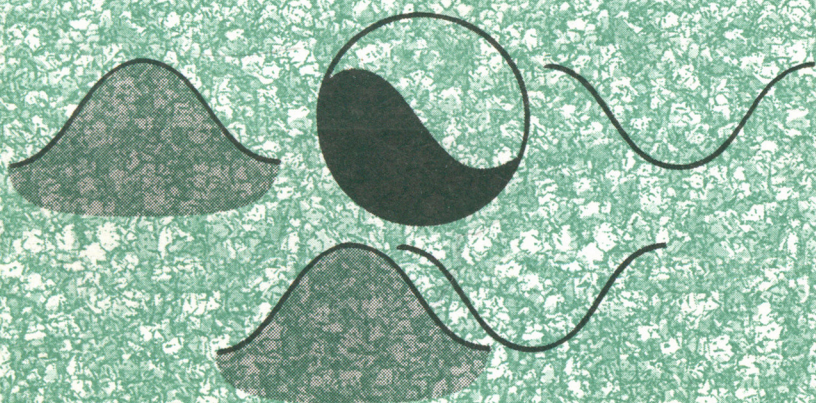


С. В. Петухов

БИОСОЛИТОНЫ

тайна живого вещества

ОСНОВЫ
СОЛИТОННОЙ
БИОЛОГИИ



МОСКВА
1999

С.В. Петухов

БИОСОЛИТОНЫ —

тайна живого вещества

**ОСНОВЫ
СОЛИТОННОЙ
БИОЛОГИИ**

МОСКВА

1999

Охраняется законом РФ об авторском праве.
Запрещается воспроизведение всей книги или любой
ее части без письменного разрешения автора.

Петухов Сергей Валентинович
**БИОСОЛИТОНЫ —
ТАЙНА ЖИВОГО ВЕЩЕСТВА.
ОСНОВЫ СОЛИТОННОЙ БИОЛОГИИ**

Корректор *Федорова И. М.*

Издательство „ГП Кимрская типография”.
Лицензия ЛР № 010333 от 16 июня 1999 г.
171510, г. Кимры, Тверской обл., ул. Володарского, 11.

Подписано в печать с готовых диапозитивов 15.05.99. Формат 84х108/32. Гарнитура
Петербург. Печать офсетная. Усл. печ. л. 15,12.
Тираж 500 экз. Заказ № 2527

Отпечатано в Кимрской типографии.
171510, г. Кимры, ул. Володарского, 11

Петухов С.В.

П 29 Биосолитоны — тайна живого вещества. Основы солитонной биологии. М.: „ГП Кимрская типография“, 1999. — 288 с.

В этой книге излагается авторская концепция живого организма как многоуровневого ансамбля солитонов — автолокализованных сгустков энергии живого вещества. Описано проявление надмолекулярных солитонов в биологических движениях, а также в качестве солитонных биодоменных стенок у организмов. Показана связь биосолитонов с симметриями и морфологией живого. На основе устанавливаемых параллелей между физико-математическими свойствами солитонов и биологическими феноменами развивается новый физико-энергетический подход к живому веществу и проблемам его самоорганизации.

ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Проблемы самоорганизации живой материи относятся к числу наиболее интересных для человечества. Они изучались на протяжении многих веков. Способность живых организмов саморазвиваться в упорядоченные тела, в том числе многоблочные конструкции с реализацией отношений симметрии между телесными блоками, отражает глубинные свойства живого. Автор настоящей книги много лет посвятил изучению этих биологических симметрий, включающих евклидовы и неевклидовы типы, а также исследованию возможных механизмов их биологической реализации и сравнительному анализу симметрий в живой и неживой природе.

В результате им найден оригинальный солитонно-энергетический подход к изучению надмолекулярных биологических феноменов движения и структуризации. Данный подход основан на применении достижений теории нелинейных волн, в которой сформировалось и развивается важное понятие солитонов. Эта новая область исследований на стыке учения о нелинейных волнах и биологии развивает содержательные модельные подходы к живому веществу. Данному кругу вопросов, объединяемых по предложению автора под названием «солитонная биология», посвящена настоящая книга. Она фактически является продолжением его двух предыдущих книг.

Изучение биосимметрий ведется в Отделе биомеханики систем человек-машина-среда Института машиноведения РАН в связи с широким кругом задач биомеханики, эргономики, бионики, робототехники. В частности, в Отделе биомеханики систематически функционирует семинар по симметриям. Вопросы биосимметрий и биомеханики активно обсуждаются на многих научных конференциях, прежде всего, по линии Международного общества по изучению симметрии «ISIS-Symmetry». Это Общество было создано в 1989 году с участием ИМАШ РАН. Оно выпускает международный журнал «Symmetry: Culture

and Science», провело четыре международных конгресса по проблемам симметрии. Членами данного Общества являются представители около 50 стран мира. Автор книги — доктор физико-математических наук лауреат Государственной премии СССР С.В. Петухов — является его Вице-президентом с момента основания Общества.

Целесообразность биоматематических исследований о природе живого вещества для машиноведов обусловлена тем, что целый класс современных перспективных машин и механизмов — антропоморфных и зооморфных — имеет своим прототипом живые организмы. Именно в машинах человек с древних времен пытался воспроизвести завидные способности живых организмов.

Кроме того, с развитием мира машин и острыми проблемами техногенной безопасности резко возрастает значение эргономических проблем, связанных с углубленным изучением биологических свойств человека-оператора, оптимизацией его трудовых движений и поз, борьбой за непрерывность его активного внимания к информации о состоянии машинных комплексов и пр. Большое число биомеханических задач ставят перед машиноведами медицина, биотехнология, спорт. К их числу относятся задачи создания протезов, включая искусственное сердце, стимуляторов биологических процессов, тренажеров и т.п. Все это требует глубокого знания свойств живых организмов и зачастую упирается в недостаточность понимания современной наукой природы живого вещества. Надеемся, что излагаемое в книге исследование структурных и энергетических свойств живых организмов будет способствовать появлению новых конструкторских решений и прогрессу в технике и смежных областях.

В исследованиях автора, о которых рассказывает эта книга, развиты и обобщены результаты работ многих отечественных и зарубежных ученых, интересовавшихся геометрическими закономерностями биологических объектов. Думается, что читатель, познакомясь с книгой, согласится со словами Владимира Ивановича Вернадского: «Симметрия живого вещества не изучена достаточно, и ее изучение есть одна из основных задач... Это область будущего огромного плодотворного искания».

*Почетный президент Международного общества
по изучению симметрии «ISIS-Symmetry»
академик К.В. Фролов*

ВВЕДЕНИЕ

Задачей всякого естествоиспытателя является разгадка тех или иных тайн природы. Для автора настоящей книги соответствующая задача связана с удивительной способностью живых организмов к активному движению и саморазвитию, которая рассматривается в качестве тайны живой материи, вынесенной в заглавие книги. Она связана с особой судьбой энергии, попадающей в живое вещество и участвующей в процессах его упорядочивания и трансформирования, подобных перерастанию маленького семечка в огромное дерево.

Названная способность живого вызывает у всех, над ней размышляющих, ощущение глубочайшей загадки природы, что выражено в знаменитых словах И. Канта: «Поэтому пусть не покажется странным, если я позволю себе сказать, что легче понять образование всех небесных тел и причину их движений, короче говоря, происхождение всего современного устройства мироздания, чем точно выяснить на основании механики возникновение одной только былинки или гусеницы» (Кант /1963/).

При попытках продвинуться в решении этой загадки современный исследователь находится в несравненно лучшем положении, чем великие естествоиспытатели прошлого, благодаря огромному прогрессу науки. В настоящей книге показано важное значение для познания живой материи сравнительно нового понятия математического естествознания — солитона. Это понятие стало одним из центральных в так называемой нелинейной динамике. Оно возникло и заняло видные позиции в современной теоретической физике буквально в последние десятилетия благодаря математикам и специалистам по математической физике. Солитоны, называемые иногда «волновыми атомами», об-

ладают свойствами волн и частиц одновременно, но не являются в полном смысле ни тем, ни другим, а представляют собой новый объект науки. Солитоны способны взаимодействовать друг с другом подобно заряженным частицам, размножаться и гибнуть, образовывать ансамбли с нетривиальной морфологией и динамикой пульсирующего и иного характера, преодолевать тенденцию к беспорядку в содержащих их «солитонных средах», и пр. Солитоны можно трактовать как специфическую форму организации физической энергии в веществе, и соответственно можно говорить о «солитонной энергии» по аналогии с известными выражениями «волновая энергия» или «вибрационная энергия».

Солитоны реализуются как состояния особых нелинейных сред (систем) и имеют принципиальные отличия от обычных волн, представление о которых использовалось в прошлом для интерпретации волнообразных природных процессов. В частности, солитоны зачастую представляют собой устойчивые автолокализованные сгустки энергии с характерной формой одногорбой волны, движущейся с сохранением формы и скорости без диссипации своей энергии (а значит без нагрева среды). Поэтому естествоиспытатели прошлого, соприкасаясь с природными явлениями солитонного типа, в принципе не могли понять и объяснить их на базе классических представлений о волнах. Именно солитонный характер многих биологических феноменов, по нашему мнению, препятствовал в прошлом пониманию многих аспектов живой материи.

Одной из отличительных черт живого является его заряженность движением, наличие форм постоянного движения или «зарядов движения» в нем. Недаром говорят, что «жизнь есть движение». Так, живую клетку всегда можно отличить от мертвой по этому признаку: практически во всех биологических тканях клетки непрерывно, хотя и медленно, движутся, или, по крайней мере меняют форму. Данное движение происходит, по крайней мере, зачастую без видимого нагрева телесной среды. При этом оно само вовсе не является тепловым, броуновским движением. Напротив, «броуновское движение в эукариотической клетке — признак ее гибели» (Фултон /1987, с. 6/).

В настоящей книге обращается внимание на то, что многие из биологических движений, в том числе локомоторных, имеют вид устойчивой одногорбой волны, распространяющейся вдоль тела с сохранением формы и скорости без видимого нагрева

среды (как давно принято считать, организм вообще отличается энергоэкономичным построением своей деятельности, способностью избегать ненужной диссипации собственной энергии). При этом имеются биологические примеры этих встречающихся одnogорбых волн, проходящих друг сквозь друга без итогового нарушения своей формы, как это характерно для солитонов. В данной связи автором книги впервые предлагается использовать солитоны в качестве естественной модели названных надмолекулярных биологических движений, наблюдаемых на самых разных линиях и уровнях биологической эволюции, в том числе у биообъектов, размеры которых отличаются по величине на несколько порядков.

Автор книги по существу следует примеру первооткрывателя солитонов Дж. Рассела, который наблюдал эту поразившую его одnogорбую волну с названными свойствами на поверхности водного канала. Предприняв аналогичное морфологическое наблюдение — но уже в области биологии — над макроскопическими биологическими движениями, автор с удивлением обнаружил в них изобилие подобных одnogорбых волн и связал данные биологические движения с солитонами. Солитоноподобные явления, наблюдаемые в живых организмах, названы им биосолитонами. Они связаны, в частности, с биологическими симметриями и их нарушениями. Полученные первоначальные результаты позволили приступить к систематическому изучению проявлений и роли биосолитонов в биологических телах и процессах. Оно составляет содержание новой научной области, кратко именуемой «солитонной биологией». Ее важной составной частью является представление о биологических доменах с биосолитонными доменными стенками, в связи с которым организм может интерпретироваться как многоуровневая полидоменная структура или суперсеть солитонных доменных стенок. Понятие солитона служит той ниточкой, потянув за которую можно распутать целый клубок взаимосвязанных биологических загадок.

В целом, настоящая книга посвящена изложению выдвигаемой автором концепции биосолитонов, согласно которой живой организм представляет собой многоуровневую колонию биосолитонов. В этих колониях проявляется присущая солитонам способность к специфическому взаимодействию и поведению, включающему притягивание и отталкивание, размножение, об-

разование устойчивых связей с нетривиальной пространственно-временной структуризацией и пр. Кроме того, в них проявляется способность солитонов — ассоциируемая со свойствами живого — устанавливать и поддерживать в системе особый устойчивый порядок в противовес тенденции к беспорядку («тепловой смерти»), рассматриваемой в термодинамике (см. параграф 6.4). Отметим еще, что одна из основных проблем биологии заключается в поддержании пространственной конфигурации тела при постоянном обновлении субстрата. Это биологическое свойство также находит аналогию в свойствах солитона как движущегося устойчивого энергетического образования, поддерживающего свою форму при постоянном обновлении своего состава (см. параграф 5.2).

Согласно излагаемой концепции, говорящей об особой энергетической природе системообразования живого, биосолитоны выступают в качестве универсальной формы коллективного поведения живого вещества и активных участников биологической самоорганизации и жизнедеятельности. А само живое вещество является весьма специальной нелинейной — биосолитонной — средой, в которой при соответствующем подведении энергии самоорганизуются (автолокализуются и пр.) взаимодействующие друг с другом биосолитоны и саморазвиваются их энергетические колонии недиссипативного характера. Эти энергетические колонии способствуют, в частности, наращиванию самой данной среды в ходе трансформации поступающей извне пищи и энергии в новые массы живого вещества.

Важно, что солитонные среды по существу являются ловушками поступающей извне энергии возбуждения, преобразующими ее в недиссипативные солитонные виды физической энергии (работающие в организме в гармонии с его химическими видами энергии — см. параграф 6.2). Подобно тому, как поступление энергии в водную систему способно вызвать наделенную устойчивой формой солитонную волну Рассела, так поступление солитонобразующей энергии в биосолитонную среду способно породить в ней соответствующую морфологию и специфические движения.

В свете этой излагаемой в книге авторской концепции биологическая морфология и физиология организмов во многом определяются морфологией и жизнедеятельностью ансамблей автолокализирующихся взаимодействующих недиссипативных энер-

гетических объектов, устойчивых и наделенных формой, — биосолитонов. Предлагается энергетический подход к пониманию жизни как солитонной формы существования энергии в биосолитонных средах или, короче, жизни как формы существования солитонной энергии.

Излагаемая концепция биосолитонов основана на легко наблюдаемых и существенно надмолекулярных биологических явлениях солитонного типа. Она не противоречит и не зависит, а мирно сосуществует с давно известными гипотезами о возможности биологических «молекулярных солитонов», то есть солитонов в биологических цепевидных молекулах. Подтверждение существования таких гипотетических молекулярных солитонов (в отличие от описываемых нами надмолекулярных биосолитонов) является большой проблемой вследствие трудностей их наблюдения в условиях живого организма. Эти гипотезы и ориентированные на них математические модели молекул приведены в работах многих авторов. Прежде всего, это «молекулярные давыдовские солитоны», представление о которых разрабатывалось А.С. Давыдовым с 1973 года и которым посвящена глава 9 нашей книги.

XXI век многие называют веком биологии, ожидая особого прогресса теоретических и прикладных знаний в этой области. Излагаемые в книге идеи солитонной биологии призваны активно служить данному прогрессу. Уже сейчас имеется серия полезных выходов этих идей в медицину, сельское хозяйство, ряд отраслей промышленности и др.

Книга ориентирована на широкий круг читателей, интересующихся проблемами теоретической и математической биологии или новыми приложениями теории солитонов. Все выделения по тексту сделаны автором. Главы 1, 3, 9 носят обзорный характер, помогая биологам и другим читателям познакомиться с теорией солитонов и ее известными приложениями, прежде всего, в физике кристаллов. В других главах используется много известных биологических фактов для выявления их связей с теорией солитонов и демонстрации перспективности развития солитонной биологии.

Глава 1

ИСТОРИЯ И СВОЙСТВА СОЛИТОНОВ

«Солитон сам по себе является драматически новой концепцией в нелинейной теории. В нем, наконец, на классическом уровне реализуется объект, существование которого специалисты по теории поля постулировали многие годы: локально бегущий волновой импульс, компактная когерентная структура, удивительно устойчивое решение полевого уравнения и частицеподобные свойства» (Ньюэлл /1989, с. 12/). «Изучение солитона как устойчивого частицеподобного состояния нелинейных систем настолько захватило воображение физиков и математиков всех направлений, что его без преувеличения можно считать одной из немногих междисциплинарных тем современной математической физики» (Додд и др. /1988, с. 7/).

Первое научное наблюдение и описание солитонов произошло в 1834 г., когда английский инженер-кораблестроитель Джон Скотт Рассел увидел поразившее его явление одnogорбой волны, распространявшейся по водному каналу с необычайно длительным сохранением своей формы и скорости.

Вот что он сам писал: «Это самое прекрасное и необычайное явление; день, когда я впервые увидел его, был лучшим днем моей жизни. Никому никогда не посчастливилось наблюдать его раньше, или, во всяком случае, понять, что оно значит. Теперь оно известно как уединенная волна трансляции. Никто прежде и вообразить не мог, что уединенная волна возможна. Когда я описал ее сэру Джону Гершелю, он сказал: «Это просто вырезанная половина обычной волны». Но это не так, поскольку обычные волны идут отчасти выше, а отчасти ниже поверхности воды; кроме того, ее форма совсем иная. Это не половина волны, а, несомненно, вся волна целиком, с тем отличием, что волна как целое не находится попеременно то ниже, то выше поверхности, а всегда выше ее. Этого вполне достаточно, чтобы такой холм воды не стоял на месте, а двигался» (Буллаф и др. /1983, с. 5/).

Конкретнее, Рассел наблюдал следующее: «Я следил за движением баржи, которую быстро тянула по узкому каналу пара лошадей, когда баржа неожиданно остановилась; но масса воды, которую баржа привела в движение, не остановилась. Вместо этого она собралась около носа судна в состоянии бешеного движе-

ния, затем неожиданно оставила его позади, катясь вперед с огромной скоростью и принимая форму большого одиночного возвышения, т.е. округлого, гладкого и четко выраженного водяного холма, который продолжал свой путь вдоль канала, нисколько не меняя своей формы и не снижая скорости. Я последовал за ним верхом, и когда я нагнал его, он по-прежнему катился вперед со скоростью приблизительно восемь или девять миль в час, сохраняя свой первоначальный профиль возвышения длиной около тридцати футов и высотой от фута до фута с половиной. Его высота постепенно уменьшалась, и после одной или двух миль погоны я потерял его в изгибах канала» (Буллаф и др. /1983, с. 12/).

Эта описанная и длительно изучавшаяся Расселом уединенная волна представляет собой один из видов того, что ныне именуется солитонами. Пример ее формы приведен на рис. 1.1. При изучении таких волн Рассел также отметил их важную особенность: две таких волны после столкновения друг с другом полностью сохраняют форму и скорость движения. Кроме того, скорость такой волны зависит от ее амплитуды (напомним, что для линейных волн скорость всегда независима от амплитуды).

В 1895 г. Кортевег и де Фриз вывели математическое уравнение, наиболее точно описывающее основные эффекты, наблюдавшиеся Расселом. Потребовалось еще 70 лет, чтобы уравнение Кортевега–де Фриза (кратко называемое КдФ–уравнением) сыграло большую роль во втором рождении солитона в наше время.

В 1955 г. Ферми, Улам и Паста опубликовали работу по компьютерному расчету колебаний в сравнительно простой нелинейной системе в виде цепочки из нескольких десятков грузиков, связанных нелинейными пружинками. Специфика поведения такой нелинейной системы, выявившаяся в результате компьютер-

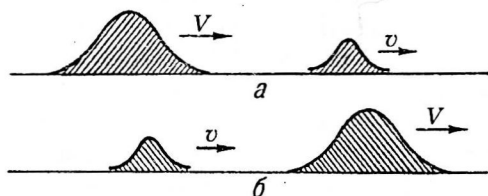


Рис. 1.1

Форма уединенных волн разной амплитуды на поверхности воды и их столкновение: *а* — до столкновения, *б* — после столкновения; V , v — большая и малая скорости соответственно.

ного расчета и выразившаяся в периодически повторяющемся перераспределении колебательной энергии между несколькими низшими модами возбужденной системы, настолько удивила Энрико Ферми, что он даже будучи смертельно больным, интересовался продолжением расчетов и говорил, что это одна из самых важных задач, с которыми он когда-либо встречался (подробнее историю этого см., например, у Ньюэлла /1989, с. 26–28/, Филиппова /1990, с. 210–215/). В частности, здесь со всей наглядностью проявилась способность энергии в некоторых средах автолокализовываться в устойчивые ансамбли со сложными периодическими формами поведения на чисто механических принципах совершенно независимо от химического состава этой среды, конфигурации грузиков или пружин и всего остального, что не имеет отношения к коэффициентам соответствующего солитонного уравнения. Простейшая чисто механическая среда — грузики, скрепленные пружинками — уже оказывается достаточной для возникновения и далеко нетривиального функционирования на ней устойчивого ансамбля энергетических объектов — солитонов (при условии обеспечения простых характеристик нелинейности Ферми–Паста–Улама). И эта простейшая механическая система *оказалась способной противостоять тенденции к беспорядку*: вместо ожидаемого от нее распределения колебательной энергии между всеми модами колебаний возбужденной системы и быстрого перехода к обычному равновесному состоянию с максимальной энтропией, она повела себя совершенно неожиданно, демонстрируя приверженность специфическому порядку.

