом при попытке смоделировать морфогенез - процесс дифференциации клеток на ранних стадиях развития организма. Вычислительный эксперимент, проведенный Тьюрингом, показал, что в однородной среде при внесенных малых случайных возмущениях с течением времени появляется типичная картина чередования максимумов и минимумов. Глубокое исследование таких структур было предпринято в брюссельской научной школе под руководством нобелевского лауреата Ильи Романовича Пригожина.

Другой предельный случай - нестационарные диссипативные структуры, развивающиеся в режиме с обострением, - был исследован в научной школе члена-корреспондента РАН Сергея Павловича Курдюмова. *Режимы с обострением* - это такие режимы, при которых одна или несколько переменных, характеризующих систему, за конечное время обращаются в бесконечность. Как ни парадоксально, но именно такое поведение характерно для развития многих систем с сильной положительной обратной связью.

Нестационарные структуры обладают многими удивительными свойствами. Например, они могут быть локализованы в пространстве. Для них удалось выявить *законы коэволюции* - правила, по которым простейшие структуры могут объединяться в сложные.

Самоорганизация, рассматриваемая в первой парадигме, происходит в обычном физическом пространстве - в одних местах, вопреки очевидности, температура, концентрация вещества или скорость жидкости велика, а в других - нет. Типичные области приложений - гидродинамика, химическая кинетика, биофизика, теория горения и взрыва, физика плазмы. Развитие этой парадигмы позволило предсказать и обнаружить ряд удивительных эффектов в физике, химии, биологии, предложить оригинальные подходы во многих крупных научно-технических проектах в химической технологии, в создании новых материалов, в управляемом термоядерном синтезе и во многих других областях.

Затем появилась вторая парадигма, связанная с открытием, исследованием и использованием динамического хаоса. Это замечательное явление, открытое американским метеорологом Эдвардом Лоренцем, во многом изменило сам облик естествознания. Оказалось, что в простейших механических системах, где прошлое однозначно определяется будущим, есть принципиальные ограничения, связанные с прогнозом. Существует характерное время - *горизонт прогноза*, по происшествии

которого нам доступно, по существу, только предсказание вероятности найти систему в разных состояниях.

При этом происходит самоорганизация, но уже другая. Эта самоорганизация в так называемом фазовом пространстве - в пространстве состояний системы. При этом типичным является возникновение самоподобных геометрических структур, повторяющих себя в разных масштабах, - фракталов. *Парадигма динамического хаоса* далеко раздвинула рамки синергетики. В нее вошли новые методы медицинской диагностики, алгоритмы прогноза, способы записи, передачи, обработки информации и многое другое. В круге интересов синергетики оказались медицина и экономика, радиоэлектроника и криптография.

Из истории науки известно, что часто одна парадигма часто соперничала и конфликтовала с другой, в конце концов, вытесняя предшественницу на обочину. Однако в синергетике все происходит иначе - парадигмы сосуществуют, поддерживая и дополняя друг друга.

И, наконец, появилась третья парадигма. Именно ей посвящена настоящая книга, именно она сейчас находится в центре внимания большинства ученых, занимающихся междисциплинарными исследованиями. Очень часто ее называют *парадигмой сложности*.

Среди ее проблем анализ и прогноз редких катастрофических процессов, эволюция в ее разных ипостасях, моделирование уникальных объектов, многоагентные системы, а также искусственные конструкции, воспроизводящие элементы жизни и сознания. Это направление стремительно развивается, вбирая в себя многие идеи и представления, выдвинутые в кибернетике. (И книга, которую вы держите в руках, - удачный пример этого.)

И здесь идеи синергетики начали входить в историю, политологию, стратегическое планирование, психологию, социологию. Заметим, что и здесь в центре внимания - процессы самоорганизации, но самоорганизации в пространстве образов, поведенческих стратегий, решающих правил - в виртуальной реальности. (Такую самоорганизацию часто называют "субъективной", в отличие от "объективной", которая рассматривалась в предшествующих парадигмах.)