Продолжив анализ проблемы и цепочки Ферми–Паста–Улама, Крускал и Забуски вышли в итоге на уравнение Кортевега–де Фриза и уединенную волну, наблюдавшуюся Расселом. Последовавшее математическое изучение свойств взаимодействия уединенных волн как решений КдФ–уравнения выявило во всей полноте их необычный, частицеподобный характер. Солитоны, сближаясь, влияют друг на друга, т.к. в нелинейной среде не выполняется принцип суперпозиции. Тем не менее, после взаимодействия солитоны не разрушаются, а расходятся с сохранением прежних параметров формы и скорости, как если бы столкнулись и разлетелись частицы. Например, если такая высокая солитонная волна, движущаяся с более высокой скоростью, догоняет низкую волну, то в момент соприкосновения большая волна замедляется и уменьшается, а малая, наоборот, ускоряется и растет. Когда малая

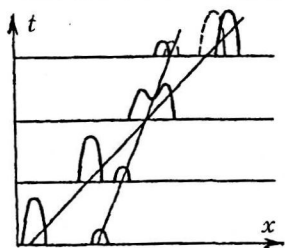


Рис. 1.2

При взаимодействии солитонов происходит сдвиг их расположения относительно того места, в котором они находились бы при отсутствии всякого взаимодействия; положения невзаимодействующих равномерно движущихся солитонов изображены штриховыми линиями (по Филиппову /1990/).

вырастает до размера большой, а большая соответственно уменьшается, то волны отрываются друг от друга, и далее бывшая малая уходит вперед, а бывшая большая отстает. Как видно из рис. 1.2 (из книги Филиппова /1990/), после такого взаимодействия большая волна как бы «сдвигается» вперед, т.е. уходит немного дальше того положения, которое она занимала бы, если бы никакого взаимодействия не было, а малая, наоборот, отстает, «сдвигается» назад (положения невзаимодействующих равномерно движущихся волн изображены на рисунке штриховыми линиями). Таким образом, при этой интерпретации волны вовсе не проходят друг через друга; по итоговому результату они как бы сталкиваются и отталкиваются друг от друга подобно теннисным мячам. Аналогия с теннисными мячами позволяет понять и только что описанный «сдвиг» уединенных волн при столкновении (подробнее, смотри, например, у Филиппова /1990, с. 51/). Это свойство фазового сдвига у таких волн при их столкновении долго не замечалось, отчасти потому, что все считали уединенную волну только волной, хотя и довольно необычной.

В какой-то степени в этом повинно было и название «уединенная волна», подчеркивающее волновую природу явления. Поэтому, когда в 1965 г. Крускал и Забуски, изучая явления столкновений уединенных волн с помощью электронной вычислительной машины, ясно увидели, что уединенные волны во многом подобны частицам, они немедленно убрали слово «волна», а из «уединенной» (solitary) составили термин «солитон» (soliton), созвучный электрону, протону и другим названиям элементарных частиц. В силу поразительной устойчивости солитонов их иногда называют также «волновыми атомами». В общем, под частицеподобностью солитонов понимается их способность либо упруго отталкиваться друг от друга, либо проходить друг через друга с сохранением формы и скорости (Додд и др. /1988, с. 48/).

В частности, подобно частицам, солитон нельзя распределить по всему пространству: будучи рожденным как автолокализованный энергетический объект, способный двигаться от точки к точке, он может в реальных системах под действием диссипативных факторов типа трения погаснуть, но при этом он все равно не размажется по пространству, а до конца будет оставаться локализованным. При этом солитоны могут взаимодействовать друг с другом: притягиваться и отталкиваться, порождать новые солитоны, образовывать устойчивые пары и пр.

Со временем стало ясно, что солитон — не частица и не волна. Солитон — это солитон, новый объект физического мира (подробнее об этом смотри, например, у Филиппова /1990, с. 169/). Однако многие солитоны рождаются «из волн» и наследуют некоторые свойства волн. Для понимания многих свойств солитонов помнить об их волновом происхождении не только полезно, но порой и необходимо. С другой стороны, солитоны движутся и сталкиваются как частицы, но частицы очень необычные. Например, дислокация Френкеля–Конторовой в кристалле, которая представляет собой солитон (см. Главу 3), имеет конечный размер, но ее нельзя разбить на меньшие части, она неделима.

Для сравнения напомним, что обычные волны обладают свойством дисперсии, т.е. скорость их распространения зависит от частоты волны. Поэтому, например, пакеты, составленные из набора волн различной длины, со временем расплываются, поскольку каждая волна в них движется со своей скоростью. Солитоны не избавлены от дисперсии, но она строго компенсируется в них эффектом нелинейности, а потому солитон устойчив во времени.

В математику и физику солитонов неоценимый вклад внесли многие отечественные ученые, что широко признано мировым научным сообществом. В библиографии к данной небольшой книге приведены лишь некоторые из их замечательных работ.

Для более близкого знакомства со свойствами солитонов в условиях физического эксперимента в разное время предлагались лабораторные физические модели нелинейных систем, способных генерировать — при соответствующем локальном возбуждении — распространяющиеся по ним солитоны.

Scott /1969/ предложил механическую модель для генерации и наблюдения солитонов. Этот генератор солитонов, изображенный на рис. 1.3, представляет собой механическую линию передачи в виде последовательности расположенных на натяну-

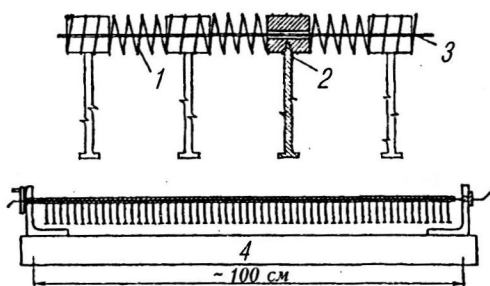


Рис. 1.3

Конструкция механической линии передач, на которой Скотт исследовал различные типы солитонов в виде групповых отклонений маятников, бегущих по цепи: 1 — пружина, 2 — маятник, 3 — струна, 4 — основа (по Скотт /1977/)

той фортепьянной струне маятников. При должном возбуждении в этой системе по цепи маятников бегут солитоны в виде группировок соседних маятников, одновременно отклоненных из начального положения равновесия; набор конкретных маятников в каждой группировке обновляется по мере продвижения солитона по цепи, но характерная длина солитона (т.е. число маятников, не находящихся в исходном положении равновесия) остается неизменной, если только солитон не затормаживается действием диссипативных сил типа трения.

На этом своем приборе Scott наблюдал столкновения солитона с солитоном и антисолитоном (отличающимся в этом случае от солитона противоположным направлением отклонения маятников), зависимость размера солитона от скорости и др. Данная механическая система моделирует конкретное солитонное уравнение, известное под названием уравнения синус-Гордона (1.3). Оно инвариантно относительно замены переменных (x, t) в соответствии с преобразованием Лоренца, широко известным по специальной теории относительности, и в этой связи Scott непосредственно наблюдал в этой системе эффекты лоренцевых преобразований (рис. 1.4).

Дабы не отпугивать биологов «тяжелой» математикой, в настоящей книге мы будем избегать по возможности сложных ма-



Рис. 1.4

Стробоскопическая фотография бегущего по цепи слева направо импульса в форме отклонения соседних маятников, затормаживаемого силами трения. Эта фотография иллюстрирует лоренцеву трансформацию данного импульса (по Скотт /1969/)

тематических формализмов. Желая поближе познакомиться с ними могут обратиться ко многим имеющимся книгам по солитонам, часть из которых приведена в библиографии. Здесь же упомянем лишь, что после работы Крускала и Забуски история солитонов оказалась тесно связанной с историей трех нелинейных эволюционных уравнений:

— уравнения КдФ: $U_t - 6UU_x + U_{xxx} = 0$ (1.1)

— нелинейного уравнения Шредингера (НУШ):

$$iU_t + U_{xx} + 2\gamma U|U|^2 = 0 \quad (1.2)$$

— уравнения синус-Гордона (СГ-уравнения):

$$U_{xx} - U_{tt} = \sin U \quad (1.3)$$

Каждое из этих дифференциальных уравнений в частных производных (которые обозначены здесь индексами при U) имеет на сегодня множество приложений в физике. Так, уравнение КдФ описывает магнитозвуковые и ионнозвуковые волны в плазме, акустические волны в кристаллах, поверхностные и внутренние волны в океане. (В двумерном случае уравнение КдФ переходит в уравнение Кадомцева-Петвиашвили, которое обладает для этого случая такой же степенью универсальности). НУШ возникает при исследовании широкого класса нелинейных явлений в физике плазмы, нелинейной оптике и пр. СГ-уравнение описывает дислокации в кристаллах, вращательные фазовые переходы в молекулярных кристаллах, движение блоховских границ в ферромагнетиках, движение директора нематического жидкого кристалла в магнитном поле, самоиндуцированную прозрачность, джозефсоновские линии передачи, поведение волн зарядовой плотности, взаимодействие элементарных частиц, фазовые переходы соизмеримость-несоизмеримость, суперионные проводники, поверхностные эпитаксиальные структуры и т.д.

Еще в 1938 г. Френкель и Конторова опубликовали работу, в которой вывели и использовали СГ-уравнение применительно к описанию дислокаций в кристалле. С развитием теории солитонов эти дислокации Френкеля-Конторовой стали одним из ярких примеров «настоящих» солитонов и получили по имени данных авторов название ФК-солитонов. Эти солитоны СГ-уравнения обладают особо поразительной устойчивостью, почти «нетленностью» даже по сравнению с другими солитонами, например, солитоном Рассела или солитонами НУШ. Под действием небольшого трения ФК-солитон лишь замедляется и, в конце концов, останавливается. Остановившись, он может жить «веч-

но». Например, дислокация будет существовать, пока существует и не изменяется кристалл. Эта особая устойчивость имеет топологическую природу, по причине чего ФК-солитон называют топологическим солитоном (подробнее смотри, например, у Филиппова /1990, с. 232–235/). Решения СГ-уравнения дают появление и разрушение солитонов парами «солитон-антисолитон» (отличие между ними — в направлении вращения или в разрежении-уплотнении, в зависимости от привязки к моделируемой физической ситуации).

Корепин и Фаддеев /1975/ показали, что в рассматриваемой ими ситуации в приближении слабого взаимодействия солитоны СГ-уравнения сильно взаимодействуют и обладают квантовым числом, которое может быть истолковано как заряд; при этом солитоны с одинаковым зарядом отталкиваются, а с различным зарядом притягиваются. Благодаря подобным свойствам, солитоны СГ-уравнения активно используются в теории элементарных частиц. По первым результатам изучения биосолитонов именно солитоны СГ-уравнения представляются нам сегодня важными персонажами во множестве солитоноподобных явлений живой материи (что не исключает участия других видов солитонов в биологической самоорганизации). Поэтому СГ-уравнению в нашей книге посвящен отдельный параграф в главе 3.

Уравнения с солитонными решениями являются примерами бесконечномерных полностью интегрируемых гамильтоновых систем. Солитонное уравнение обладает бесконечным числом законов сохранения и ассоциированными симметриями. Многие уравнения, полученные при асимптотических условиях разрешимости, при общих предположениях оказываются солитонными. Солитонные уравнения имеют многосолитонные решения. Солитонное уравнение должно допускать решение, представляющее собой нелинейную суперпозицию N уединенных волн при произвольном N . При выполнении некоторых, так называемых резонансных, условий в результате взаимодействия солитонов может возникать новый солитон.

На сегодня в математической физике известно уже множество различных видов солитонов: кинки, бризеры («дышащие» или вибрирующие солитоны), бумероны и траписны (солитоны с причудливыми траекториями), и их число все растет. Известно также, что отдельные солитоны могут взаимодействовать друг с другом в форме взаимного притягивания или отталкивания, об-

разовывать устойчивые пары и т.п., поэтому общепринято говорить о «солитонах» и «антисолитонах», «кинках» и «антикинках» и т.д. Например, бризер представляет собой связанное состояние кинка и антикинка, и сам является солитоном; внешнее возмущение может приводить к его распаду либо, наоборот, образованию. Солитоны играют важную роль элементарных возбуждений в термодинамике протяженных систем. В эволюционных системах солитоны являются основным типом нелинейных возбуждений, в терминах которых наиболее естественно и адекватно дается описание их основных динамических и термодинамических свойств. Наряду с наиболее изученными на сегодня солитонами в одномерных системах или средах известны солитоны двухмерные, трехмерные, цилиндрические, сферические и т.п., исследование многих из которых только начинается.

Для описания и анализа реальных систем на основе применения идеализированных солитонных уравнений в последние обычно дополнительно вводятся различные возмущения типа факторов трения, не позволяющие ограничиться рассмотрением полностью интегрируемых систем. При этом под солитоном в применении к реальным системам нередко понимается любое автолокализованное возбуждение, распространяющееся без существенного изменения своей формы и скорости вследствие баланса между нелинейностью и дисперсией (Давыдов /1988, с. 15/).

Теория солитонов и их приложений в физике является бурно развивающейся областью науки, а потому многое в ней еще только достраивается, проясняется и уточняется. Это касается даже самого понятия «солитон». Ситуацию применения понятия «солитон» к реальным системам хорошо освещают Калоджеро и Дегасперис /1985, с. 158/: «Пуристы настаивают на употреблении термина солитон только в тех случаях, когда происходят упругие столкновения... Решения же типа $u(x,t) = f(x - vt)$ с асимптотически убывающей функцией $f(z)$ [$f(\pm\infty)=0$] пуристы называют уединенными волнами; класс нелинейных эволюционных уравнений, допускающих такие решения, содержит в себе класс уравнений, обладающих солитонами (и он даже намного шире его, что бы это ни означало). Однако пуристы в меньшинстве, и термином солитон пользуются теперь весьма широко в применении к уединенным волнам (особенно специалисты по физике элементарных частиц). Может быть, это достойно сожаления, но тем не менее это факт, о котором мы счита-

ем своим долгом предупредить читателя, чтобы его не вводили в заблуждения названия, если не содержание, большого количества публикуемых теперь статей».

В недавно выпшедшей «Энциклопедии математической физики» /1998, с. 553/ солитон определяется как «уединенная волна (локализованное решение нелинейного эволюционного уравнения), которая при взаимодействии с другими локальными возмущениями всегда восстанавливает свою первоначальную форму, то есть взаимодействует упругим образом (подобно частицам)». Поскольку солитоны распространяются без диссипации своей энергии, то их движение по среде происходит без ее разогрева.

Еще раз отметим, что в отличие от обычных волн, представляющих собой периодическое повторение в пространстве возвышений и впадин на поверхности воды, или уплотнений и разрежений плотности, или отклонений от средних значений других физических величин, солитоны имеют вид «однополярных» или куполообразных возвышений (уплотнений и т.п.), распространяющихся как единое целое с некоторой скоростью. Солитоны, являющиеся нелинейными образованиями, столь же фундаментальны, как квазичастицы линейных теорий (фононы, экситоны, магноны и др.); они дают важную информацию о свойствах соответствующих сред и играют большую роль в энергетических процессах, в явлениях переноса энергии, заряда и структурных переходах. Образование нелинейных волн в непрерывной среде, описываемой нелинейными уравнениями, связано со спонтанным нарушением локальной симметрии однородной системы, т.е. с автолокализацией энергии возбуждения, плотности электрического заряда или других физических величин. Однажды возникнув, солитон распространяется без потерь, не требуя подпитки энергией и не нагревая среду.

Рис. 1.5 дополнительно поясняет один из вариантов локального нарушения симметрии (в данном случае трансляционной симметрии) при прохождении солитона по метамерной или цикломерной структуре. В данном случае речь идет о локальном растяжении в трансляционно-сим-

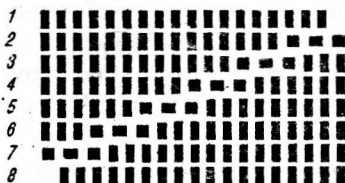


Рис. 1.5

Локальное нарушение трансляционной симметрии метамерной цепи (1,8), пробегающее по ней (2–7) с сохранением своих скорости и формы (числа эзеньев, участвующих в локальном растяжении цепи)

метричной цепи повторяющихся звеньев (или блоков, метамеров, цикломеров и т.п.), распространяющемся вдоль цепи с постоянной скоростью и сохранением своей «формы», т.е. сохранением числа звеньев, отклоненных из исходного положения. Отметим, что в результате продвижения такого солитона вся цепь оказывается смещенной относительно своего начального положения, т.е. имеет место перенос массы цепи. При этом цепь в целом сдвигается на сравнительно небольшое расстояние по сравнению с тем, какое пробегает по ней данный солитон. Эти наглядные детали будут нам полезны в дальнейшем.

Напомним, что в биологии повторяющиеся звенья, подобные рассмотренным, называются также цикломерами, морфологическими блоками, мотивными единицами и пр., а цепи из них — цикломериями, биосимметрическими последовательностями и пр. Могут ли по таким биологическим цикломериям в естественных условиях жизнедеятельности организма пробегать солитоны? Этот вопрос будет освещен в последующих главах.

В главе 3 будет продолжен обзор известных данных о солитонах из области кристаллографии. А сейчас перейдем к анализу локомоторных движений живых организмов с солитонной точки зрения.

Глава 2

ЛОКОМОЦИИ И БИОСОЛИТОНЫ

Локомоциями в биологии называется разновидность движений организмов, обеспечивающая их активное перемещение в пространстве, например, ползание, ходьба, плавание и т.п. При изложении в этой главе результатов поиска и обнаружения солитоноподобных локомоторных процессов мы будем стараться пользоваться готовыми фактологическими данными многих ученых-биомехаников. Ими детально регистрировались и анализировались особенности локомоций живых организмов, но они никогда не связывали эти особенности со столь специфическим объектом современной математической физики как солитоны. Особенно мы будем опираться на классическую и наиболее полную по фактическим данным монографию кембриджского про-

фессора Грея «Локомоции животных» /1968/, посвятившего свою жизнь этой области знаний и являющегося в ней признанным авторитетом. Через всю его монографию, как и через работы многих цитируемых в ней ученых (Lissmann, Parker и др.) проходит аргументированная множеством фактов мысль о том, что локомоции самых разных животных организмов имеют удивительную общность в виде постоянно повторяющихся кинематических картин волнообразного движения. Наборы «походок», как правило, имеющиеся у каждого вида животных организмов и аналогичные у представителей самых разных биологических классов, дополнительно подтверждают эту общность.

2.1. Биосолитоны в локомоциях улитки и червеобразных организмов

На рис. 2.1.1 представлен заимствованный из книги Gray /1968/ рисунок локомоции улитки *Helix* (класс брюхоногих — *Gastropoda*). Речь идет о случае «быстрой походки», при котором улитка движется с образованием легко наблюдаемых волновых арок, продвигающихся по телу с сохранением своей формы и скорости. При этом виде локомоции улитка при своем движении вперед отрывает переднюю часть тела от опорной поверхности и, вытянув ее вперед, опускает затем передний конец на опору, оставляя растянутую часть тела висящей в воздухе с образованием телесной арки АВ. Эта арка, называемая биологами «ретроградной» волной (т.е. обратной направлению движения тела), движется вдоль тела назад в виде *одногогорбой волны постоянной формы и скорости*. Вслед за ней может образоваться подобная ей вторая арка ВС локального растяжения тела с такими же свойствами движения вдоль тела. Мы отмечаем очевидную аналогию этих волновых образований с солитонами и рассматриваем их как первый пример локомоторных биосолитонов (т.е. солитонов биологической локомоции).

Отметим, что в результате такой локомоции на опорной поверхности остается дорожка регулярных дискретных следов движения улитки, оставляемых ее слизью на поверхности в местах контакта. Это означает, что бегущие друг за другом по телу улитки локомоторные биосолитоны обеспечивают такой ее массоперенос, при котором возникающий зональный контакт улитки с непод-

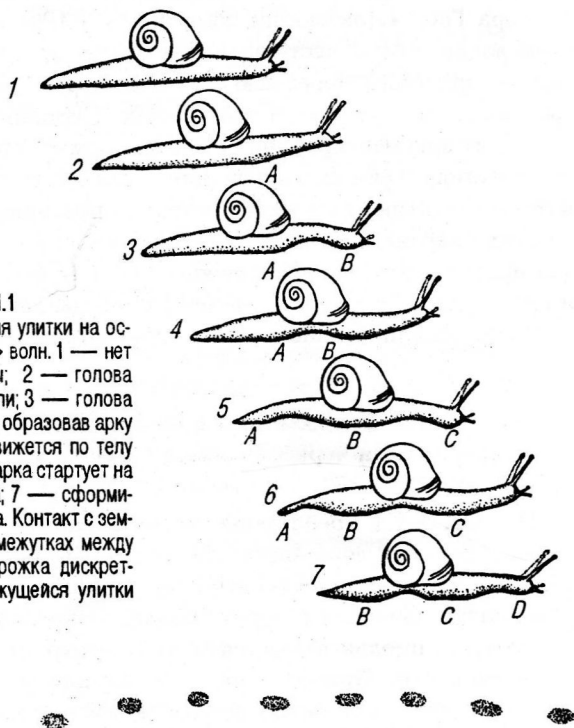


Рис. 2.1.1

Быстрая локомоция улитки на основе «ретроградных» волн. 1 — нет ретроградной волны; 2 — голова приподнялась от земли; 3 — голова опустилась на землю, образовав арку АВ; 4 — арка АВ движется по телу назад; 5 — вторая арка стартует на переднем конце тела; 6 — сформировалась третья арка. Контакт с землей только в промежутках между арками. Внизу дорожка дискретных следов так движущейся улитки (по Gray /1968/)

вижным участком опоры имеет постоянно обновляемый телесный состав со стороны улитки: каждый момент времени часть тела улитки выходит из состава зонального контакта, а другая часть тела входит в него. В результате все точки нижнего слоя подошвы улитки проходят через каждый такой неподвижный контактный участок опорной поверхности, не касаясь ее в промежутках, и масса ее тела оказывается волнообразно перемещенной подобно тому, как это уже рассматривалось выше в связи с рис. 1.5.

Та же улитка может перемещаться существенно другой «походкой», при которой по ее подошве проходят иные, более мелкие одnogорбые волны, сохраняющие свою форму и скорость. Эти волны называют прямыми («direct waves»), поскольку они идут по ходу перемещения тела и, начинаясь на заднем конце подошвы, продвигаются к передней части тела. В отличие от ретроградных прямые волны представляют собой волны локального сжатия тела.

На рис. 2.1.2 показан вид сбоку на прохождение такой одноробой волны по телу улитки, взятый из работы Lissmann /1945, рис. 6 а/ (он же воспроизведен у Gray /1968, с. 428/). Рисунок представляет восемь последовательных фаз (1-8) прохождения по телу волны локального сжатия, сопровождающегося отрывом сокращаемого участка тела от опорной поверхности. Длина черной маркерной полоски, меняющаяся от фазы к фазе, соответствует длине некоторого исходного элемента F тела в соответствующей фазе и позволяет следить за характерными локальными изменениями тела. Фаза 1 представляет последовательные элементы тела В-Г в расслабленном состоянии с исходной длиной, размещенные на участке ХУ опоры. Когда локомоторная волна достигает элемента тела, обозначенного черной полосой, его задний конец начинает сокращаться и одновременно отрываться от опорной поверхности (фаза 2). Сокращение элемента продолжает нарастать и одновременно он продвигается вперед с нарастающей скоростью (фазы 2-4). Максимальное сокращение выделенной длины осуществляется в отношении 3:1.

При наступлении локального расслабления выделенный элемент F начинает удлиняться, замедляться и опускаться до тех пор, пока не разместится неподвижно на опорной поверхности в исходном по длине состоянии (фазы 4-7). На каждой фазе в состав волны входит ровно пять элементов (например, на фазе 4 это элементы H-D). В проекции на опорную поверхность длина волны равна YZ. В результате прохождения этой волны каждый элемент, например, F сдвигается на шаг $XU = XZ - YZ$, равный величине суммарного сокращения пяти элементов тела (в проекции на опорную поверхность), вовлеченных в состав волны на каждой фазе. Скорость перемещения улитки равна произведению длины одного шага ХУ на частоту следования волн.



Рис. 2.1.2

Обычная локомоция улитки на основе «прямых волн». Вверху — вид снизу на подошву улитки, по которой бегут эти мелкие волны, обозначенные темными поперечными полосками; внизу — фазы прохождения по телу такой прямой волны локального сжатия при виде тела сбоку (из Lissman /1945/)

Итак, мы имеем здесь еще один выразительный пример локомоторного биосолитона в виде одногорбой волны, перемещающейся с сохранением формы и скорости. В книге Gray /1968, с. 428/ отмечается, что аналогичная локомоторная волна сокращений наблюдается и у других организмов, например, у полихет (многощетинковые черви).

Интересно узнать, как два рассмотренных типа биосолитонных волн — ретроградный и прямой — взаимодействуют друг с другом при их возможном одновременном встречном прохождении по телу улитки? Ответ на это давно известен и изложен в той же книге Gray /1968, с. 432/ со ссылкой на работы Parker, который «акцентированно подчеркнул тот факт, что *присутствие больших ретроградных волн не влияет на распространение нормальных и много более коротких прямых волн*; *оба типа волн распространялись без какого-либо признака взаимного вмешательства (mutual interference)*».

Следовательно, для рассматриваемых прямых и ретроградных волн имеют место неразрушающие взаимодействия, характерные для солитонов, или, другими словами, наблюдается характерное свойство солитонов сохранять свою индивидуальность (форму и скорость) в результате столкновения друг с другом. Это частичеподобное свойство сохранения индивидуальности у солитонов особенно важно для биологических объектов с их специфической особенностью параллельной реализации множества процессов, сохраняющих свою индивидуальность. Соответственно в живой материи солитонобразные явления реализуются чрезвычайно широко и даже, как мы покажем это в дальнейшем, являются для нее универсальной формой коллективного поведения. Подчеркнем, что при движении биосолитонов по разнообразным биологическим средам не наблюдается видимого нагрева этих сред, как то и должно быть при движении солитонов, происходящем без диссипации энергии.

Подчеркнем на рассмотренном примере улитки то, что организм для минимизации энергетических затрат при локомоциях решает две задачи. Во-первых, он минимизирует затраты своей энергии на преодоление сопротивления среды (в данном случае за счет поднятия деформирующихся участков тела улитки над субстратом и устранения тем самым потерь на трение о субстрат). Во-вторых, он минимизирует потери на прохождение волны массопереноса по своему телу за счет использования именно солитонной волны, способной двигаться без диссипации своей

энергии (в идеальном случае). Нижеприводимые примеры локомоций других организмов свидетельствуют о том, что эти две задачи решают, видимо, все организмы, причем первую из них, касающуюся внешней среды, они решают по-своему, а вторую — одинаково в смысле использования именно солитонной волны того или иного типа.

Gray и цитируемые им авторы отмечают, что аналогичные представленным на рис. 2.1.1 одnogорбые («арочные») волны ретроградного направления, сохраняющие свою форму и скорость и оставляющие на опорной поверхности сходную дорожку дискретных следов, имеют место также в локомоциях биообъектов, далеко отстоящих от брюхоногих. Примерами являются данные на рис. 2.1.3 локомоции немуртин *Rhynchodemus bilineatus* (тип червей), одноклеточных организмов *Amoeba proteus*, не имеющих мышц и осуществляющих немышечные локомоции (рис. 2.1.4), и даже представленных на рис. 2.1.5 изолированных фибробластов млекопитающих, движущихся по лабораторному стеклу. Во всех этих случаях «клетки продуцируют волны сокращений, бегущие назад по их поверхностям, а их контакт с опорой

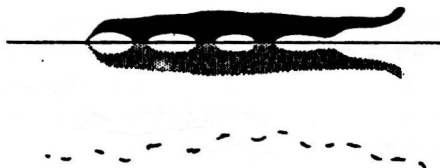


Рис. 2.1.3

Вид сбоку на передвигающуюся немуртину *Rhynchodemus bilineatus*. Внизу — дорожка ее дискретных следов (по Gray /1968/)



Рис. 2.1.4

Вид сбоку на локомоцию амёбы (по Фултон /1987/)



Рис. 2.1.5

Поперечное сечение фибробласта, движущегося по стеклянной поверхности (по Gray /1968/)

ограничен гребнями этих волн» (Gray /1968, с. 416–417/).

Затронув тему червей, напомним известную всем картину появления на асфальте после летнего дождя дождевых (земляных) червей, передвигающихся за счет волнообразных деформаций, бегущих по их метамерному телу и схожих с бегущими деформациями на рис. 1.5. Тело червей состоит из множества сегментов, число которых является строго определенным для каждого вида. При изложении известных данных об этих червях мы

будем использовать материалы из книги и докторской диссертации Давид /1990/. Основной и, видимо, самый простой вид локомоции дождевого червя (а он тоже имеет несколько видов походок) представляет собой изображенное на рис. 2.1.6 ползание на основе волн локальной деформации тела, приводящих к тому, что вытянутые участки его тела висят в воздухе и движутся относительно земли, а максимально утолщенные опираются о землю и неподвижны относительно нее (дополнительно цепляясь за землю специальными ориентированными щетинками для того, чтобы не быть оттянутыми назад очередной волной). Именно эта локальная зона контакта максимально укороченных сегментов червя с опорной поверхностью, бегущая вдоль тела с постоянной скоростью в виде устойчивой волны, является определяющей для данной локомоции и пристально изучалась исследователями.

Отмечая аналогию волнообразных локомоций улитки и дождевого червя, Gray /1968, с. 386/ демонстрирует это данными, воспроизводимыми нами на рис. 2.1.7. На нем представлена картина фаз перемещения вдоль тела червя названного локального участка контакта с сохранением формы и скорости. На этом рисунке показаны восемь сегментов тела А–Н в восьми фазах I–VIII сокращения. Арабскими цифрами 2–5 обозначены длины сегментов, меняющиеся от фазы к фазе. Соответственно обозначение, например, CVI2 означает, что сегмент С в фазе сокращения VI имеет минимальную длину, равную 2. Зарисованные точками

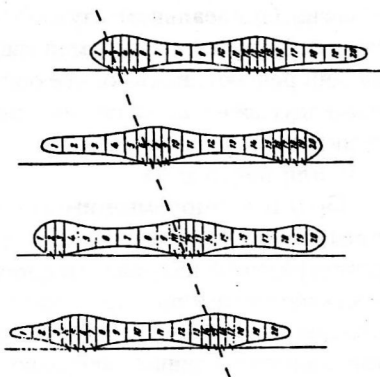


Рис. 2.1.6

Локомоторные волны, бегущие с сохранением формы и скорости по телу дождевого червя (из Беклемешева /1964/)

прямоугольники представляют собой сегменты, находящиеся в данной фазе в состоянии начала растяжения и приподнимании от опоры, а заштрихованные прямоугольники — сегменты, опускаемые на опору в связи с окончанием их сокращения.

Механизм, запускающий эти перистальтические волны, не связан с центральной нервной системой, поскольку полностью изолированные от нее отрезки кожно-мускульного мешка червя сохраняют способность к ничем не вызванным извне периодическим спонтанным сокращениям, по своему характеру мало чем отличающимся от таковых у фрагментов тела с интактной иннервацией. Интересно, что если червя перерезать на две половины и связать обе части (удаленные в эксперименте друг от друга на 1 см) нитью, смоченной в физиологическом растворе, то перистальтические волны передаются из головной половины в хвостовую с сохранением их нормальной координации вдоль всего биологически разъединенного тела червя за счет действия механических напряжений, передаваемых через нить. Это свидетельствует в пользу важной роли механических напряжений в самоорганизации биологических движений, отмечаемой по другим поводам многими авторами (см. обзор Регирера и Штейна /1985/). Данные факты вполне смыкаются с нашей концепцией биосолитонов в биологической самоорганизации, поскольку прохождение солитонов, нарушающих отношения локальной симметрии во взаиморасположении элементов среды, сопровождается возникновением механических напряжений. Здесь же можно отметить, что перистальтические волны, которые в свете нашей общей концепции предста-

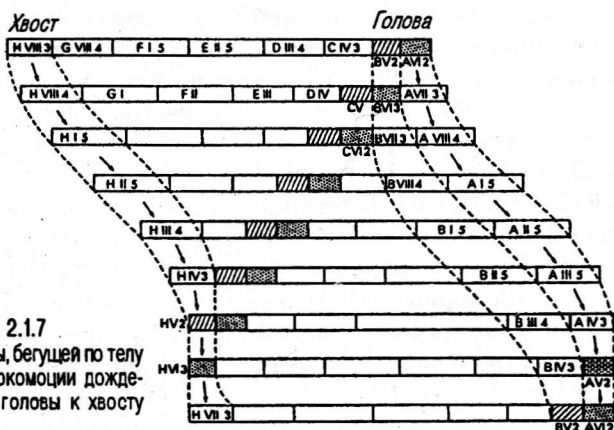


Рис. 2.17

График волны, бегущей по телу при обычной локомоции дождевого червя от головы к хвосту (Gray /1968/)

ют в качестве биосолитонов, характерны не только для локомоций, но и, как известно, для множества видов биологических движений иного назначения, например, для перегонки биологических жидкостей по сосудам, пищи по пищеводу и т.п. В разделе о жизнедеятельности нейронов нами будет рассмотрен одно из таких перистальтических движений с постоянными скоростью и одногорбой формой каждой волны, обеспечивающее метаболический ток вещества в аксонах. Живое вещество использует свои биосолитонные механизмы разнообразным способом на самых разных уровнях жизнедеятельности.

Грау отмечает, что наблюдаемый в подобных локомоторных опытах рефлекс растяжения у червя сравним с пассивным рефлексом на растяжение у других организмов, например, протракторных мышц конечности тритона или жабы. Более подробные материалы о взаимодействии рассматриваемых перистальтических волн с нервной системой и другими факторами возможного влияния имеются в книге Давида /1990/, из которой мы приведем еще следующие факты о других известных видах их «походок».

Дождевые черви могут двигаться не только вперед, но и назад, организуя аналогичные перистальтические волны, бегущие в этом случае от хвоста к голове. Если к головной части спокойно ползущего червя прикоснуться палочкой, то червь отдернет переднюю часть тела назад, придав ей змеевидную (синусоидоподобную) форму с изгибом в горизонтальной плоскости, демонстрируя тем самым свою способность легкой перестройки от прямолинейной формы к синусоидоподобной.

Однако, аналогичный изгиб тела у червя может происходить и в вертикальной плоскости. При необходимости быстрого движения, например, убегая от опасности, дождевые черви используют тип «арочной» локомоции, аналогичный вышерассмотренному случаю «высокоскоростной» локомоции улитки (см. рис. 2.1.1, 2.1.3, 2.1.4, 2.1.5). При этом «тело червя приобретает вид обычной синусоиды и в некоторых точках оно перестает касаться земли» (Давид /1990, с. 32/). Отметим, что этот переход от ранее рассмотренных перистальтических волн к другому, скоростному виду локомоторного биосолитона сопровождается фоновым изменением внутренней нелинейной среды червя: все кольцевые мышцы по всей длине тела оказываются одновременно и постоянно сокращенными. Видимо, подобное изменение параметров нелинейности биологической среды можно отследить также во мно-

жестве других случаев перехода от одного вида биосолитонов к другому. Названный «вертикально ундулирующий» вид локомоции червя связан с поочередными сокращениями то спинной, то брюшной ленты продольной мускулатуры червя на фоне указанного изменения по всему телу тонуса кольцевых мышц.

Говоря о локомоторных волнах в виде арок или горбов, следует напомнить также хорошо всем известное передвижение гусеницы, базирующееся на повторяющемся пробегании по ее телу характерной волны в виде горба — еще одного примера локомоторного биосолитона.

Wells /1961/ при изучении локомоции другого червеобразного организма — пескожила *Arenicola* — описывает лежащую в ее основе уже знакомую нам волну локального разбухания, бегущую с сохранением скорости и формы вдоль тела.

В книге Cray /1968/ содержится много других примеров локомоторных биосолитонов у червеобразных организмов. Кратко остановимся только на примере переходного типа — многощетинковых червях или полихетах, способных к локомоциям как на суше, так и в воде. По бокам каждого сегмента сегментированного тела полихет находятся особые выросты — параподии (от греческого «похожие на ноги»), покрытые множеством щетинок. Параподии служат этим червям органом движения.

Как указывает Gray /там же, с. 393–401/, локомоторные движения типичного полихетного червя, например, *Nereis diversicolor*, используют два различных механизма. Первый из них заключается в применении параподий в качестве рычагов для перемещения подобно ножкам у наземных членистоногих. Второй заключается в использовании волн локальной деформации самого сегментированного тела полихеты в связи с сокращениями его продольных мышц. При медленных перемещениях по твердой поверхности используется только первый — рычажный — механизм согласованного волнообразного движения мно-

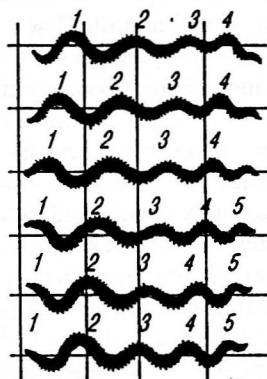


Рис. 2.1.8

Локомоторные волны в виде ундуляций продвигаются по телу плывущей полихеты, сохраняя свою форму и скорость (по Gray /1968/)

жества парapoдий. При более быстрых движениях и при плавании в воде работают оба механизма: к волновым движениям парapoдий согласованно подключаются волны локальной деформации самого тела, проявляющиеся в его ундуляциях, т.е. квазисинусоидальных (или змеевидных) изгибаниях. Эти ундуляции отличаются от вышерассмотренных квазисинусоидальных вертикальных изгибаний дождевого червя, убегающего от опасности, тем, что происходят не в вертикальной плоскости относительно земли, а в горизонтальной. При установившейся быстрой локомоции обе эти волны бегут от хвоста к голове полихеты. На рис. 2.1.8 показано, как эти ундуляционные волны продвигаются по телу плывущей полихеты, сохраняя свою форму и скорость. Хирургическое удаление нескольких соседних парapoдий не влияет на распространение локомоторных волн движения парapoдий или телесных ундуляций: картина кинематики полихеты-инвалида такова же, как у нормальной полихеты.

Локомоторные волны у полихеты при ее плавании в воде и быстром ползании на суше идентичны с тем лишь отличием, что амплитуда, длина и частота волны ундуляции при плавании значительно увеличены. В книге Gray /1968/ наглядно показано, как у полихеты происходит смена характеристик ундуляционных волн при переходе от суши к воде.

2.2. Биосолитоны в локомоциях многоножек

Тело многоножек, как и только что рассмотренных полихет, состоит из головы и длинного сегментированного туловища (число сегментов — до 170 и более). На каждом или почти каждом сегменте расположены ноги, которые служат органом движения. Аналогично локомоциям червей, локомоторная волна вдоль тела многоножек обладает высокой устойчивостью и относительной независимостью от многих внешних и внутренних влияний. Например, когда многоножка преодолевает зону разрыва между двумя стеклянными пластинками, по которым она проходит в эксперименте, то большая группа ее ног, зависающая без опоры над разрывом, как бы не чувствует этого и продолжает волнообразное движение в составе общей локомоторной волны смещения ног вдоль всего тела, сохраняющей свою форму и скорость (Gray /1968, фото 7).

На рис. 2.2.1 из книги Gray /1968, с. 366/ представлены примеры (а-г) локомоции многоножки *Scolopendra cingulata* с возрастающей от «а» к «г» скоростью передвижения. При ходьбе эта многоножка ставит каждую свою очередную ногу почти в след предыдущей сразу после того, как эта предыдущая поднимается и освобождает точку опоры. Соответственно, по длинному ряду ее ног бежит волна определяющей локомоцию опорной фазы. Характеристики этой опорной фазы зависят от скорости локомоции. На рисунке эта опорная фаза выделена тем, что жирными линиями показаны те ноги, которые в данный момент находятся в

контакте с землей, движутся назад вдоль тела и выполняют функцию отталкивания от опоры. Ноги, переносимые вперед без контакта с опорой, прорисованы тонкими линиями. Места опоры ног о землю отмечены черными точками. Видно, что с ростом скорости локомоции число точек опоры о землю у многоножки существенно уменьшается; кроме того, у ее тела, начиная с походки «б», появляются боковые ундуляции, увеличивающиеся с ростом этой скорости (аналогичное появление и увеличение боковых ундуляций с ростом скорости локомоции уже описывалось выше — у полихет). Отметим, что у некоторых многоножек аналогичные ундуляция тела при локомоции происходят не в горизонтальной, а в вертикальной плоскости (при этом участки максимального поднятия туловища над опорой происходят в местах переноса конечностей) подобно тому, как это рассматривалось выше на примере «арочной» ходьбы червей и пр.

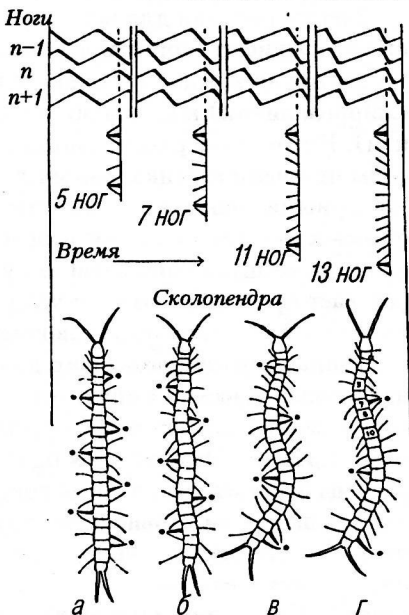


Рис. 2.2.1

Локомоция многоножки *Scolopendra cingulata* с возрастающей от а к г скоростью передвижения (Gray /1968, с. 366/)

Вверху рисунка для четырех последовательных ног показаны зависящие от скорости локомоции соотношения между фазами движения каждой ноги на стадии ее опоры с отталкиванием (жирные линии) и на стадии переноса ноги вперед (тонкие линии). Ниже, непосредственно над телами многоножек представлены прямыми вертикальными линиями расстояния между этими черными точками с указанием числа ног на данном отрезке: от «а» к «г» это число ног возрастает — 5, 7, 11, 13. Другими словами, солитоноподобный импульс опорной фазы локомоции успевает пробежать по телу увеличенную дистанцию (большее число ног) при скоростной локомоции.

Данная картина волнового движения ног многоножки очень напоминает рассмотренную в главе 1 солитонную кинематику групп маятников в механической линии передачи Скотта (рис. 1.3, 1.4). Это является одной из многих причин, по которым мы полагаем, что данные локомоторные биосолитоны связаны с солитонным уравнением синус-Гордона (1.3), которое является релятивистски инвариантным, т.е. сохраняющимся при лоренцевом преобразовании переменных, как это разобрано в главе 1. Коль скоро поведение солитона в механической линии передачи Скотта в зависимости от скорости его движения определяется именно релятивистскими преобразованиями Лоренца, то естественно полагать, что и в случае многоножки мы имеем аналогичную релятивистскую зависимость, но только в биологической системе. С точки зрения важности проникновения в биологию физико-математических представлений и интеграции многих отдельных данных о значимости неевклидовой геометрии для биологических пространств (см. обзор этих данных, например, в книгах Петухова /1981, 1988/), эта релятивистская зависимость представляется очень интересной.