И тут среди приложений синергетики оказались методы прогноза бедствий, катастроф и кризисов, стратегический прогноз, нанотехнологии и проектирование "интеллектуальных объектов" (материалов, роботов, вооружений и т.д.), создание нового поколения технологий.

Более того, мозговые центры, консультирующие ведущие корпорации и правительства развитых стран, все чаще начали использовать концепции и модели синергетики. Вектор развития технологий, дальний прогноз, политические решения во многом начали опираться на представления о самоорганизации.

Самоорганизация характерна и для научного творчества. Чтобы быть понятыми и востребованными, новые идеи не должны слишком опережать свое время (иначе на них просто не обратят внимания). Чтобы воздействие на нелинейную систему сыграло существенную роль, оно должно производиться в нужное время, в нужном месте, с нужной интенсивностью (наверно, литература многое улавливает раньше, толкуя о единстве места, времени и образа действия).

Думаю, что книга В.Г. Редько очень точно попала в резонанс и с развитием синергетики, и с востребованными сейчас интеллектуальными технологиями, и с переосмыслением на новом уровне кибернетических идей. Но будущее обсуждаемого подхода зависит не только от автора, но и от читателей - "нам не дано предугадать, как слово наше отзовется..."

Итак, очередь за вами. Успехов вам!

*Председатель редколлегии серии "Синергетика: от прошлого к будущему" Г.Г. Малинецкий*

## **Предисловие автора. Эволюционная кибернетика - формирующаяся научная дисциплина**

В процессе биологической эволюции возникли чрезвычайно сложные и вместе с тем удивительно эффективно функционирующие живые организмы. Эффективность, гармоничность и согласованность работы "компонент" живых существ обеспечивается биологическими управляющими системами.

Но каковы эти управляющие системы? Как и почему они эволюционно возникли? Какие информационные процессы обеспечивают работу этих управляющих систем? Как животные познают внешний мир и используют это познание для управления своим поведением? Как эволюционное развитие биокрибернетических систем и познавательных способностей животных привело к возникновению интеллекта человека? Какие уроки из знаний о естественных "биокомпьютерах" можно извлечь для разработки искусственных компьютеров и программных продуктов? До какой степени исследования причин возникновения естественного интеллекта могут способствовать развитию искусственного интеллекта?

Может ли какая-либо научная дисциплина ответить на этот спектр интригующих вопросов? По мнению автора, такая научная дисциплина только формируется. Эту дисциплину можно назвать "эволюционная кибернетика". Основным предметом ее исследования мог бы стать теоретический анализ эволюции биологических систем обработки информации и кибернетических свойств живых организмов.

Что же сделано в этой области, и что предстоит сделать в будущем? Анализ этого вопроса и посвящена настоящая книга.

В книге рассмотрены математические и компьютерные модели, характеризующие эволюцию биологических информационных и кибернетических систем, проанализированы междисциплинарные связи эволюционной кибернетики, обсуждаются философские проблемы, лежащие в основе рассматриваемых исследований, а также намечены проблемы для дальнейших исследований.

В самые последние годы наблюдается мощный всплеск построения и исследования самых разнообразных эволюционных кибернетических моделей: эволюционных моделей "Искусственной жизни", моделей эволюционной экономики и эволюционной роботики, моделей эволюционирующих нейронных сетей. Конечно, в одной книге трудно охватить все это развивающееся многообразие исследований эволюционной кибернетики, но последовательное изложение этой удивительно интересной и увлекательной научной дисциплины необходимо, хотя бы потому, что в отечественной научной литературе практически не освещены современные эволюционные кибернетические исследования.

Только некоторые модели описаны подробно, эти модели были тесно связаны с научными интересами автора, и их можно рассматривать как примеры конкретных исследований эволюционной кибернетики.