В виде короткого отступления отметим интересные работы по «Локомоторной теории относительности» Смолянинова /1984, 1987/, из которых приведем в этом абзаце ряд цитат. В этих работах предпринимается попытка понять экспериментальные данные о ходьбе человека и некоторых ходящих высокоорганизованных животных на основе обращения к особым свойствам мозга, имеющего «карты тела» и предположительно способного генерировать некие «эталонные волны нейрофизиологической природы» /1987, с. 99/, а также на основе гипотезы о том, что «в распределенных средах мозга формируется некоторая линейная

копия (образ) внешней пространственно-временной, целевой траектории» /1987, с. 98/. «Алгоритм построения целевой траектории (движения) реализуется в распределенных структурах мозга посредством использования волновых процессов нервной природы... Конечные значения скоростей распространения сигналов по нервным волокнам обуславливают релятивистскую хроногеометрию управляющих процессов мозга, т.е. релятивизм в данном случае имеет инструментально-измерительную природу» /1987, с. 101/. Говоря о «нейрофизиологическом релятивизме», Смолянинов заключает, что «по свойствам унидирекциональности, анизотропии и ангармоничности эталонных волн локомоторная хроногеометрия отличается от физического аналога специальной теории относительности. Из-за этих необычных свойств, пространственно-временные диаграммы локомоторной теории относительности строятся иначе, чем в специальной теории относительности» /1987, с. 99/. Соответственно, для модельного объяснения особенностей ходьбы он использует не преобразования Лоренца, а некоторые приемы процедурного моделирования с опорой на свойства нервных сигналов /1987, с. 101/.

Мы убеждены в том, что глубоко изучаемые Смоляниновым и многими биомеханиками (в связи с актуальными задачами физиологии, медицины и эргономики) особенности ходьбы человека и других ходящих ногами организмов вполне могут быть содержательно и в едином строю со множеством иных биологических явлений объяснены и промоделированы с новой, предлагаемой нами, биосолитонной точки зрения, в том числе в связи с релятивистски инвариантным солитонным уравнением синус-Гордона. При этом нет необходимости сводить проблему организации ходьбы к деятельности такого слабо изученного органа как мозг, тем более что во многом аналогичные локомоторные биосолитоны имеют место не только у ходящих высокоорганизованных животных, но также у низкоорганизованных животных, растений, простейших организмов (см. рис. 2.1.4, 2.4.2) и даже у изолированных препаратов типа полоски кожно-мышечного мешка дождевого червя или фибробластов млекопитающих (рис. 2.1.5). Весь наш опыт изучения неевклидовых биосимметрий и применения неевклидовых геометрий для изучения явлений самоорганизации живой материи, результаты которого публикуются нами с 1975 г., свидетельствует об адекватности биосолитонной концепции широкому кругу явлений биологической самоорганизации.

При этом возникает существенное отличие в самом подходе к биологической регуляции. Обычно теории биологической регуляции строятся на идее *внешнего* управления элементами. Так, специфика ходьбы определяется тем, что ею управляет нервная система и мозг. Концепция биосолитонов в физиологии смещает центр внимания на *внутренние* способности биологической среды к кооперированному закономерному функционированию, которые многое определяют — в том числе в нервной системе — и во многом независимы от внешних условий и воздействий (хотя, конечно, мозг может при необходимости вмешиваться в деятельность биологической среды и увязывать ее с текущими особенностями внешнего мира).

2.3. Биосолитоны в локомоциях змей и рыб

Змеи, как и другие животные организмы, обладают целым набором «походок». Продолжая/рассматривать волны растяжения или сжатия тела при его локомоциях, обратимся в этом разделе о змеях сначала к относительно редкому виду их локомоции — так называемому прямолинейному движению. Этот вид сравнительно медленной локомоции наблюдается, например, у питонов и гадюк и осуществляется обычно при подкрадывании к жертве или при движении по ровной поверхности. Все используемые в данном разделе фактологические материалы о змеях заимствованы нами из работ Gray /1968, с. 182–186/ и Lissmann /1950/, в том числе рис. 2.3.1, на котором представлена прямолинейная локомоция питона *Boa occidentalis*.

Эта локомоция осуществляется за счет бегущих от головы назад локально деформирующих волн в нижней, брюшной части тела питона с участием расположенных там мышц. Верхняя, спинная часть тела при этом не испытывает заметных деформаций. На рис. 2.3.1 показаны семь фаз локомоции с наглядным выделением отдельных элементов А–D на брюшной стороне, которые участвуют в составе волн локальной деформации, обеспечивающих массоперенос тела. Состояниям относительного сжатия или растяжения тела соответствуют определенные виды зарисованных прямоугольников. В фазе 1 первый элемент А находится в состоянии минимальной длины (прямоугольник покрыт густой сеткой) и неподвижен относительно земли. Следующий эле-

мент В еще только укорачивается, а элемент С имеет максимальную удлинённость. Элемент D, замыкающий этот волновой цикл, находится в стадии удлинения. В каждой последующей фазе (2–7) эти прямоугольники последовательно смещаются вдоль тела, обозначая соответствующую волну локальной деформации, бегущую с сохранением формы и скорости. Соответственно она является одним из примеров локомоторных биосолитонов.

В книге Gray /1968, с. 183/ отмечается, что эта пропульсивная кинематика прямолинейной локомоции змеи «фундаментально такова же, как пропульсивная кинематика земляного червя».

Более известным и характерным для змей является другой, «змееобразный» или ундуляционный способ передвижения. Он заключается в начинающихся от головы и шеи изгибаниях тела, причем на протяжении всего движения змеи «каждая часть тела и хвоста змеи точно следует пути, проложенному головой и шеей так, что змея кажется изящно текущей среди травы и кустарников подобно реке в ее узком изгибающемся ложе» (Gray /1968, с. 166/). В частности, если змея движется таким образом по песку, то в нем передней частью тела продавливается узкое русло, по которому продвигается вся остальная его часть. Другими словами, по телу змеи проходят солитоноподобные волны локальной деформации с сохранением их начальной формы и скорости. (Мы предполагаем, что в данном случае для описания серии таких волн может быть использовано известное в нелинейной динамике представление о взаимосвязанных солитонах уравнения синус-Гордона).

Аналогичная ундуляционная локомоция применяется на суше и на воде многими другими организмами, в том числе простейшими, беспозвоночными и пр. (Gray /1968, с. 166/). Так, на рис. 2.3.2 представлен ползущий беспозвоночный *Naemophus contortus*, причем Gray снова подчеркивает, что волны локальных изгибных деформаций тела сохраняют свою форму и скорость при передвижении по телу так, что каждая волна оказывается неподвижной относительно земли.

Обратимся теперь к рыбам, которые используют для плавания два метода: а) ундуляции хвостовой части их тела; б) движения плавников.

Тело рыбы в отличие от вышерассмотренных тел червей, змей и других организмов с ундуляционными локомоциями, имеет следующую особенность. Если взять в руки спящую или мерт-

вую рыбу и попробовать изогнуть ее на разных участках, то легко ощутить, что передняя утолщенная часть ее тела существенно более скована и трудно изгибаема, чем подвижная хвостовая часть. Видимо, поэтому ундуляции тела плывущей рыбы, бегущие в виде квазисинусоидальной волны от головы к хвосту, имеют ту особенность, что их амплитуда обычно заметно больше именно в хвостовой части. На механической линии передачи Скотта, рассмотренной в главе 1, это можно сопоставить со случаем, когда на некотором участке данной линии маятники имеют дополнительные ограничения по их отклонению из положения равновесия, а потому бегущий по такой цепи солитон на данном участке характеризуется уменьшенной амплитудой их отклонения. Аналогичного мнения на возрастающую к хвосту гибкость тела рыбы, как на причину возрастания амплитуды ундуляции, придерживается также Грау, который дополнительно формулирует идею пассивного проведения по ее телу некоторой локально возникшей волны: «Весь ассортимент движений рыб демонстрирует их замечательное подобие поведению эластичных пластин или прутков соответствующей длины и гибкости при их осцилляции под водой пассивно из стороны в сторону под действием внешней отклоняющей пары сил, приложенной к одному концу... Подобие в картинах изгибных волн, которые могут быть переданы пассивно по эластичному пруту или пластине, и волн, которые проходят по телу рыбы, является чем-то большим, чем интересной аналогией» (Gray / 1968, с. 24–25/).

Говоря об ундуляциях биотел, следует отметить, что зачастую эти ундуляции имеют не плоский, двухмерный, а усложненный, трехмерный характер, при котором хвостовая часть тела изгибается не просто из стороны в сторону, а описывает своими точками пространственные спиральные траектории. Такие ундуляции наблюдаются не только у многих рыб, но и у плывущих сперматозоидов и пр. Мы полагаем, что эти ундуляции связаны с известными спиральными волнами солитонного уравнения синус–Гордона.

Второй механизм локомоции рыб использует движение плавников, в которых нами также отмечается реализация биосолитонов. Приведем примеры этого. На рис. 2.3.3 представлены фотографии характерного движения плавника у *Xenomystus nigri* из работы Hertel / 1967/. Видно, как вдоль плавниковой каймы, расположенной с брюшной стороны тела рыбы, бежит холмообразная деформация. Вид этого холма над общей поверхностью

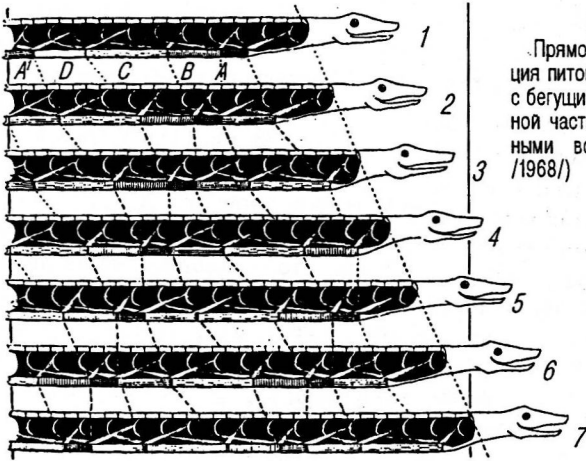


Рис. 2.3.1

Прямолинейная локомоция питона *Boa occidentalis* с бегущими назад по брюшной части тела локомоторными волнами (по Gray /1968/)

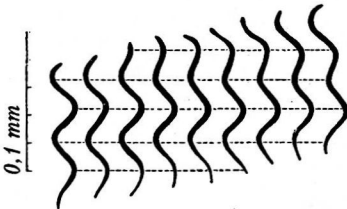


Рис. 2.3.2

Ползущий беспозвоночный *Naemonechus contortus*. Волны локальных изгибных деформаций его тела сохраняют свою форму и скорость при передвижении по телу так, что каждая волна оказывается неподвижной относительно земли (по Gray /1968/)

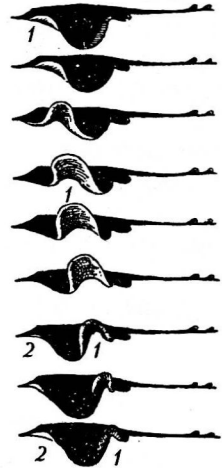


Рис. 2.3.4

Локомоторный «холм», бегущий с постоянной скоростью по плавнику плывущего ската. Изображены две последовательные локомоторные волны 1 и 2 (из Гессе /1912/)

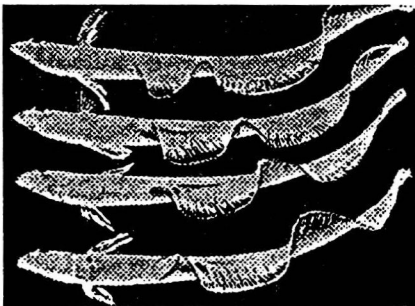


Рис. 2.3.3

Локомоторный «холм», бегущий по плавнику плывущей рыбы *Xenomystus nigri* (по Hertel /1967/)

плавника рыбы воспроизводит картину уединенной волны Рассела, наблюдавшейся им в виде такого же движущегося холма над общей поверхностью воды. (Аналогичным образом устроен плавник совершенно другого, нерыбного организма — сперматозоида жабы (Газарян, Белоусов /1983, рис. 16/), что служит одним из примеров морфогенетических параллелизмов в живой природе). Похожий пример волнообразного локомоторного движения спинного плавника у рыбы *Gymnarchus niloticus* приводит Lissmann /1961/, отмечая, что с помощью таких движений этого плавника рыба может плыть не только вперед, но и назад. На рис. 2.3.4 из работы Гессе /1912/ показаны моментальные снимки локомоторных движений плавника у ската в виде аналогичной односторонней волны, бегущей вдоль плавника с постоянной скоростью. Заметим, что размер плавника ската не одинаков вдоль тела: возле головы ската он совсем небольшой, но затем плавно увеличивается, достигая наибольшей величины примерно к своей середине и вновь уменьшаясь по направлению к хвосту. Соответственно, одна и та же угловая деформация такого плавника, бегущая вдоль него, вызывает разные абсолютные деформации на разных его участках: в его центральной части, где вследствие увеличенного размера плавника возможности для пассивной деформации больше, та же самая волна сильнее деформирует плавник, а потому на изображенных на рисунке видах ската сбоку волна деформации на средних снимках предстает увеличенной в размерах.

2.4. Биосолитоны в немышечных двигательных системах

Одной из многих загадок биологии издавна является то, что кинематика локомоций и активных движений в немышечных двигательных системах оказывается такой же, как в мышечных. Выше мы уже отмечали это на примерах амёб и фибробластов млекопитающих (рис. 2.1.4, 2.1.5).

Немышечные двигательные системы включают волновые движения частей растений, ресничек простейших и мерцательного эпителия животных, жгутиков сперматозоидов и бактериальных клеток, протоплазмы животных и растительных клеток, хромосом

в процессах клеточного деления и многое другое. Сначала мы рассмотрим в качестве одного из многих примеров ресничное и жгутиковое движение, относящееся к наиболее распространенным формам немышечной биологической подвижности. Оно свойственно одноклеточным простейшим, сперматозоидам низших и высших организмов, клеткам мерцательного эпителия многоклеточных животных и издавна привлекало внимание исследователей. Хотя со времени обнаружения жгутиков и ресничек прошло уже более 300 лет и их изучению посвящена обширная литература, «до сих пор остаются невыясненными механохимические, регуляторные, координирующие и, наконец, молекулярные механизмы, лежащие в основе ритмического биения ресничек и волнообразного движения жгутиков» (из обзорной книги «Немышечные двигательные системы» Поглазов, Бурнашева /1989, с. 90/).

На рис. 2.4.1 изображены типовые солитоноподобные движения отдельных жгутиков и ресничек (в фазе возвратного движения); эти картины движения воспроизведены нами по работе Sleight из книги Поглазова и Бурнашевой /1989, с. 92/, книге Каппуччинелли /1982/ и статье Blake и Sleight /1975/. Жгути-



Рис. 2.4.1

Движения отдельных ундулоподий. Слева — распространение локомоторных волн постоянной формы и скорости по жгутику сперматозоида в случае его плоских ундуляций (по Каппуччинелли /1982/). В центре — спиральное движение жгутика в пространстве. Справа — реснички в фазе возвратного движения (по Blake и Sleight)



Рис. 2.4.2

Локомоторные волны биения множества ресничек, двигающиеся вдоль ресничного ряда (по Fawcett /1961/)

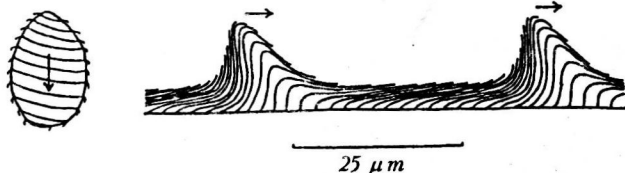


Рис. 2.4.3

Локомоторные волны согласованной — по всему телу и по отдельным рядам ресничек — деформации множества ресничек *Opalina ranarum* (по Blake, Sleight /1975, с. 193/)

ки, которые обычно во много раз (в 10 раз и более) длиннее ресничек, совершают волнообразные движения как в одной плоскости, так и в пространстве. Случай плоского движения, в котором по жгутику бегут волны с сохранением формы и скорости, подобен вышерассмотренным ундуляционным движениям у змей и пр. Поскольку локомоторные биосолитоны возникают с довольно большой частотой (20–30 раз в секунду), то вдоль жгутика в норме бежит более чем одна волна, и он выглядит многократно изогнутым в плоскости этих ундуляций (рис. 2.4.1, верхний). В пространственном случае движения жгутика ограничены цилиндрической поверхностью и его кончик описывает кривую, близкую к окружности (винтовое или спиральное движение). Эти волнообразные движения обычно распространяются вдоль всей длины жгутика в направлении от основания к вершине.

У ресничек в представленной фазе возвратного движения реализуется пропускание по телу одногорбой изгибной волны постоянной формы и скорости, в результате чего ресничка возвращается в исходное состояние, предшествующее фазе эффективного удара по окружающей ее жидкой среде, во время которой она движется в противоположную сторону в распрямленном состоянии подобно вытянутому маятнику. У отдельного организма множество ресничек образует локомоторную волну для целенаправленного перемещения организма (рис. 2.4.2). «Реснички работают ритмично, строго координировано, и весь ресничный аппарат инфузорий действует как *одно целое*» (Поглазов, Бурнашева / 1989, с. 92 /).

На рис. 2.4.3 представлены такие бегущие солитоноподобные волны согласованной — по всему телу и по отдельным рядам ресничек — деформации множества ресничек *Opalina ranarum* из работы Blake и Sleight / 1975, с. 193 /. Этот организм имеет листовидную форму и длину в несколько сотен микрон. Реснички, длина каждой из которых составляет примерно 15 мк, расположены в ряды, которые отстоят друг от друга примерно на 3 мк с расстоянием между соседними ресничками в каждом ряду в $1/3$ мк. Частота волнообразных движений каждой реснички оставляет около 5 Гц. Эти волны, длиной в 30–50 мк каждая, пробегают по телу со скоростью от 100 до 200 мк/сек, а все тело при этом перемещается со скоростью порядка 50 мк/сек. По этим данным легко оценить, что на поверхности тела этого организма расположены тысячи ресничек, которые работают столь согласованно, что составляют «одно целое». Утрата отдельных ресничек или даже

целых их групп, например, осуществленная по воле экспериментатора, не прекращает эти метакрональные волны, которые свободно проходят через участки, утратившие реснички.

Если по середине тела инфузории *Spirostomum ambiguum*, также имеющей богатую систему ресничек, сделать глубокие надрезы, то целостная деятельность этой системы не нарушится. Это говорит об известном факте, что регуляция системы ресничек осуществляется через эктоплазму. Разрезание этой инфузории на 10–15 частей различной величины показывает, что даже небольшие участки ее тела (равные одной двадцатой части тела) способны к движению и координированной деятельности ресниц (Серавин/1967, с. 158–162/). Обратимся теперь к тому, как координируется деятельность ресничек у совокупности таких телесных фрагментов.

Если поместить эту же инфузорию или парамецию в специальный раствор, то ее движение сильно замедляется, и в темном поле микроскопа можно хорошо видеть метакрональные волны биения ресниц. Они регулярно, через правильные промежутки времени возникают на заднем конце инфузории и двигаются к переднему. Следовательно, регулирующие влияния, координирующие деятельность ресниц, возникают у интактного простейшего в определенном месте, а не на любом участке тела. Если теперь переднюю часть перерезанной пополам инфузории также поместить в соответствующий раствор, то можно видеть, что координация ее ресничек осуществляется с помощью импульсов, которые опять возникают на заднем конце ее ополовиненного тела, как и у неповрежденной инфузории. Аналогичные опыты показали, что при изоляции любого участка тела инфузории спироостомум из состава тела именно его задний конец берет на себя функцию координации биения ресниц. Это говорит о том, что интеграция деятельности ресничек осуществляется на основе принципа ведущего центра, расположенного на заднем конце тела и подчиняющего себе менее энергичные центры, расположенные впереди. То, что в задней части тела инфузории находится самый активный и устойчивый, т.е. ведущий регуляторный участок подтверждается опытами с воздействием на нее наркотиков и ядов: в ходе данных опытов метакрональные волны постепенно все более перестают доходить до переднего конца инфузории, сменяясь там беспорядочным биением ресничек. Приводя эти данные, Серавин/1967, с. 159–162/ связывает их с существованием градиентов физио-

логической активности и отмечает аналогию с сердечной тканью. Эта ткань также располагает ведущим центром, который задает единый ритм для многих участков сердца, каждый из которых может не только пульсировать самостоятельно в условиях независимости, но и, если более энергичные участки устраняются, выступать в роли ведущего для всех оставшихся участков.

Например, в опытах с поперечными срезами на «безнервном» сердце виноградной улитки было показано, что никакого жестко определенного центра автоматической деятельности у него нет и каждый участок этого сердца способен к автономным автоматическим сокращениям. Однако реже всего сокращаются предсердия, несколько чаще — изолированное основание желудочка и наиболее высоким ритмом обладает верхушка желудочка, т.е. имеется градиент автоматической деятельности, падающий от аортального конца сердца к венозному. Градиент этот носит чисто функциональный характер, ибо обнаружить морфологические различия в строении мышцы различных участков не удастся. Ритм деятельности целого сердца определяется самой активной частью сердца, которую называют ведущей частью. По ходу нашей книги мы не раз вернемся к обсуждению этих замечательных биологических феноменов коллективного поведения живой материи, не объясняемого регуляцией со стороны нервной системы и т.п. В частности, будет рассмотрен важный вид солитонов — бризер, представляющий собой «дышащий» или «пульсирующий» солитон, который, по нашему мнению, имеет прямое отношение к множеству явлений биологической ритмики. (Действительно, если одни виды солитонов адекватно описывают волнообразные движения в биообъектах, то почему другой, «пульсирующий» вид солитонов, имеющий с первыми теснейшие связи и взаимопереходы и образующий с ними «одно солитонное целое», отрывать от соответствующих биологических явлений ритмического характера?).

Одной из объединяющих черт живой материи является, как известно, существование у всех биоорганизмов универсального энергетического аккумулятора в виде АТФ (аденозинтрифосфат). Под действием специальных ферментов у АТФ концевые фосфатные группы отщепляются с освобождением энергии, которая идет на самые разные процессы жизнедеятельности от синтеза белков до локомоций. Поэтому возникновение различных биосолитонов как энергетических возбуждений связано с переходом энергии от АТФ в биосреду. В этой связи интересно, что присут-

ствие АТФ «оживляет» мертвые двигательные системы (Серавин /1967; 1977, с. 126/). Так, мертвые модели инфузорий и жгутиконосцев при реактивации в присутствии АТФ начинают плавать, как живые. Биологические модели ресничек и жгутиков под влиянием АТФ осуществляют ритмическую волнообразную деятельность, близкую к нормальной, т.е. характерную для живых органоидов. Мертвая поперечно-полосатая мышца, лишенная благодаря глицеринизации основных клеточных компонентов, в присутствии АТФ сокращается точно так же, как живая. Это свидетельствует в пользу того, что поступления от АТФ энергии в биосреду (даже имеющую настолько большие потери и нарушения, что она признается мертвой) достаточно для образования и движения биосолитонов и что биосолитоны являются феноменом самоорганизации энергии в биосредах. Подчеркнем, что в данных мертвых моделях мембраны клеток были разрушены, а потому не мембраны являются определяющими в этой солитонообразной деятельности. По многим данным, морфологическая интеграция одноклеточного организма осуществляется через эндоплазму.

На моделях жгутиков, приготовленных по стандартной методике на основе умерщвления жгутиконосцев специальным экстрагирующим раствором и помещенных затем в раствор с АТФ, волны биения всегда возникают в основании модели жгутика и распространяются к его верхушке. Жгутик, отрезанный от так цитологизированного простейшего, под влиянием АТФ возобновляет свою деятельность. Волны изгибания опять возникают у его основания и распространяются к дистальному концу. Если теперь этот жгутик разрезать поперек на две равные части или даже на четыре, то биение сохраняется у каждого фрагмента, и у каждого из них волны возникают в более широкой проксимальной части, откуда они распространяются к суженной, верхушечной области (Серавин /1967, с. 91–92/).

Интересны факты интеграции многих отдельных организмов, реализующей единую систему локомоторных волн, аналогичных тем, которые наблюдаются у ресничек. Например, «жгутиконосец *Mixotricha paradoxa* плавает благодаря тому, что на его теле имеется большое число спирохет, которые прикреплены правильными рядами. Производя регулярные ритмические изгибания тела, эти микроорганизмы осуществляют необходимую для движения жгутиконосца механическую работу. В деятельности спирохет наблюдается метакхронизм, столь характерный для ресничек

ной системы инфузорий», хотя спирохеты не принадлежат клетке жгутиконосца и просто образуют симбиоз с ней. При этом «каждая спирохета посажена на специальный бугорок тела жгутиконосца. К бугоркам подходят пучки фибрилл, которые в совокупности образуют единую эктоплазматическую систему, аналогичную субпелликулярной сети фибрилл, найденной ранее у инфузорий. Одна аналогия — функциональная — повлекла другую — морфологическую» (Серавин /1967, с. 149–150/).

Остановимся еще на важном вопросе об остановке движущихся биосолитонов и возобновлении их движения, способностью к которым обладают живые тела. Действительно, движущиеся локомоторные биосолитоны у змей, многоножек и многих других организмов зачастую могут самим организмом при внезапной остановке его локомоции — например, в ситуации опасности, требующей резко замереть на месте — обездвиживаться как на стоп-кадре. Несомненно, что такие перестройки характеристик биосолитонов связаны с дополнительными энергетическими процессами, вмешивающимися, например, по сигналам от нервной системы, в уже имеющееся движение биосолитона. Подобные стоп-кадры кинематики локомоторных биосолитонов наблюдаются у жгутиков и ресничек простейших организмов, которые обездвиживаются, например, под действием ядов или экстрагирующих растворов в эксперименте. При этом так приобретаемая статичная форма жгутика или реснички зачастую имеет весьма прочную механическую фиксацию: например, попытки с помощью иглы микроманипулятора изменить форму обездвиженного жгутика у биологической модели одноклеточного организма *Peranema trichophorum*, убитого в эксперименте экстрагирующим раствором, ни к чему не приводят. Насильно вытянутый или, напротив, насильно изогнутый жгутик сразу же после удаления иглы принимает первоначальную форму. Однако стоит поместить таких умерщвленных перанем в специальный раствор с АТФ, «как жгутики моментально переходят к ритмической волнообразной деятельности. Из любого состояния сократительные элементы фибрилл аксонемы могут выйти только активным путем (используя энергию АТФ)» (Серавин /1967, с. 91/).

Опираясь на эти и другие факты, мы считаем в связи с общими проблемами биоморфологии, что весьма часто, если не всегда, статичные формы биологических объектов представляют собой стоп-кадры движущихся биосолитонов или (чаще) их ансамб-

лей. Другими словами, с этой точки зрения биологическая морфология (статичных форм) представляет собой науку об относительно обездвиженных (или «сидячих») биосолитонах. К этому мы вернемся позже в главе о морфогенезе.

Опишем здесь строение обсуждаемых нами жгутиков и ресничек подробнее, поскольку по ходу книги мы встретимся с их фундаментальными аналогами в разделе о совсем иной, нелокомоторной функции — биологической рецепторике, которая базируется на этих аналогах в виде так называемых киноцилий. Многие исследователи, например, Фрей-Висслинг и Мюллетагер /1968, с. 402–407/ объединяют жгутики и реснички под названием ундулоподии (от латинского «унда» — волна). Они также отмечают, что ундулоподии имеют цилиндрический стержень диаметром около 0,2 мкм и всегда состоят из 11 белковых микрофибрилл, девять из которых окружают пару микрофибрилл, находящихся в центре (рис. 2.4.4). Эта схема стандартного взаимного расположения микрофибрилл в биологии обычно обозначается как схема «9+2»; мы также будем использовать данное обозначение. На данном рисунке, взятом из книги Каппуччинелли /1982/, хорошо видна совершенно нетривиальная конструкция жгутика.

Уже давно установлено, что все жгутиковидные образования, начиная от жгутиков простейших и кончая сперматозоидами млекопитающих, построены по одной и той же фибриллярной схеме «9+2». Все девять периферически расположенных микрофибрилл двойные (имеют по две микротрубочки), тогда как центральные микротрубочки не имеют двойного строения, но заключены, по-видимому, в общий футляр, обладающий спираль-

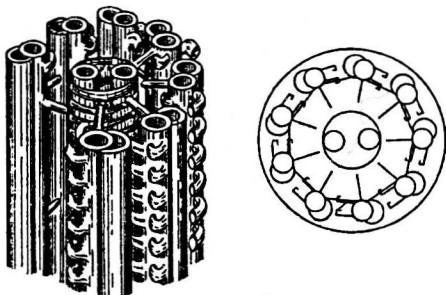


Рис. 2.4.4

Схематическое изображение жгутика со строением «9+2» в его средней части. Слева — две периферические микрофибриллы удалены для удобства демонстрации внутреннего строения (из Каппуччинелли /1982/)

ной текстурой. Периферические микротрубочки состоят из регулярных последовательностей сферических субъединиц, т.е. представляют собой один из примеров цикломерных биоструктур. Все эти микротрубочки схемы «9+2» берут начало в так называемом базальном тельце, имеющем цилиндрическую форму и расположенном в основной части тела клетки.

Обратимся теперь к амебоидному движению (рис. 2.1.4), которое многие исследователи считают самой примитивной, а потому и самой простой формой клеточного движения, и которому посвящено множество научных трудов. Будучи чрезвычайно широко распространенным в живой природе, оно встречается у представителей класса саркодовых, у многих зооспор, сперматозоидов, плазмодиев миксомицетов, яиц кишечнополостных и других животных (если только они искусственно освобождены от прочной оболочки), диссоциированных клеток губок, изолированных фагоцитобластов бескишечных червей, клеток эмбрионов позвоночных, фибробластов и лейкоцитов, эпителиальных и нервных клеток в тканевых культурах (Серавин, 1967, с. 232). Перемещение амебоидных организмов и клеток осуществляется без помощи постоянных органелл движения. Псевдоподии, или ложноножки, большей частью формируются в тот момент, когда начинается движение амёбы, и исчезают, когда оно прекращается.

Показательный пример легкого биологического превращения амебоидного образа тела и движения в жгутиковый образ, демонстрирующий принадлежность этих двух образов к единой морфодинамической системе, дает простейший одноклеточный организм *Naegleria gruberi*. Перемещаясь по поверхности субстрата этот организм имеет амебоидную форму и движение, но, попав в подходящую жидкую среду он превращается в свободно плавающую клетку, имеющую вытянутую обтекаемую форму и снабженную жгутиками с обычной для ундулоподий схемой строения «9+2». «Это превращение регулируется простыми физиологическими факторами и может происходить в популяции клеток синхронно» (Фултон /1987, с. 68/).

На рис. 2.4.5 из работы Ambrose /1961/, наряду со знакомыми биосолитонными волнами согласованного биения множества ресничек у простейшего организма *Colpidia*, показан пример локомоции нитевидной водоросли («filamentous algae»). Этот весьма специфический организм состоит из вытянутых клеток, соединенных своими концами в единую нить. Между соседними клет-

ками имеются перегородки, а потому движения протоплазмы осуществляются внутри каждой такой клетки без перехода в соседнюю клетку. Но вдоль всего нитевидного тела этой водоросли может бежать локомоторный биосолитон амебоидного типа, обеспечивающая ее локомоцию как единого организма (рис. 2.4.5, 2). Видимо, механических напряжений и деформаций, возникающих в местах стыковки его соседних клеток, оказывается достаточно для беспрепятственного прохождения данного волнообразного возбуждения вдоль всего тела подобно тому, как это имеет место в ранее описанном примере с перерезанным червем, половины которого соединены ниткой.

Локомоторные биосолитоны могут быть очень малыми по размеру. Об этом свидетельствуют локомоции фибробластов, представленные на рис. 2.4.6 из работы Ambrose /1961/. Этот автор изучал движения фибробластов сердца цыпленка, осуществляемые, как показано на рисунке, с помощью веерообразных подвижных выступов типа псевдоподий у амёб. При исследовании динамики этих выступов он обнаружил, что по ним бегут характерные одногорбые складки (холмы), форма которых изображена им на рисунке отдельно. Эти бегущие микрохолмы, расположение которых на «псевдоподии» фибробласта помечено черными полосками, обеспечивают перемещение распластанного по стеклу фибробласта. Данные фибробласты могут соединяться друг с другом в нитевидный комплекс, который способен перемещаться как единое целое с участием таких бегущих по нему микрохолмов-биосолитонов. Этот пример демонстрирует, что не всегда локомоторный (и вообще моторный) биосолитон сопоставим по размерам с телом, движение которого он обеспечивает. Иногда биосолитоны могут иметь относительно микроскопические размеры и быть как бы разбросанными

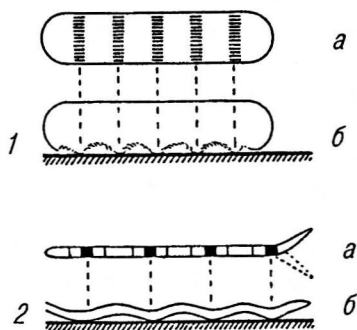


Рис. 2.4.5

1 — локомоторные волны бегания ресничек у *Colpidium*: а — вид снизу на движущийся организм, зоны контакта которого со стеклом заштрихованы; б — вид сбоку на этот организм; 2 — движение нитевидной водоросли: а — вид снизу на движущийся организм, имеющий перегородки между клетками, зоны контакта со стеклом выделены черным; б — вид сбоку (по Ambrose /1961/)

по всему этому телу, двигаясь не только строго последовательно друг за другом, но и параллельно, и вразброс, чему можно найти ряд дополнительных подтверждений на иллюстрациях в той же работе Ambrose /1961/.

Интересны эксперименты по обездвиживанию амёб *Amoeba proteus* с помощью механического раздражения, повышения температуры до 40°C или химического воздействия с последующим поэтапным самовосстановлением этого движения. Оказывается, что полное обездвижение любых амёбоидных организмов и клеток всегда приводит к деструкции их двигательной системы, которая при возобновлении движения формируется заново (причем в процессе перемещения простейших наблюдается непрерывное или периодическое ее обновление). Наблюдаемая последовательность восстановления основных элементов (или процессов) при возобновлении локомоции включает следующие этапы (Серавин /1977, с. 126/):

- 1) некоординированное движение отдельных гранул цитоплазмы,
- 2) организованные струйки движущейся цитоплазмы,
- 3) изменения формы тела,
- 4) образование нормальных псевдоподий («ножек»),
- 5) некоординированное перемещение амёбы по субстрату,
- 6) нормальное координированное перемещение амёбы.

В свете биосолитонной концепции, представляющей живой организм в виде иерархической колонии биосолитонов, подобные данные о последовательном восстановлении иерархического ансамбля биосолитонов, обеспечивающего в итоге нормальные локомоторные биосолитоны, представляются весьма ценными для моделирования таких биологических ансамблей на языке солитонных уравнений.

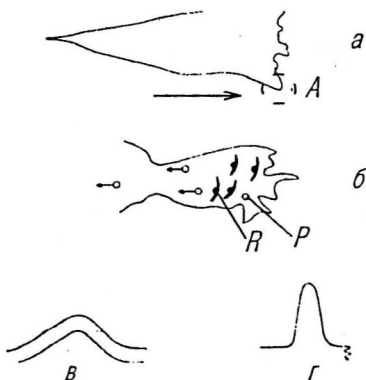


Рис. 2.4.6

Движущийся фибробласт. Направление движения указано стрелкой. *a* — клетка с веероподобными выступами, один из которых, выделенный кружком *A*, дан на фрагменте *б* в увеличенном виде. Черными полосками и символом *R* обозначены движущиеся одногорбые складки, форма которых показана на фрагментах *в, г*. Маленькими кружками *P* отмечены различимые в микроскоп пузырьки в ткани, движущиеся в направлении исходящих из них стрелок (по Ambrose /1961/)

Хочется отметить еще так называемую «бессмертную амебу Гартмана»: если у амобы постоянно ампутировать кусочки цитоплазмы (в которой работают биосолитоны), то такая амeba перестает делиться и практически не стареет (Hartmann /1928/). В этой связи в биологии известна гипотеза «биохимической ампутации», применяемая, например, к объяснению того, почему нервная клетка не делится и долго сохраняет «молодой» уровень обмена: в ней тоже часть протоплазмы непрерывно оттекает в аксон, что обеспечивает постоянное обновление оставшейся части за счет новых синтезов (в параграфе о процессах в нервной клетке нами будет показано, что важный вид аксонального тока протоплазмы в нервной клетке носит, как было открыто Weiss /1969, 1972/, перистальтический характер и определяется бегущими по аксону локальными деформациями его мембраны, сохраняющими свою форму и скорость, т.е. тоже являющимися биосолитонами, но транспортно-метаболического назначения). В свете этих биологических данных (взятых из обзора Мезенцева и Мессиновой /1971, с. 73/) о возможностях задерживать старение путем воздействия на биосолитонную организацию, пускай и на примере простейших биологических объектов, напрашивается вопрос: не приведет ли развитие биосолитонных технологий, например, технологии «биосолитонной (а не биохимической) ампутации» к новым возможностям борьбы со старостью у человека и высокоорганизованных животных?

2.5. О телесных биологических конформациях

Известно, что во всех случаях, когда клетка или ее части обнаруживают способность к движению, это движение связано с присутствием во внутренней среде — цитоплазме — особых фибриллярных белков, которые принято называть контрактивными или сократительными белками. Они были найдены в миофибриллах мышечной клетки, в ресничках, жгутиках, мионемах и пр. С точки зрения физики коллективных явлений типа фазовых переходов, обязательно требующих для реализации фазового перехода огромного числа участвующих частиц, важно отметить, что молекулы всех контрактивных белков имеют огромные размеры. Так, молекулы миозина, экстрагированные из мышечных клеток кролика, имеют длину до 1600 Å, а их ширина равна 20–25 Å.

Молекулы сократительных белков могут лежать в цитоплазме клетки поодиночке, независимо друг от друга, или, соединяясь параллельно, образовывать компактные волокнистые структуры. Волокнистые структуры такого типа обычно называются филаментами (на поперечном срезе под электронным микроскопом они выглядят темными точками того или иного диаметра). Очень часто контрактильные белки соединяются в волокнистые структуры иного типа, образуя так называемые трубочки или микро-трубочки (на поперечном срезе они имеют вид колечек). В организованных контрактильных системах многочисленные филаменты и фибриллы обычно соединяются в группы или комплексы, которые в различных местах клеток могут получать разные названия: миофибриллы, мионемы и т.д. Филаменты, фибриллы и плоские мембраны (также способные в ряде случаев к сокращению) являются элементарными структурными единицами сократительных систем клетки, а также любых других ее систем. При этом по внешнему виду этих единиц зачастую никак нельзя сказать, какую биологическую функцию — сократительную, опорную, рецепторную — они выполняют. Например, филаменты, мионемы стебелька у сувойки (один из простейших организмов) могут образовывать контрактильную систему, а подобные филаменты, имеющие практически тот же самый диаметр, в другой части того же самого стебелька, выполняют опорную функцию.

Приведем ряд справочных данных о сократительных структурах и явлениях в биологических клетках с тем, чтобы лучше понять природу биосолитонов и то, каковы структурные особенности тех биологических сред, на которых они наблюдаются. При этом в части биологической фактологии будем использовать монографию «Двигательные системы простейших» Серавина /1967/, включающую обстоятельный аналитический обзор.

У большинства простейших и подвижных клеток элементарные контрактильные ультраструктуры (прежде всего, фибриллы и филаменты) образуют определенные комплексы — органеллы. Строгий порядок во взаиморасположении этих ультраструктур вовсе не является обязательным условием проявления локомоторных биосолитонов. Последние с равным успехом проявляются как в ресничках и жгутиках с их строгой упорядоченностью в расположении ультраструктур, так и у амёб (рис. 2.1.4), у которых филаменты разбросаны внутри тела совершенно беспорядочно. Образующая при этом у амёбы хаотичная трехмерная сеть

чрезвычайно сильно напоминает получаемый в лабораторных условиях простым смешением молекул актина и миозина актомиозиновый гель с такой же сетью и многими свойствами. Названная упорядоченность влияет только на выделенность направлений и скорость движения биосолитонов: например, миофибриллы поперечно полосатой мышечной клетки сокращаются быстро и однонаправленно, а амеба — медленно и с возможностью изменения направления сокращения.

Многие авторы разделяют все наблюдаемые виды сокращений клеток и их частей на два основных вида: линейное сокращение и волнообразное, подчеркивая их общность в том, что оба этих вида базируются на переупаковке контрактильных белков или ультраструктур, ими образованных. Экспериментально показано, что в ряде случаев можно наблюдать непосредственно превращение одной основной формы сокращения в другую. В своей книге /1967, с. 108–112/ Серавин последовательно обосновывает на примерах самых разных сократительных систем клеток следующую общую точку зрения: «в основе сокращения любой контрактильной системы лежит, по-видимому, единый принцип — переагрегация молекул или элементарных ультраструктур, организованных из этих молекул, которая основана на изменении их конформации. В элементарных контрактильных системах изменения конформации белковых молекул весьма значительны, на их основе можно легко объяснить сокращение всей системы... Напротив, в сложно организованных контрактильных системах клетки на первый взгляд выступает переупаковка элементарных ультраструктур, поскольку изменения конформации белковых молекул не приводят к изменению размеров или формы фибрилл и филаментов. ... По нашему мнению, сходство различных клеточных контрактильных систем обеспечивается не тем, что они имеют одинаковое происхождение; не тем, что они организованы из одинаковых белков; и не тем, что молекулы сократительных белков способны изменять свои линейные размеры. Это сходство объясняется тем, что в основе работы различных контрактильных систем лежит общий принцип: переагрегация сократительных элементов (молекул или ультраструктур), основанная на изменении конформации белковых молекул. В одних случаях переагрегация сопровождается уменьшением линейных размеров контрактильных молекул, в других — сокращением или изменением формы элементарных ультраструктур, в третьих — скольжением этих ультраструктур друг по другу».

В широкое понятие переагрегации Серавиным включены также фазовые переходы типа «гель-золь». Так, главной особенностью амебoidных организмов (группы *Hydraulea*), «является то, что двигательная система у них охватывает большую часть тела. При перемещении простейшего по субстрату в движение внутри клетки, так или иначе, вовлекаются все основные ее компоненты. Двигательная система непрерывно разрушается на заднем конце тела (превращение геля в золь), ее элементы транспортируются текущей цитоплазмой к переднему концу, где двигательная система вновь реконструируется (превращение золя в гель)» (Серавин /1977, с. 123/). На участие таких фазовых переходов и переагрегаций молекул и ультраструктур в волновой организации различных движений у целостных биологических организмов обращали внимание, кроме Серавина, многие исследователи — Фрей-Висслинг и Мюлеталер /1968, с. 49/, Шноль /1967/ и др., никогда не высказывавшие, однако, идеи солитонной природы этих процессов.