Данная книга ни в коей мере не претендует на полноту изложения всех интересных направлений эволюционной кибернетики. Цель ее - дать общее представление о том, какие модели уже известны, над какими моделями ученые работают сейчас, и какие модели имеет смысл строить в будущем.

Материал книги основан на семестровом курсе лекций, которые автор читал на кафедре прикладной математики и синергетики МФТИ.

Автор искренне благодарит сотрудников Института прикладной математики им.М.В. Келдыша РАН, в первую очередь Сергея Павловича Курдюмова и Георгия Геннадьевича Малинецкого, обсуждения с которыми способствовали формированию структуры книги. Глубокую признательность автор выражает руководителям научных семинаров В.И. Аршинову, А.А. Жданову, В.Л. Дунину-Барковскому, А.К. Звездину, В.П. Иванникову, Ю.Т. Каганову, Я.А. Моносову, О.Ю. Орлову, Ю.М. Свиричеву, В.В. Смолянинову и В.Г. Яхно за предоставленную возможность обсуждения идей, положенных в основу этой книги.

Особенно хотелось бы поблагодарить Валентина Федоровича Турчина, переписка и краткие встречи с которым были очень впечатляющими и плодотворными. Необходимо отметить, что именно В.Ф. Турчин ввел в оборот термин "Эволюционная кибернетика".

Автор также благодарен Ю.И. Балкарею, А. С. Бугаеву, И.Л. Букатовой, Б. Гертзелю, Ю.А. Данилову, А.А. Ежову, В.М. Елеонскому, М.Г. Кузьминой, В.В. Максимову, И.П. Муравьеву, К.А. Никольской, А.А. Фролову, Л.Е. Цитоловскому, А.В. Чернавскому и Д.С. Чернавскому за дружеские и критические дискуссии, способствовавшие формированию научной позиции, на которой основано изложение материала книги.

Искреннюю признательность автор выражает своим молодым коллегам М.С. Бурцеву и Р.В. Гусареву за очень интересную совместную работу над эволюционными моделями "Искусственной жизни", выполненную в последнее время.

---

## Введение

В этой книге речь пойдет об исследованиях эволюции кибернетических свойств биологических организмов. О тех исследованиях, в которых ученые пытаются проанализировать, как возникали самые простейшие кибернетические системы в процессе происхождения жизни на Земле, как они могли развиваться, совершенствоваться в ходе дальнейшей эволюции. В этих исследованиях делается попытка проследить, как возникала адаптация живых организмов к постоянно меняющейся внешней среде, как эволюционно возникали познавательные способности животных и как эти способности используются при адаптивном поведении животных. Мы также обсудим подходы к исследованию интереснейшей проблемы: как в процессе эволюции познавательных способностей животных возник интеллект человека.

Поскольку мы говорим об исследованиях эволюции систем управления, кибернетических систем биологических организмов, то естественно называть эту область исследований эволюционной кибернетикой.

В основном мы будем рассматривать теоретические исследования, основанные на построении математических или компьютерных моделей информационных и кибернетических систем. Но там, где это уместно, мы будем говорить и о примечательных экспериментальных результатах, о красивых гипотезах, о методологических концепциях.

Книга базируется на анализе исследований последних 20-30 лет. Эти исследования разнообразны, поэтому невозможно подробно рассказать обо всех их деталях. Также невозможно подробно излагать все математические модели, - эти модели слишком многочисленны. Для нас значительно более важно представить идейную сторону предмета и в определенной степени происходящую здесь драму идей, которая, по-видимому, имеет место в любой активно развивающейся науке. А эволюционная кибернетика - это живая, активно развивающаяся именно сейчас научная дисциплина. И цель этой книги - дать представление о ведущихся здесь исследованиях, а также дать возможность заинтересованному читателю самому активно включиться в эти исследования.