Соответственно, мы дополняем их материалы концепцией солитонов как устойчивой и самолокализующейся формы энергетических объектов в нелинейных средах, способной распространяться по всему телу биологических макрообъектов. Подчеркнем, что подобные фазовые переходы типа «золь в гель» и «гель в золь» (или «полимеризация-деполимеризация», переагрегация и т.д.) явно сопровождают, по крайней мере, во многих случаях наблюдаемые нами движения биосолитонов. Обнаружение биосолитонов в надклеточных и многоклеточных организмах дополнительно обосновывает целесообразность расширения вышеуказанного положения о переагрегации за счет включения в него — помимо молекул и элементарных внутриклеточных ультраструктур, сложенных из молекул, — также надклеточных и тканевых структур, которые также способны «переагрегироваться в широком смысле» при прохождении по ним биосолитонов. В качестве названия этого свойства самых разных по масштабу и химическому составу биологических объектов — переагрегироваться конфигурационно сходным образом на весьма разных уровнях общности — можно использовать термин «телесная конформация», который вынесен нами в заголовок настоящего параграфа. С позиций биосолитонной концепции данное конфигурационное сходство обусловлено определяющей ролью морфологии энергетических пакетов в солитонных средах, во многом не зависящей от химического состава и масштаба таких сред. Именно под эту

морфологию солитонно-энергетических сгустков подстраивается живая материя.

Заканчивая настоящую главу о биосолитонах в локомоциях и просто моторных движениях у самых разных биологических организмов, подчеркнем, что они предстают как универсальная форма коллективного поведения в живой материи. Но локомоторные и просто моторные движения и системы издавна связываются исследователями с другими видами биологических трансформаций и систем, например, с ростовыми и морфогенетическими трансформациями, репродуктивными и сенсорными системами, системами распознавания образов, пространствами психофизиологического восприятия и пр. В последующих главах нашей книги этим связям будет отведено значительное место, но сначала мы рассмотрим новый — солитонный — вид родства между живой материей и кристаллами, у которых, как оказывается, солитоны по существу известны уже более полувека, правда, под другим исходным названием.

Глава 3 СОЛИТОНЫ В КРИСТАЛЛАХ

Задача этой главы обзорного характера — познакомить читателя с известными приложениями теории солитонов в кристаллографии. Здесь солитоны выступают в образах дислокаций и солитонных доменных стенок. Эти понятия — особенно понятие солитонной доменной стенки — оказываются полезными для интерпретации биологических явлений и развития солитонной биологии, а потому активно используются в последующих главах.

Естествоиспытатели издавна ощущали и пытались выразить определенное морфофункциональное родство между биологическими телами и кристаллами. Например, Пастер именно с этой точки зрения изучал рост кристаллов и исследовал, насколько быстро кристалл «заживляет» нанесенные ему раны и восстанавливает свой первоначальный вид. Шредингер /1972/ рассматривал живые организмы в связи с представлением об аперiodических кристаллах. Характерное стремление многих исследователей отобразил в стихах автор термина «морфология» и

многих крупных работ в области биологии великий поэт Гете (цитируется по книге Шафрановского /1968/, содержащей исторический обзор названных вопросов):

Природным тайнам время умереть,
Отважной мысли нечего скрыватьсЯ,
Мы организмы нынешние впредь
Заставим кристаллизоваться.

3.1. Солитоны Френкеля–Конторовой

Для темы нашей книги важное значение имеет эффективно работающее в кристаллографии понятие дислокации (от латинского *dislocatio* — смещение), обозначающее нарушение локальной симметрии во взаиморасположении группы соседних атомов кристаллической решетки. Изложение этих известных материалов по дислокациям и их аналогам в связи с теорией солитонов мы проведем по книге Филиппова /1990/. Речь пойдет, прежде всего, о солитонах или дислокациях Френкеля–Конторовой (Конторова, Френкель /1938/).

В этой публикации был рассмотрен особого рода дефект в кристаллической структуре твердого тела. Предельный случай дислокации — это «дырка» в узле кристаллической решетки. Такая дырка может перемещаться по кристаллу. Перемещение затрудняется тем, что для переброса какого-нибудь соседнего атома на пустое место нужно сначала его достаточно сильно «раскачать», чтобы он мог оторваться от окружающих его атомов решетки, с которыми он связан. Гораздо легче перемещается дефект, в котором атомы вокруг «дырки» также смещены. Такой дефект и есть дислокация.

Простую модель дислокации можно сделать так. Представим себе периодическую последовательность горок и ложбинок (рис. 3.1.1 *а*). Пусть в ложбинках лежат шарики, связанные упругими пружинками. Эти шарики изображают слой атомов, а пружинки изображают силы, связывающие атомы друг с другом. Атомы, представленные шариками, взаимодействуют также с атомами другого слоя, изображенными крестиками. Вместо сил взаимодействия верхнего слоя с нижним на рисунке показаны горки, обозначающие это взаимодействие. Атомы нижнего слоя неподвижны. Из-за действия ненулевой силы пружинки

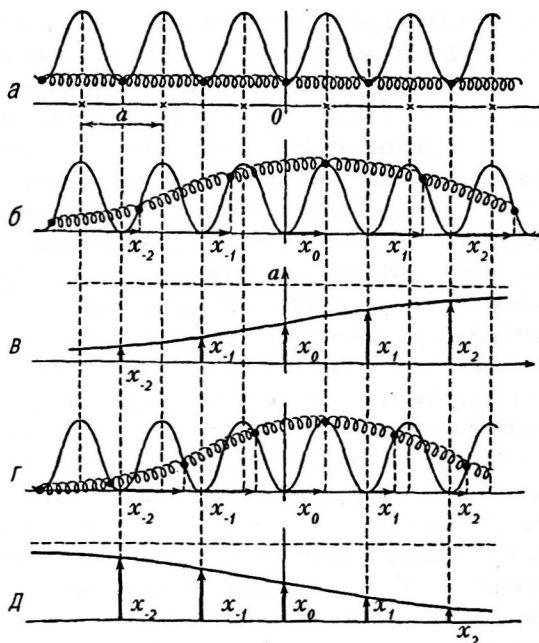


Рис. 3.1.1
Модель дислокации
(по Филиппову /1990/)

в этой системе, очевидно, не может быть просто «дырки», то есть не может случиться так, чтобы одна ямка была пустой, а во всех остальных атомы лежали бы на дне. Вместо этого равновесие может установиться в состоянии, изображенном на рис. 3.1.1 б, при котором группа соседних атомов согласованно смещена из нижнего положения на дне ямки. Это и есть картина того, что называется дислокацией Френкеля-Конторовой. В предельном случае, когда пружинки очень мягкие, эта дислокация превращается в «дырку».

На рис. 3.1.1 б и в изображена дислокация, в которой вблизи точки 0 «меньше» атомов, чем в недеформированном состоянии (рис. 3.1.1 а). Может случиться так, что вместо этого образуется «сгущение» атомов, как показано на рис. 3.1.1 г и д. В предельном случае мягких пружин здесь реализуется случай, при котором одна ямка содержит лишний атом.

На самом деле понятие дефекта по Френкелю включает пару: «дырку» и ячейку с лишним атомом. Их можно считать как бы «частицей» и «античастицей», родившимися в тот момент, когда один из атомов перескочил в соседнюю ячейку. Эта пара может

разойтись, и тогда можно говорить отдельно о «дырке» или «сгущении». Точно так же и распределенные дефекты-дислокации могут порождаться и уничтожаться парами. Дислокацию разрежения обычно называют «положительной» или просто дислокацией, а сгущения — «отрицательной» или «антидислокацией».

Дислокация, размер которой значительно превышает шаг решетки «а», свободно перемещается. Для сдвига всей дислокации на расстояние «а» нужно сместить каждый атом на относительно малую длину, затратив при этом совсем немного энергии. Таким образом, дислокации могут перемещаться по кристаллу как частицы, не изменяя свою форму. Разумеется, это относится к идеальным системам, когда все горбики и ямки одинаковы, а грузики и пружинки также не отличаются друг от друга. Если, однако, один горбик заметно выше других, то ясно, что дислокация сможет проскочить эту неоднородность только при достаточно большой скорости движения; такой высокий горбик как бы пытается «оттолкнуть» подбегающую дислокацию. Наоборот, более низкий, чем другие, горбик будет облегчать ее прохождение по нему, как бы «притягивать» подбегающую дислокацию к себе. К похожим эффектам могут приводить и неоднородности в пружинах и массах грузиков.

При ближайшем рассмотрении оказывается, что одна дислокация действует на другую как неоднородность. Точнее, две положительные или две отрицательные дислокации как бы «отталкиваются» друг от друга, а положительная и отрицательная — «притягиваются». Притяжение дислокации и антидислокации — вещь довольно понятная, поскольку в дислокации пружины растянуты, а в антидислокации сжаты. Столь же легко представима причина отталкивания «одноименных» дислокаций.

Из всего сказанного вовсе не очевидно, что такие равновесные конфигурации, как показанные на рис. 3.1.1 б или г, действительно существуют. Могло бы случиться и так, что при всяком отклонении грузиков от равновесных положений по цепочке просто бежали волны. Именно так обстоит дело в обычной струне и других одномерных системах. Действительно, все достаточно малые начальные отклонения в рассматриваемой модели Френкеля-Конторовой «распадаются» на волны. Все дело здесь именно в «достаточной малости». Действующие на грузики силы тяжести и натяжения пружин могут уравниваться только при больших смещениях атомов. Если каким-то способом создать вначале достаточно большое смещение атомов, скажем, перебросить один или несколько

атомов в соседние ямки, то в результате по цепочке побегут волны сжатия и разрежения. При этом оказывается, что, когда присутствующие мелкие волны уйдут далеко, останется некоторое количество дислокаций и антидислокаций, которые сравнительно медленно движутся или покоятся. Таким образом, любое значительное начальное возмущение «распадается» на бегущие волны и несколько дислокаций и антидислокаций. Их форма не зависит от начального возмущения, а определяется параметрами среды (массами грузиков, жесткостью пружин, волнистостью поверхности).

Поведение двух сталкивающихся дислокаций выводится математическим путем из анализа соответствующих уравнений. Точное решение этих уравнений показывает, что одноименные дислокации взаимодействуют точно так же, как солитоны Рассела. Если, например, на покоящуюся антидислокацию налетает другая антидислокация, то во время «соударения» обе дислокации несколько деформируются. За время их соприкосновения кинетическая энергия налетевшей дислокации перейдет к первоначально покоившейся, которая и начнет двигаться вперед, сохраняя свою форму. В общем, можно сказать, что дислокация подобна мячу. Главное здесь то, что дислокация — при фиксированных параметрах модели — сохраняет свою форму. Ее легче сдвинуть, чем деформировать (как мы уже отмечали, если изменить параметры нелинейной модели, например, изменить жесткость пружинок, то это приведет к дислокациям измененной формы).

На самом деле, дислокация даже при фиксированных параметрах нелинейной среды не деформируется лишь при малой скорости своего движения, много меньшей скорости распространения продольной звуковой волны по цепочке атомов. Дело в том, что полученное Френкелем-Конторовой для описания дислокаций нелинейное уравнение синус-Гордона (1.3) является инвариантным относительно преобразований Лоренца, как это уже отмечалось выше. Соответственно в общем случае при убыстренном движении такой дислокации все ее продольные (по оси, соответствующей направлению ее движения) размеры уменьшаются по формуле $l = l_0 \sqrt{1 - (\nu/\nu_0)^2}$, где l и l_0 — продольный размер движущейся и покоящейся дислокации, ν — скорость дислокации, ν_0 — скорость распространения звука. Как эта формула для размеров конкретной дислокации, так и формулы для ее энергии и импульса (они будут выписаны ниже) аналогичны соответствующим формулам специальной теории относительности. Но эта аналогия — чисто матема-

тическая. В теории относительности написанные формулы имеют совершенно другой физический смысл. К тому же для реальных дислокаций они выполняются лишь приближенно.

Рассмотрим теперь на той же модели пружинок и грузиков случай столкновения дислокации с антидислокацией. Когда антидислокация (антисолитон) A налетает слева на покоящуюся дислокацию (солитон) S , то сжатые в A пружины распрямляются, из A в S пробегает волна сжатия, которая превращает S в A , и наоборот. Эти события происходят очень быстро, поскольку передача энергии от A к S и распространение волны сжатия, превращающей S в A и S в A , происходят со скоростью звука. Если начальная скорость налетающего солитона много меньше скорости звука, то оба солитона не успевают заметно изменить свою форму и разлетаются как мячи. В результате налетевший антисолитон A превращается в солитон S и останавливается немного левее положения первоначально покоившегося солитона S . Тот в свою очередь превращается в антисолитон A и летит направо, занимая положение немного правее того, которое занимал бы налетающий солитон, если бы не было столкновения. При этом ничего похожего на прохождение одного солитона «сквозь другой» не происходит.

На примере дислокации особенно ясно видно, что солитон подобен частице. Понятиям «положительная» и «отрицательная» дислокация (солитон-антисолитон) зачастую придают буквальный смысл, приписывая дислокациям соответствующие заряды. В положительной дислокации общий эффект смещения атомов такой же, как при образовании дырки. Если бы в рассматриваемой модели атомы нижнего неподвижного ряда были электрически заряжены положительно, а верхнего — отрицательно, то дислокация, как и дырка, переносила бы положительный электрический заряд. Если дислокации условно приписывают заряд «+1», то антидислокации приписывают заряд «-1». Ясно, что сравнивать заряды дислокаций можно лишь в одной и той же решетке. В отличие от настоящих частиц дислокации не существуют вне породившей их среды, и понятие заряда имеет смысл лишь для определенной, заданной решетки.

Итак, эта известная простая модель приводит к тому, что в данной нелинейной среде имеются частицы и античастицы, которые могут порождаться и уничтожаться парами. Имеются также сохраняющиеся заряды, причем одноименные заряды отталкиваются, а разноименные притягиваются. Есть и нечто похожее

на электромагнитные волны: бегущие волны с малой амплитудой колебаний грузиков вблизи их положений равновесия. В общем, возникает целый одномерный мир. В нем могут существовать также очень своеобразные «атомы», построенные из дислокации и антидислокации.

Это связано с тем, что дислокация и антидислокация способны притягиваться и образовывать некоторую связанную, неразлучную пару, нечто вроде атома позитрония, т.е. атома водорода, в котором протон заменен на позитрон. Здесь законен вопрос об опасности аннигиляции этой пары, однако в «непрерывной» модели Френкеля-Конторовой, о которой речь пойдет ниже, могут образовываться такие солитонные атомы, живущие бесконечно долго. Без математики их устойчивое существование не обосновать, но опишем их.

Допустим, слева стоит солитон S , а справа около него — антисолитон A . Соответствующие смещения атомов изображены на рис. 3.1.2 *а*, где по вертикальной оси отложено смещение в единицах расстояния « a », равного шагу решетки, т.е. y/a . На оси x изображены также реальные смещения атомов: справа атомы сгущены, а слева разрежены. В результате взаимопритягивания солитона и антисолитона, очевидно, налево пойдет волна сгущения, и через некоторое время получится картинка, представленная на рис. 3.1.2 *б* и соответствующая зеркально симметричной ситуации: антисолитон и сгущение атомов расположены слева, а солитон и разреженность атомов — справа. При этом переходе все протекает так же, как при рассмотренном выше столкновении движущегося солитона с покоящимся антисолитоном, но теперь нет запаса кинетической энергии, который позволил бы им оторваться друг от друга. В возникшей новой позиции из-за взаимопротяжения солитона и антисолитона вновь, но уже в обратном направлении пойдет волна сгущения атомов, и в результате восстановится исходная картина. Многократное

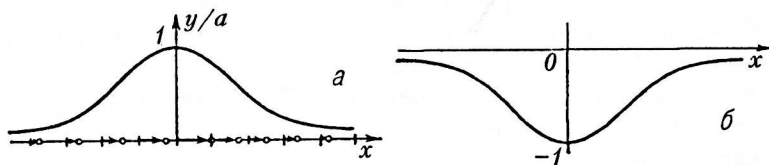


Рис. 3.1.2

Схема, поясняющая существование бризера как связанной пары «солитон—антисолитон» (по Филиппову /1990/)

повторение этих взаимопереходов создает стоящее на месте пульсирующее состояние. Его называют бризером (от английского *breath* — дышать) или бионом («живая частица»).

В качестве отступления можно отметить, что люди с древних времен практикуют художественное приписывание многим объектам свойств живых организмов для лучшего запоминания, более живого восприятия и т.п. Примерами этого могут служить литературные выражения: «дед Мороз», «небо хмурилось», «живой огонь» и т.п. Соответственно, термины бризер и бion имеют такое же литературно-образное происхождение, поскольку, по крайней мере на момент возникновения этих названий, не было известно научных публикаций на тему об их реализации в биологических объектах, например, о работе легких человека как бризеров или о пульсациях у живых организмов на основе бионов (хотя с точки зрения выдвигаемой нами концепции биосолитонов в биологических макрообъектах именно в такой бризерной интерпретации целого ряда биологических феноменов заключается большой смысл, например, при рассмотрении пейсмекеров — водителей биологических ритмов, а также многих видов тремора, дрожания и других биологических осцилляций. Уточним, что бризерные осцилляции являются не единственными осцилляциями, известными для солитонных систем: другим примером является периодически повторяющееся перераспределение энергии в нелинейной среде, наблюдавшееся в экспериментах Ферми-Паста-Улама, которое также может быть в ряде случаев использовано для интерпретации биологических осцилляций). В согласии с этой существовавшей до сегодняшнего дня пропастью между современной теорией солитонов и биологией организмов в той же обзорной книге Филиппова /1990, с. 167/ отмечается, что «трудно себе представить, чтобы из таких элементарных частиц (солитонов и антисолитонов) могли бы возникнуть, скажем, мыслящие существа».

Рассмотренный бризер ведет себя как стоячая волна. Странно в этой волне то, что ее ничто не удерживает на краях. Представить подобную вещь на поверхности воды нельзя, и действительно на воде таких «существ» не бывает. Другая удивительная особенность этой стоячей волны состоит в том, что она тоже ведет себя как частица. Бризер может равномерно двигаться. Он ускоряется или замедляется вблизи неоднородностей. При столкновениях с солитонами или другими бризерами он также ведет себя как частица. С другой стороны, в бризере наглядно проявляется вол-

новая природа солитонов. Бризер нельзя описать просто как две частицы A и S , связанные пружинкой. «Внутри» него действительно пульсирует стоячая волна сжатий и разрежений «среды». Однажды возникнув как локализованный энергетический объект, бризер далее пульсирует, не требуя в идеальной солитонной среде новых затрат энергии. Бризер является настоящим солитоном, таким же как солитон Рассела или дислокация Френкеля.

Возможен вопрос, чем же все-таки является солитон — волной или частицей? Правильный ответ заключается в том, что солитон — это солитон, новый объект физического мира. Однако многие солитоны рождаются «из волн» и наследуют некоторые свойства волн. Для понимания многих свойств солитонов помнить об их волновом происхождении не только полезно, но порой и необходимо. С другой стороны, солитоны движутся и сталкиваются как частицы, но частицы эти, как мы видели, очень необычные. Дислокация, например, имеет конечный размер, но ее нельзя разбить на меньшие части, она неделима. Для популярного объяснения, что дислокация неделима, несмотря на то, что она, казалось бы, состоит из пружинки и грузиков, используют сравнение дислокации с улыбкой Чеширского Кота, способной существовать без самого кота, из известной книги Льюиса Керролла «Приключения Алиса в стране чудес». В этом сравнении пружинки и грузики — это кот, а дислокация — его улыбка. Улыбка относится к состоянию кота, и она неделима: либо она есть, либо ее нет. Когда говорят о дислокации, как о солитоне, то как раз и имеют в виду «улыбку без кота». Дело здесь не только в том, что одни и те же солитоны, описываемые совершенно одинаковыми уравнениями, могут существовать в самых различных средах. Самым интересным считается то, что здесь можно действительно изучать и, видимо, наблюдать улыбку без кота, подобно электромагнитным волнам, которые после изгнания из физики представления об эфире стали такой же «улыбкой без кота».

Рассмотренная выше модель среды из грузиков и пружинки в интересах наглядности представляла собой некоторое усложнение настоящей модели Френкеля–Конторовой (ФК), к которой теперь обратимся. В настоящей модели ФК атомы, естественно движутся по прямой (ось x) и все силы, действующие на них, направлены также по оси x . Действие соседних атомов верхнего слоя представим, как и раньше, пружинками, а действие атомов нижнего слоя («подкладки») описывается периодической синус-

соидальной силой $f(x) = -f_0 \sin(2\pi x/a)$. Обозначим отклонение n -го атома от положения равновесия функцией $y_n = x_n(t) - na$, где $x_n(t)$ — координата n -го атома. Со стороны подкладки на n -й атом действует сила

$$f(x_n) = -f_0 \sin[(y_n + na) 2\pi/a] = -f_0 \sin(2\pi y_n/a).$$

Пружины действуют на n -й атом с силой, равной: $k(y_{n+1} - y_n) - k(y_n - y_{n-1})$. Уравнение движения n -го атома поэтому принимает вид:

$$m \, d^2 y_n / dt^2 = -f_0 \sin(2\pi y_n/a) + k(y_{n+1} - 2y_n + y_{n-1}) \quad (3.1.1)$$

Именно это уравнение (3.1.1) соответствует модели ФК (точнее это целая система уравнений). Решение этого уравнения, описывающее движущуюся дислокацию, можно найти, учитывая, что движущаяся дислокация подобна волне, бегущей по цепочке грузиков, в которой каждый грузик с некоторым опозданием точно повторяет все движения предыдущего. Время этого запаздывания Dt определяется скоростью перемещения волны $v = a/Dt$. Соответственно, $y_{n+1}(t) = y_n(t - Dt)$; $y_{n-1}(t) = y_n(t + Dt)$. Смещение $y_n(t + Dt)$ можно найти, считая движение атома от момента $(t - Dt)$ до момента $(t + Dt)$ равномерно ускоренным. Тогда $y_n(t \pm Dt) = y_n(t) \pm (dy(t)/dt)Dt + (d^2 y_n(t)/dt^2)(Dt)^2/2$.