В первой главе рассмотрены *философские предпосылки* исследований эволюционной кибернетики, а также методологические концепции, которые могут быть использованы при построении моделей эволюции биокибернетических систем.

Вторая глава посвящена описанию *моделей возникновения молекулярно-генетических информационных систем*. Эти модели - один из подходов к исследованию интригующей проблемы -- как возникла жизнь на Земле? Основной акцент здесь делается на моделях возникновения именно систем управления, информационных систем. Излагается ряд содержательных моделей, предложенных и исследованных в 1970-1980-х гг.:

- модель *квазивидов* (М. Эйген), характеризующая возможный процесс эволюционного возникновения самых простейших макромолекул (цепочек РНК), кодирующих наследственную информацию;
- модель *гиперциклов* (М. Эйген и П. Шустер), в которых к цепочкам РНК добавляются ферменты, которые выполняют определенные каталитические функции и вместе с цепочками РНК формируют целостную систему кооперативно взаимодействующих макромолекул;
- модель *сайзеров* (В.А. Ратнер и В.В. Шамин), которые как гиперциклы, представляет собой макромолекулярные самовоспроизводящиеся системы взаимодействующих полинуклеотидных цепочек и ферментов, но по структуре значительно ближе к живым клеткам, чем гиперциклы;
- модель *адаптивного сайзера* (В.Г. Редько) - модель возникновения простейшей системы управления, возникновения адаптации "протоорганизма" к переменной внешней среде.

В третьей главе характеризуются *общие модели генетической эволюции*: модели классической популяционной генетики (Р. Фишер, Дж. Холдейн, С. Райт), теория нейтральной эволюции (М. Кимура), НК-автоматы С. Кауффмана, а также подходы ряда авторов к моделированию общих закономерностей развития биологических генетических систем.

Генетический алгоритм и другие методы *прикладного эволюционного моделирования* кратко описаны в четвертой главе.



Пятая глава посвящена теории *нейронных сетей*. Здесь кратко излагается история развития моделей нейронных сетей, и характеризуются современные исследования искусственных нейронных сетей.

Шестая и седьмая главы содержат описание сравнительно новых и тесно связанных между собой направлений исследований "Искусственная жизнь" и "Адаптивное поведение", которые сформировались на стыке 1980-х и 1990-х гг. В шестой главе характеризуются методы и типичные модели "*Искусственной жизни*". Основной мотивацией исследований искусственной жизни служит желание понять и промоделировать формальные принципы организации биологической жизни.

Седьмая глава посвящена направлению исследований "*Адаптивное поведение*". Основной подход этого направления - конструирование и исследование искусственных (в виде компьютерной программы или робота) "организмов", способных приспосабливаться к внешней среде. Эти организмы называются "*аниматами*" (от англ. animal + robot = animat). Ближайшая цель этих работ - исследовать архитектуры и принципы функционирования, которые позволяют животным или роботам жить и действовать в переменной внешней среде. Дальняя задача этого направления -- попытаться проанализировать эволюцию когнитивных способностей животных и эволюционное происхождение интеллекта. В главе излагаются математические и компьютерные методы, используемые при построении моделей адаптивного поведения, характеризуются работы ряда лабораторий, ведущих эти исследования, и приводятся примеры конкретных моделей. Заканчивается глава описанием проекта "Мозг Анимата", который нацелен на разработку широкого спектра моделей адаптивного поведения.

В заключении делается попытка наметить программу работ по моделированию когнитивной эволюции.



#### Об авторе

РЕДЬКО Владимир Георгиевич

Доктор физико-математических наук, заместитель руководителя по науке Центра оптико-нейронных технологий НИИ системных исследований РАН. В 1971 г. окончил Московский физико-технический институт. На втором курсе Физтеха задумался над проблемой: почему человеческое мышление применимо к познанию природы? Автор более 150 научных публикаций.

Область научных интересов: проблема происхождения мышления человека, когнитивная эволюция, модели познавательных способностей биологических организмов.