Подставляя это в уравнение (3.1), получаем:

$$[m - k(Dt)^2](d^2 y_n(t)/dt^2) = -f_0 \sin(2\pi y_n/a) \quad (3.1.2)$$

Из этого уравнения нетрудно получить (см., например, у Филиппова /1990, с. 174–177/) ряд содержательных выводов. Например, размер (или «полуширина») покоящейся дислокации l_0 увеличивается при увеличении жесткости пружин и уменьшении силы со стороны «подкладки», привязывающей атомы к определенным местам. При движении дислокации со скоростью v ее размер l_v определяется, как это уже отмечалось выше, по формуле $l_v = l_0 \sqrt{1 - (v/v_0)^2}$, напоминающей преобразование длины при переходе в движущуюся систему координат в специальной теории относительности, только вместо скорости света в ней стоит скорость звука v_0 . Эта формальная аналогия с теорией относительности проводится достаточно далеко. Например, энергия и импульс движущейся дислокации также выражаются формулами «теории относительности»:

$$E = m_0 v_0^2 / \sqrt{1 - v^2/v_0^2}; \quad p = m_0 v / \sqrt{1 - v^2/v_0^2}; \quad m_0 = 2am/\pi^2 l_0.$$

Таким образом, быстро движущиеся дислокации подчиняются не механике Ньютона, а механике специальной теории относительности. При малой скорости движения дислокации

($v^2/v_0^2 \ll 1$) можно пользоваться обычной нерелятивистской теорией.

Подчеркнем, что по выписанной формуле для энергии движущейся дислокации основная ее часть при скорости движения, малой относительно скорости звука, приходится на энергию покоящейся дислокации ($v = 0$). Этот момент будет для нас существенен при рассмотрении устройства и работы биологических рецепторов как биосолитонных систем, работающих на скоростях, меньших скорости звука, и призванных максимально чувствительно и оперативно реагировать на внешние стимулы, а потому содержащих в своем составе уже готовые, но до поры неподвижные биосолитоны, которые приводятся в движение малым внешним воздействием и запускают в работу другие биосолитонные системы организма для адекватного реагирования на внешний раздражитель. В этих особенностях биосолитонной подготовленности к приему раздражителей и биосолитонной передаче информации о них, видимо, заключаются многие загадки биологической рецепторики, работающей в неразрывной связи и на «едином языке» с другими биосолитонными системами организма, прежде всего моторными, уже рассмотренными в главе 2.

При переходе в модели ФК от цепочки атомов к сплошной среде основное уравнение (3.1.1) преобразуется в уже знакомое уравнение синус–Гордона (1.3), которое будет подробнее рассмотрено в специальном параграфе.

Отметим, что в среде, смоделированной Френкелем–Конторовой, могут распространяться также обычные звуковые волны. Но закон их дисперсии, т.е. зависимости скорости v распространения волны от ее длины, будет специфическим и соответствовать уравнению гиперболы. Этот закон дисперсии часто встречается в самых различных физических явлениях. При данном законе частота распространяющихся по цепочке волн всегда выше частоты, с которой колебался бы каждый атом цепочки вблизи своего положения равновесия, если бы он находился только под действием «подкладки».

Напомним теперь некоторые известные физические проявления дислокаций в кристаллах, поскольку многое из глубоко разработанной за прошедшие десятилетия теории дислокаций и ее приложений в кристаллографии имеет — на основании выявляемых нами солитонных аналогий — прямое отношение к биологическим телам с их биосолитонной самоорганизацией. Известно,

что металлы с совершенной кристаллической решеткой, не искаженной примесями и дефектами, сами по себе довольно «мягкие» или пластичные. Такая кристаллическая решетка большинства металлов построена из одинаковых «кубиков». Вдоль плоскостей этих «кубиков» кристалл легко можно сдвинуть по

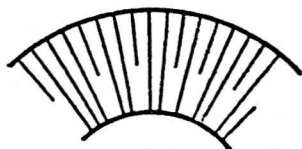


Рис. 3.1.3

Дислокация в виде оборванных линий среди правильных рядов атомов кристалла (по Филиппову /1990/

некоторым плоскостям аналогично тому, как легко сдвигается сложенная стопка монет в плоскости, перпендикулярной оси стопки. Такой сдвиг у кристалла происходит совсем легко, если приложенное усилие создает дислокации, бегущие одна за другой. При этом не нужно сдвигать сразу много атомов, а достаточно образовать дислокацию, для чего требуется сравнительно малое усилие. По этой причине чистые правильные кристаллы многих металлов очень мягкие. Однако бывает, что куски одной и той же на вид проволоки гнутся совсем не одинаково из-за того, что внутренняя структура у них на самом деле разная. Возможно, читатель замечал, что проволоку зачастую легче согнуть, чем разогнуть. Причина этого — дислокации. При сгибании в кристалле неизбежно образуется большое число дислокаций. Расстояния между атомами при этом практически не изменяются, но кристалл в одних направлениях растягивается, а в других — сжимается. На рис. 3.1.3 правильные ряды атомов кристалла схематично представлены в виде непрерывных линий, а дислокации — в виде линий оборванных, не доведенных до противоположной стороны.

Если при сгибании образуется очень много дислокаций, то они начинают «мешать» друг другу. Точнее говоря, кристалл становится настолько несовершенным, что дислокации по нему уже не могут распространяться свободно. В привязке к выше рассмотренной модели можно сказать, что энергетические ямки и горки становятся довольно нерегулярными. Образуются широкие холмы и овраги, за которые дислокации «зацепляются». В этом случае для разгибания кристалла приходится перемещать уже огромные коллективы атомов, а не «передислоцировать» их небольшие группы. Из-за этого и получается, что разогнуть — это совсем не то, что согнуть. Сходное образование большого числа перепутанных дислокаций и других дефектов происходит при ковке металлов. Можно сильно уменьшить число дислока-

ций, которые образовались при сгибании и разгибании проволоки, если «отжечь» проволоку. При сильном нагревании дислокации «распутываются», атомы, в основном, становятся на свои места, и проволока после отжига вновь становится мягкой.

Здесь уместен вопрос: почему обязательно должны образовываться дислокации, а не просто дефекты по Френкелю? Дело в том, что в реальном кристалле на создание дислокации нужно затратить меньше энергии, чем на образование одного дефекта по Френкелю, причем примерно во столько раз, во сколько шаг кристаллической решетки меньше размера дислокации.

Дислокации можно наблюдать непосредственно, а не только делать умозрительные заключения об их существовании. Впервые это было осуществлено около сорока лет назад в Кавендишской и других лабораториях. С помощью электронного микроскопа удалось буквально увидеть картину, изображенную на рис. 3.1.3, и снять кинофильм с большим числом движущихся дислокаций, которые, по выражению первых его зрителей, «суетились, как мыши» (Филиппов /1990, с. 184/). (Опять мы имеем здесь пример художественного сравнения дислокации с биологическими объектами). Возможно, что внимательное изучение подобных фильмов позволило бы увидеть столкновения дислокаций и даже бризеры.

К настоящему времени теория дислокаций и ее приложений в кристаллографии очень развита и связана с массой наблюдаемых морфологических картин различных видов дислокаций — геликоидов, кольцевидных петель, сеток, «деревьев» и пр., представленных в специальных атласах, а также с феноменами двойникования и другими проявлениями коллективного поведения в кристаллах. Перечислим для биологов некоторые из проблем, рассматриваемых в этой теории: размножение дислокаций и источники дислокаций; образование двойникований и морфология двойников; внутренние механические напряжения, вызываемые дислокациями; динамика дислокаций в изотропных и анизотропных средах и расчет их упругой энергии; взаимодействие дислокаций и образование их ансамблей и скоплений; остановка дислокаций и возобновление их движений; движение дислокаций через хаотические сетки препятствий; эффекты памяти формы у кристаллов; излучение звука движущимися дислокациями и пр. Эти материалы имеют значительную эвристическую ценность и могут быть во-многом перенесены (с необходимыми оговорками) в биологию на базе их выявленного солитонного родства с биосолитонными феноменами.

Так, в биологии имеется целый ряд проблем, касающихся происхождения внутренних механических напряжений в тканях и их участия в ростовых, морфогенетических и других процессах (см. обзор Регирера и Штейна /1985, с. 49/). При обращении к кристаллографическим аналогиям представляется интересным то, что участки кристалла вблизи дислокации находятся в упругонапряженном состоянии (а значит и участки в живых тканях вблизи биосолитонов также находятся в этом состоянии). Напряжения убывают обратно пропорционально расстоянию от дислокации. При сближении двух дислокаций с одинаковыми векторами Бюргерса (т.е. векторами смещения дислокаций) упругие напряжения около дислокации увеличиваются, и дислокации отталкиваются. При сближении дислокаций с противоположными векторами Бюргерса их упругие поля взаимно компенсируются, дислокации притягиваются и аннигилируют. Поскольку дислокация обладает собственным полем напряжений, она под действием внешних приложенных к кристаллу напряжений испытывает силу, под действием которой приходит в движение. Мы вернемся к вопросу о механических напряжениях в кристаллах и биотелах в следующем параграфе.

Другая интересная с точки зрения биосолитонов тема связана с излучением звука движущимися дислокациями и их скоплениями (см., например, Бойко с соавт. /1991, с. 204–232/). В неоднородных средах даже стационарное движение дислокаций сопровождается излучением звуковых волн. Особо весомый вклад в акустическую эмиссию дает рождение и аннигиляция дислокаций. Возникновение дислокаций внутри кристалла, которое, согласно так называемому закону сохранения вектора Бюргерса, возможно только в виде пар дислокаций противоположных знаков, сопровождается аннигиляционным излучением. Исчезновение дислокаций, происходящее путем выхода на поверхность или аннигиляции внутри кристалла, также сопровождается переходным или аннигиляционным акустическим излучением соответственно. Максимальную акустическую эмиссию в виде интенсивных импульсов связывают с образованием и поведением двойников в кристаллах. Изменение направления скорости дислокации приводит к изменению полярности эмиссионного сигнала. Изменение знака дислокации при неизменном направлении ее скорости также меняет полярность этого сигнала. Проводимое нами в настоящее время сравнение характера акустических сигналов от

кристаллографических дислокаций со многими акустическими сигналами, регистрируемыми от биологических объектов (в частности, при многих видах акустической диагностики функционального состояния биообъектов в норме и при патологии), обращает внимание на их сходство во многих случаях. Это дополнительно свидетельствует в пользу того, что акустическая эмиссия в живых организмах, по крайней мере, нередко связана с движением биосолитонов и их скоплениями, в том числе с рождением и аннигиляцией биосолитонов противоположных знаков. Концепция биосолитонов дает новый подход к проблеме происхождения и характера многих видов звуков в биообъектах, а также к дальнейшему развитию широкой области прикладных медико-биологических методик, базирующихся на использовании таких звуков.

Возвращаясь к модели Френкеля–Конторовой, отметим, что известна ее простая, «домашняя» реализация. Для ее изготовления нужна качественная и достаточно длинная плоская резиновая лента и большие скрепки, укрепляемые вдоль ленты на равных расстояниях друг от друга так, чтобы каждая скрепка располагалась поперек ленты. Вдоль одной стороны ленты на выступающий конец каждой скрепки крепится грузик, например, из кусочка пластилина. Если резинку считать достаточно близкой к идеальной, то данное устройство представляет собой набор маятников в поле силы тяжести, упруго связанных друг с другом благодаря закручиванию резинки. Уравнение их движения в этом случае подобно уравнениям (3.1.1). Для вывода этих уравнений применительно к данной ленте с грузиками удобно идеализировать скрепки, заменив их грузиками с массой m на невесомых твердых стерженьках длины l . Эта упрощенная модель изображена на рис. 3.1.4. Закручивание резинки, на которой подвешены маятники, создает момент упругой силы, действующей на маятник. Этот момент зависит от углов φ_i закручивания соседних маятников. Очевидно, что момент, действующий на

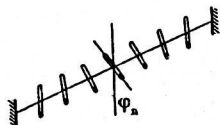


Рис. 3.1.4

Один из вариантов реализации модели Френкеля–Конторовой (по Филиппову /1990/)

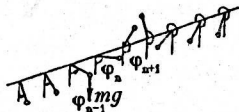


Рис. 3.1.5

Отклонения маятников, соответствующие одному солитону (по Филиппову /1990/)

n -й маятник, можно записать в виде $K(\varphi_{n+1} - \varphi_n) - K(\varphi_n - \varphi_{n-1})$ и, повторив выкладки, сделанные выше при выводе уравнения (3.1), можно получить это уравнение вновь для данного случая.

Разумеется, эта система гораздо сложнее, чем одномерная цепочка, и к тому же весьма несовершенна, прежде всего, из-за очень больших потерь на трение в резине. Но она имеет то достоинство, что бегущие вдоль нее волны имеют небольшую скорость, и их можно наблюдать невооруженным глазом. На таком примитивном устройстве можно увидеть немного. В лучшем случае удастся разнообразное изучение движения одного солитона и дисперсии волн малой амплитуды. На рис. 3.1.5 схематически изображены отклонения маятников, соответствующие одному солитону, при этом угол закручивания изменяется от 0 до 2π . Из-за большого затухания, вызванного трением в резинке, солитон довольно быстро останавливается. Более совершенный и близкий «генератор солитонов», как уже говорилось в главе 1, был сделан Scott /1969/, подробно описавшем его устройство.

3.2. О магнитных и других солитонах, похожих на дислокации

Солитоны, весьма похожие на дислокации, как известно, можно найти в очень многих физических системах, которые по этой причине тоже могут выступать в определенных случаях моделями биосолитонных систем или источниками полезных аналогий. В этой связи обширные результаты многолетних исследований физиками и математиками солитонов в данных системах очень ценны для зарождающейся науки о биосолитонах.

Одними из них являются магнитные солитоны. Они изучались сначала независимо от дислокаций, и их родство с дислокациями было замечено далеко не сразу. Речь идет о намагничивании ферромагнетиков, например, железа. Они намагничиваются с большой легкостью из-за того, что в них могут образовываться солитоны. Пояснить это можно на следующей модели. Представим себе, что на рис. 3.1.5 вместо маятников вращаются магнетики. При этом они находятся не в поле силы тяжести, а в некотором «кристаллическом» поле, которое устроено так, что энергия отдельно взятого магнетика минимальна, когда он находится в вертикальном положении (т.е. $\varphi = 0$ или $\varphi = \pm \pi$). Это поле аналогично полю окружа-

ющих атомов в случае дислокаций. Направления вверх и вниз называются направлениями легчайшего намагничивания. Обычно они связаны с осями симметрии решетки кристалла.

Если соседние магнетики никак не связаны, то такой кристалл намагничивается только во внешнем магнитном поле. Для того, чтобы он сохранил намагниченность при выключении поля, нужны еще силы между соседними магнитиками, подобные тем, которые создаются в механических моделях пружинками или резинками. Действие этих сил могло бы обеспечить удержание магнитиков в одном направлении, скажем, в верхнем. Природу таких сил удалось понять только после создания квантовой механики. Она была выяснена в 1928 г. Френкелем и одним из творцов современной квантовой теории Гейзенбергом. Но для знакомства с магнитным солитоном разбираться в происхождении этих сил не нужно, достаточно знать, что в ферромагнетике они действуют наподобие пружин или резинок.

В результате магнетики проявляют сильно выраженный коллективизм. Если один из них находится между двумя другими, смотрящими вверх, то он тоже будет стремиться смотреть вверх. Коллективу магнитиков энергетически выгодно смотреть либо вверх, либо вниз. Но такой коллектив будет создавать в окружающем пространстве свое собственное магнитное поле, энергию которого необходимо учитывать в дополнение к энергии взаимодействия магнитиков друг с другом и с кристаллическим полем. Полная энергия, т.е. энергия нашего коллектива вместе с энергией его магнитного поля будет минимальной, если коллектив разобьется на группы так, что магнитное поле вне образца будет отсутствовать (магнитный поток замыкается внутри образца). При этом в одних группах члены будут смотреть вверх, а в других — вниз. Эти группы называются доменами (от французского *domaine* — область).

Границы между доменами, в которых индивидуальные магнетики постепенно меняют свое направление ориентации с верхнего на нижнее, называются доменными стенками. Они-то и являются магнитными солитонами, совершенно подобными дислокациям и механическим солитонам. Как и дислокации, доменные стенки могут свободно перемещаться по кристаллу, если, конечно, им не мешают несовершенства кристаллической решетки или другие доменные стенки. Ненамагниченный кристалл состоит из большого числа доменов, направления намагничивания которых противоположны. Если поместить кристалл в маг-

нитное поле, то стенки приходят в движение. В результате размеры доменов, магнетики которых направлены вдоль поля, увеличатся, а размеры остальных соответственно уменьшатся. При выключении поля стенки движутся назад, но если их движению что-то мешает, то возникает «остаточная намагниченность». Это настолько похоже на описанный выше механизм пластической деформации, что термины «мягкое» и «жесткое» (в магнитном смысле) железо понимаются по аналогии сразу.

Для оценки числа и размеров доменов в ненамагниченном мягком железе надо знать величины магнитной энергии и энергии доменной стенки. Объемная плотность магнитной энергии полностью намагниченного однородного кристалла равна примерно $0,1 \text{ Дж/см}^3$, а поверхностная плотность энергии доменной стенки — примерно 10^{-7} Дж/см^2 . Полная энергия будет минимальной, когда магнитная энергия каждого домена и энергия его стенок будут примерно равными. Если взять кубик объемом примерно 1 см^3 , то это осуществится, когда он разбит примерно на тысячу плоских доменов. Тогда энергия всех стенок и энергия магнитного поля равны примерно 10^{-4} Дж . Один домен распространяется на несколько десятков тысяч межатомных расстояний, а ширина доменной стенки в несколько сот раз больше размеров атомов (т.е. порядка 10^{-5} см). Таким образом, расстояния между стенками достаточно велики и толщина их также заметно больше размеров дислокаций. Поэтому наблюдать доменные стенки несколько легче, чем дислокации. Если покрыть поверхность ферромагнетика слоем суспензии, содержащей ферромагнитный порошок, то частицы порошка осядут в основном на границах доменов и обрисуют их. Важно отметить, что достаточно малые частицы, размером меньше 10^{-4} см , не могут содержать в себе стенок и составляют один домен. Другими словами, в доменообразовании заложен «масштабный фактор» или «критический размер». Одним из вариантов проявления такого масштабного фактора, наблюдаемого в тонких ферромагнитных пленках, является существование у пленок критической толщины: если толщина пленки меньше этой критической, то для нее характерно монодоменное состояние (Рудяк /1986, с. 92/). Учет этого масштабного фактора в феноменах доменизации оказывается полезным при развитии представлений о биологических доменах и их проявлениях в следующих главах.

В теории ферромагнетиков идея о существовании доменов была высказана в 1907 г. Вейссом. Причины дробления на доме-

ны были впервые выяснены Френкелем и Дорфманом в 1930 г. Они же оценили размеры доменов. После наблюдения доменов Блох высказал мысль, что стенки доменов должны быть довольно толстыми и оценил их толщину. Очень общая и точная теория, позволяющая описывать всевозможные домены и стенки, была создана в 1935 г. Ландау и Лифшицем. Уравнения Ландау и Лифшица до сих пор используются для получения многочисленных новых солитонов. Ландау и Лифшиц не только нашли структуру вышеназванной доменной стенки, но и описали движение стенки под действием слабого внешнего магнитного поля, т.е. по существу медленное движение солитонов.

Солитонная природа стенок была, однако, выяснена гораздо позже, лет через пятнадцать–двадцать. Сначала никто просто не заметил, что движение стенки похоже на движение частицы, и доменные стенки долго жили своей жизнью, независимой от жизни других солитонов. Вероятно, это было связано с тем, что уравнения Ландау–Лифшица в общем случае намного сложнее уравнения Френкеля–Конторовой.

Ферромагнитные доменные стенки с изменением ориентации на 180° описываются солитонными решениями уравнения синус-Гордона, которые характеризуют изменение намагниченности между доменами, ориентированными вверх и вниз (см., например, Додд Р. и др. /1988, с. 473/, Currie /1977/). При этом одиночный солитон отвечает движущейся стенке между зонами с намагниченностью «вверх» и «вниз». В рядах доменных стенок присутствуют также солитон-солитонные и солитон-антисолитонные решения СГ-уравнения. Наиболее ранний вывод СГ-уравнения при описании движения доменных стенок был сделан Дорингом в 1948 г., Зеегером с соавторами в 1953 г. и Енцем в 1964 г.

В случае ферромагнетиков доменная стенка представляет собой довольно широкую переходную область, в которой вектор намагниченности постепенно поворачивается от одного направления к другому. Случай его поворота на 180° и ширины доменной стенки при этом схематически показан на рис. 3.2.1

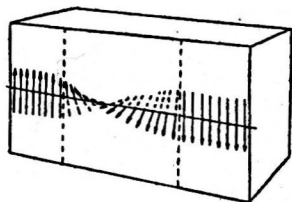


Рис. 3.2.1

Схематическое изображение 180° -доменной стенки в ферромагнетике. Стрелки соответствуют постепенно поворачиваемому вектору намагниченности (по Смоленскому с соавт. /1971/)

(по Смоленскому с соавт. /1971/). Толщина стенки определяется из условия минимума суммы обменной энергии и энергии анизотропии. Часть энергии стенки, связанная с обменным взаимодействием, уменьшается с увеличением толщины стенки, так как для этого взаимодействия наиболее благоприятна параллельная ориентация магнитных моментов. В то же время та часть энергии стенки, которая связана с анизотропией, увеличивается с толщиной стенки, так как растет объем, в котором намагниченность не совпадает с легким направлением намагничивания. Обменная энергия значительно превышает энергию анизотропии, поэтому доменные стенки у ферромагнетиков достаточно толстые (по сравнению с сегнетоэлектриками).

Остановимся на одном интересном случае магнитных доменов — так называемых цилиндрических магнитных доменах или, кратко, ЦМД (см., например, Лисовский /1984/), применяемых в запоминающих устройствах цифровых вычислительных машин. Они представляют собой изолированные однородно намагниченные области ферро — или ферритмагнетика, имеющие форму круговых цилиндров и направление намагниченности, противоположное направлению намагниченности остальной его части. (Наряду с обычными известны также кольцевые или полые ЦМД). ЦМД получают в тонких (1–100 мкм) плоскопараллельных пластинах (пленках) монокристаллических ферритмагнетиков (ферриты-гранаты) или аморфных ферромагнетиков с единственной осью легкого намагничивания, направленной перпендикулярно поверхности пластины. Магнитное поле, формирующее ЦМД (поле подмагничивания), прикладывается по оси легкого намагничивания.

В отсутствии внешнего подмагничивающего поля доменная структура пластин имеет неупорядоченный лабиринтообразный вид. При наложении подмагничивающего поля домены, не имеющие контакта с краями пластины, стягиваются и образуют ЦМД. Последние можно наблюдать под микроскопом в поляризованном свете как округлости диаметром в единицы микрон и более. Существуют магнитные пленки, в которых диаметр ЦМД менее 0,5 мкм. Изолированные ЦМД существуют в определенном интервале полей подмагничивания. Нижняя граница интервала устойчивости соответствует переходу ЦМД в домены эллиптической формы, верхняя — исчезновению (коллапсу) ЦМД. В однородном поле подмагничивания ЦМД неподвижны, в неоднородном эти домены перемещаются в область с меньшей напряженностью

поля. Существует предельная скорость перемещения ЦМД (для разных веществ от 10 до 100 м/с). Скорость ЦМД ограничивают процессы передачи энергии от движущегося домена кристаллической решетке, спиновым волнам и т.п., а также взаимодействие ЦМД с дефектами в кристаллах (с уменьшением числа дефектов скорость увеличивается). В запоминающих устройствах цифровой техники ЦМД нашли применение для записи, хранения и считывания информации в двоичной системе счисления: нули и единицы двоичного кода изображаются при этом соответственно присутствием или отсутствием такого домена в данном месте пленки.

В связи с ЦМД и биологической тематикой нашей книги следует отдельно отметить работу Федоровой с соавторстве /1999/, в которой впервые выявлены и изучены под разными углами зрения многочисленные факты биологического влияния слабых микроструктурированных полей, носителями которых являются магнитодоменные пленки феррит гранатов. Эти исследования имеют не только теоретическое, но и прикладное значение, в том числе они позволяют разработать целый ряд методик для микробиологической промышленности, медицины и пр. Многолетнее общение автора книги с Д.Л. Федоровой и совместная работа с ней в Отделе биомеханики Института машиноведения РАН (руководитель — К.В. Фролов) явились очень ценными для ряда разделов настоящей книги.

В настоящее время семейство солитонов Френкеля и доменных стенок очень многочисленно и быстро развивается. В частности, сегнетоэлектрики, т.е. кристаллические диэлектрики, обладающие в определенном диапазоне температур самопроизвольной поляризацией, обычно также состоят из доменов — областей с различным направлением поляризации. В результате суммарный электрический дипольный момент образца практически отсутствует. Равновесная доменная структура сегнетоэлектрика отвечает минимуму свободной энергии кристалла. В идеальном кристалле она определяется балансом между уменьшением при образовании доменов энергии за счет электростатического взаимодействия различных частей и увеличением энергии доменных границ. Доменная структура реального сегнетоэлектрика определяется природой и характером распределения его дефектов, а также историей изучаемого образца кристалла. Направления спонтанной поляризации в соседних доменах составляют определенные углы друг с другом, в том числе 90° и 180° . Разбиваясь на

домены, кристалл становится с кристаллографической точки зрения полисинтетическим двойником, домены — компонентами этого двойника, а доменные границы совпадают с плоскостями двойникования. Число различных доменов, взаимная ориентация их спонтанной поляризации зависят от симметрии кристалла. В сегнетоэлектриках, также как в ферромагнетиках, наблюдаются цилиндрические домены с округлым сечением (Иона, Ширане /1965, с. 82, 232/), а также стержневые домены с сечением в виде чечевицы, и пр. Поскольку доменные стенки отличаются от совершенного кристалла, то с ними связана определенная энергия (т.е. имеется устойчивый автолокализованный сгусток энергии) в дополнение к электростатической энергии. В энергию доменной стенки заметный вклад дает упругая энергия, связанная с искажением кристаллической решетки у стенки.

Надо сказать, что все реальные кристаллы имеют доменное строение: они разбиты на небольшие области с размером порядка 10^{-4} см, в которых порядок почти идеален, но которые разориентированы по отношению друг к другу на малые углы (приблизительно несколько минут) (Вайнштейн, Шаскольская /1984/).

Другим известным примером являются домены в жидких кристаллах, широко представленных в живых организмах. Жидкокристаллическая упорядоченность наблюдается в доменах, размеры которых обычно равны примерно 10^2 – 10^{-1} мм. К числу известных в жидких кристаллах видов доменов относятся: полосатые, пузырьковые, кольцевые и др. Внешними воздействиями можно ориентировать домены, вызывать их рождение и движение и пр. Кстати, в работе Каменского /1984/ показано, что движение директора нематического жидкого кристалла в магнитном поле (для случая деформации чистого кручения) описывается СГ-уравнением. При этом подробно рассмотрены его солитонные и бессолитонные решения в привязке к данному физическому объекту.

Доменные стенки, видимо, встречаются на всех уровнях организации вселенной. Во всяком случае, физики-теоретики изучают сегодня «стенки» от самого малого масштаба в теории элементарных частиц до самого огромного — в теории расширяющейся Вселенной.

Сегнетоэластики. Остановимся на одном из видов доменообразующих кристаллов с солитонными доменными стенками — сегнетоэластиках (в англоязычной научной литературе обычно используется иной термин — «ферроэластик»). Сегнетоэластиками называются диэлектрические кристаллы, отдельные облас-

ти которого — сегнетоэластические домены — отличаются различной спонтанной (самопроизвольной) деформацией кристаллической решетки относительно некоторой исходной. Спонтанная деформация возникает, например, при понижении температуры в результате фазового перехода из исходной (параэластической) фазы в менее симметричную сегнетоэластическую фазу, симметрия которой допускает существование двойников, различающихся в простейшем случае знаком сдвиговой спонтанной деформации. Разбиение кристалла при этой спонтанной деформации соответствует минимуму упругой энергии кристалла. Согласно гипотезе Ройтбурда /1983/ в сегнетоэластиках роль «деполяризующего поля» (аналогичного деполяризующему или размагничивающему полю у сегнетоэлектриков и ферромагнетиков) играют неоднородные внутренние напряжения, возникающие в кристалле при переходе температуры через некоторое критическое значение — точку Кюри.

По внутреннему состоянию возникающие двойники идентичны, и различие обнаруживается только при соседстве доменов разных двойниковых структур. Основной особенностью сегнетоэластического домена является возможность перевести его в другую двойниковую структуру с помощью механических напряжений. Наличие доменной структуры обеспечивает у сегнетоэластиков обратимую деформацию, значительно превышающую предел упругой деформации. В отличие от линейно-упругих материалов у сегнетоэластика зависимость деформации от приложенного механического напряжения имеет вид петли гистерезиса, причем при некотором значении напряжения, называемом коэрцитивным, происходит переход кристалла в однодоменное состояние. Нередко сегнетоэластические свойства совмещаются с сегнетоэлектричеством (тогда их называют смешанными сегнетоэластиками). В настоящее время по данной теме имеется обширная литература (см., например, Бойко и др. /1991/, Инденбом /1979/, Рудяк /1986/, Шувалов /1979/). Установлено соответствие между кристаллографическими двойниками и доменами как областями спонтанной поляризации (Инденбом /1979/).

Сегнетоэластики являются механическими аналогами ферромагнетиков и сегнетоэлектриков. Зависимость деформации сегнетоэластика от механических напряжений подобна зависимости намагниченности от напряженности магнитного поля в ферромагнетиках (или зависимости поляризованности от напря-

женности электрического поля в сегнетоэлектриках). Несмотря на различную природу сегнетоэластического, ферромагнитного и сегнетоэлектрического состояний вещества, физические свойства всех трех типов нелинейных кристаллов в значительной мере определяются наличием в них доменной структуры и солитонных доменных стенок, а также особенностями их перестроек. Процессы перестройки доменной структуры, происходящие под влиянием соответствующих внешних воздействий, называют процессами переключения. В реальных кристаллах для процессов переключения характерны скачкообразное изменение намагниченности в ферромагнетиках (так называемые скачки Баркгаузена), переполяризации сегнетоэлектриков и изменение деформации в сегнетоэластиках. Гистерезис в ферромагнетиках, сегнетоэлектриках и сегнетоэластиках также во многом аналогичен.

Количество типов доменов, на которые разбивается кристалл при переходе в сегнетоэластическое состояние, зависит от типа вещества. В частности, кристалл $\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$ в сегнетоэластической фазе обладает тремя типами доменов, которые могут разделяться двумя типами доменных границ, образующими правильные зигзагообразные доменные границы. В кристаллах тригональных двойных молибдатов и вольфраматов в сегнетоэластической фазе существуют три ориентационных состояния, которые могут разделяться прямыми, косыми и зигзагообразными границами. Механическая перестройка этих доменных структур осуществляется чрезвычайно легко и происходит как за счет движения доменных границ всех трех типов, так и за счет возникновения новых доменов. При этом динамика процессов переключения и характер перестройки доменных структур резко различаются при воздействии на кристалл однородных и неоднородных напряжений. Одноосные напряжения растяжения (сжатия) монодоменизируют образцы, в то время как неоднородные напряжения, вызванные кручением или изгибом, приводят к образованию регулярных полидоменных структур.

В чистых сегнетоэластиках процесс переключения может быть осуществлен только за счет соответствующим образом ориентированных механических напряжений, приложенных к образцу. Процесс переключения сегнетоэластика характеризуется перестройкой его доменной структуры, в том числе и скачкообразной, а также изменением петель механического гистерезиса. У чистых сегнетоэластиках всегда могут реализовываться взаимоперпенди-

кулярные доменные стенки или две системы взаимно ортогональных прослоек (Шувалов /1979/, Инденбом и Чамров /1980/).

В смешанных сегнетоэластиках, обладающих сегнетоэлектрическими свойствами, переключение доменной структуры может происходить под действием электрического поля, причем результаты воздействия соответствующим образом ориентированных электрического поля и механических напряжений полностью взаимозаменяемы, т.е. одних и тех же результатов переключения, одного и того же равновесного состояния доменной структуры можно достичь, действуя на кристалл либо электрическим полем, либо упругими напряжениями. Эта возможность воздействия на его доменную структуру электрическими, а иногда и магнитными полями считается одним из своеобразных свойств сегнетоэластического состояния. Другим типичным отличием сегнетоэластических доменных структур можно считать систематическое появление достаточно устойчивых зигзагообразных доменных границ, которые могут легко перемещаться как целое в перпендикулярном направлении под действием механического напряжения или электрического поля. Очень интересны с точки зрения биологических аналогий картины закономерного деления зубцов в зигзагообразных доменных границах сегнетоэластиков на более мелкие и возможное расхождение двух таких границ с сохранением параллельности между ними при действии внешних полей.

В случае многоосных сегнетоэлектриков внутри каждого сегнетоэластического домена может существовать чисто сегнетоэлектрическая доменная субструктура. Такие смешанные сегнетоэластики называют неполными сегнетоэластиками-сегнетоэлектриками. Соседние сегнето-эластические домены оптически различимы в поляризованном свете, а субструктура не различима. Все многоосные сегнетоэлектрики непременно являются сегнетоэластиками. При этом все сегнетоэластические границы таких смешанных сегнетоэластиков являются также и сегнетоэлектрическими границами (Рудяк /1986, с. 52/). Приложенное к полидоменному сегнетоэластику внешнее однородное напряжение приводит к увеличению объема выгодно ориентированных доменов, завершающемуся монодоменизацией всего образца. При неоднородной нагрузке в сегнетоэластике образуются мелкомасштабные доменные структуры типа полисинтетических двойников, пространственный период которых тем меньше, чем более неоднород-

на деформация в рассматриваемой области. Описание доменной структуры сегнетоэластиков опирается на теорию дислокаций. Инденбом и Чамров /1980/ показали, что дислокационное описание доменных стенок позволяет свести задачу о форме доменов в сегнетоэластиках к типичной задаче теории дислокаций.

Это относительно подробное описание сегнетоэластиков проведено нами потому, что они являются *механическими* аналогами ферромагнетиков, и их доменные стенки, разделяющие упругие домены, могут соответственно интерпретироваться как солитоны СГ-уравнения. С биосолитонной точки зрения механические напряжения представляют первостепенный интерес в связи с локомоторными и многими другими биосолитонами, сопровождаемыми этими напряжениями.

Для познания способности живой материи к биосолитонной структуризации представляется оправданным развивать соответствующие теоретические модели, используя, например, аналогии с сегнетоэластиками или рассматриваемыми в следующей главе гетерофазными твердыми растворами с образуемыми в них «упругими доменами». В этих объектах благодаря именно упругим напряжениям формируются солитонные доменные стенки, закономерно разбивающие весь объект на домены. Данные модели в идеальном варианте должны объяснять и предсказывать развитие и поведение многодоменных структур биологических тел на основе коллективного поведения вещества, самопроизвольно разбивающегося на домены для достижения энергетического минимума.

Перейдем, наконец, к самому солитонному СГ-уравнению, о котором уже столько говорили в связи с дислокациями, доменными границами и пр.

3.3. Солитонное уравнение синус-Гордона

В настоящее время в математике известно немало солитонных уравнений и видов солитонов, хотя определить, что некоторое нелинейное волновое уравнение обладает солитонными решениями очень трудно и еще труднее найти их в явной форме. Для развития теории биосолитонов и ее приложений важно определить, какие или какое из этих уравнений имеют отношение к живой материи, то есть какие типы солитонных сред и солитонов реализуются в живой материи. Здесь возможны две поляр-

ные точки зрения, которые следует учитывать при последовательном углублении наших начальных знаний о биосолитонах.

Согласно первой из них можно полагать, что самоорганизующаяся живая материя располагает многими (и даже всеми) вариантами солитонных сред и в зависимости от ситуации использует тот или иной их тип. При этом она имеет большой выбор типов солитонов, например, для их адресной посылки в качестве информационных биосолитонов в различные части живого организма. Соответственно, часть биосолитонных явлений должна при этом наблюдаться в форме, например, солитонов уравнений НУШ или КдФ, а другая часть — солитонов СГ-уравнения и т.д.

Согласно второй точке зрения живая материя обладает определенным единообразием в своих формах коллективного поведения и, соответственно, в типе своих биосолитонных воплощений. И солитонов из данного единообразия ей вполне хватает для выполнения всех биологических задач за счет их умелого использования. Это кажется тем более естественным, что различные функции и системы организма развиваются и работают в тесной взаимосвязи как единое наследуемое целое, что было бы затруднено, если вообще возможно, окажись организм ансамблем из принципиально различных видов биосолитонов. Данная точка зрения предполагает унифицированность типа биосолитонных сред и существование для всей живой материи некоторого фундаментального биосолитонного уравнения. Это воззрение возможно в качестве стартового для соответствующего сравнительного анализа особенностей картин биологической морфологии и решений известных солитонных уравнений, описывающих морфологию автолокализуемых пакетов энергии.

При этом можно опираться на то, что многие наблюдаемые биосолитоны имеют отношение к СГ-уравнению, которое выделяется своими особенностями среди других известных солитонных уравнений, например, оно является среди них единственным релятивистским уравнением, имеет к тому же точные многосолитонные решения, неограниченные по числу солитонов, и его солитоны топологические, т.е. особо устойчивые. Оно также позволяет провести естественные параллели между живой материей и другими физическими объектами, способными к сходным формам коллективного поведения, прежде всего, кристаллами. По этому пути пошел автор настоящей книги в надежде, что либо удастся найти биологически оправданное обобщение СГ-уравнения в ка-

честве фундаментального для биологии, либо дополнить перечень типов наблюдаемых биосолитонов теми, которые никак не могут быть связаны с СГ-уравнением и его обобщениями.

Приведем справочные данные по СГ-уравнению (1.3), опираясь на многие публикации, в том числе Косевича и Ковалева /1989/; Раджараман /1985/; Ребби /1980/; Скотт /1977/. При этом речь будет идти о солитонах для случая одномерного пространства, соответствующего столь часто реализуемым в биотелах одномерно протяженным структурам типа разнообразных филамент и микротрубочек, нередко образующим за счет взаимосвивания или пересечения друг с другом двухмерные и трехмерные биологические ткани.

Прежде всего, солитоны СГ-уравнения являются «топологическими», а значит особенно устойчивыми солитонами, поскольку характеризуются особым механизмом «удержания». Благодаря этому механизму расплыться и затухнуть солитон не может по тем же топологическим причинам, по которым узел, завязанный на бесконечной веревке, не может быть развязан без разрезания веревки. Напомним, что многие солитоны носят название «динамических», поскольку их стабильность поддерживается существованием динамических интегралов движения; незначительные изменения нелинейного уравнения, нарушающие соответствующий закон сохранения, могут нарушить стабильность динамического солитона, приводя к его исчезновению. Так, динамическими являются солитоны уравнений КдФ (1.1) и НУШ (1.2).

Топологичность солитона СГ-уравнения связана с тем, что он разделяет два различных основных состояния одномерной системы аналогично тому, как граница фаз разделяет две находящиеся в равновесии фазы или как плоская доменная граница разделяет два равновесных домена в ферромагнетике. Наличие нескольких основных состояний одномерной системы (или, как говорят физики, нескольких равноценных энергетических «вакуумов») определяет существование топологических солитонов, принципиальное отличие которых от динамических солитонов можно охарактеризовать еще следующим образом. Свойства динамических солитонов определяются видом дисперсии, степенью нелинейных слагаемых в уравнении, их знаком и характером, т.е. локальными свойствами соответствующих дифференциальных уравнений. Свойства топологических солитонов определяются только характером основного состояния системы — нали-

нием дискретного вырождения этого состояния (вакуума); при этом вид нелинейности не существен. Другими словами, динамические солитоны отражают локальные нелинейные свойства динамических систем, а топологические солитоны отражают их глобальные нелинейные свойства.

Для лучшего понимания солитонов СГ-уравнения напомним физическое понятие поля, поскольку это уравнение пригодно для описания полей или физических систем, распространяющихся в пространстве. При таком его применении поле в пространстве выступает в роли среды, в которой распространяются солитоны. Поле ставит в соответствие каждой точке пространства значение некоторой специфической величины, такой, например, как электрический потенциал. Часто в одной точке определено несколько величин. Эти величины могут меняться от точки к точке и от одного момента времени к другому, но изменения эти должны быть плавными и непрерывными. Наиболее известное поле — электромагнитное, описываемое уравнениями Максвелла. В максвелловской теории в каждой точке пространства определены шесть величин, представляющих собой компоненты электрического и магнитного поля вдоль трех ортогональных осей.

Поверхность воды в бассейне можно рассматривать как модель двумерного поля. величиной, ставящейся в соответствие каждой точке пространства, является при этом высота поверхности воды над некоторым фиксированным уровнем. Волна, бегущая по воде, становится в этом случае возмущением поля.

Существенным свойством поля является то, что так же, как и частица, оно может переносить энергию. Энергия поля в единице объема (т.е. локальная энергия) является суммой трех величин. Одна из них пропорциональна квадрату скорости, с которой поле изменяется во времени. Другая имеет подобный же вид, но пропорциональна квадрату скорости изменения поля в пространстве. Третья величина определяется не скоростью изменения, а величиной поля в данной точке. Первую величину обычно называют кинетической энергией, а сумму двух оставшихся — потенциальной. В дальнейшем, однако, нам будет удобно, следуя Ребби / 1980, с. 333 /, иметь собственное название для каждой из трех величин. Поэтому назовем внутренней энергией величину, зависящую от значения поля, оставляя название потенциальной энергии за слагаемым, пропорциональным квадрату скорости пространственного изменения поля.

Такой классификации локальной энергии поля может быть дано интуитивное обоснование. Слагаемое, отвечающее локальной кинетической энергии, устанавливает, что полная локальная энергия поля в рассматриваемой единице объема возрастает, если поле (в каждой точке) начинает изменяться быстрее. Для водной поверхности, служащей моделью поля, это означает, что локальная кинетическая энергия пропорциональна квадрату скорости изменения положения волны или просто квадрату скорости волны. Повседневный наш опыт говорит о том же: чем быстрее движется тело, тем больше оно несет энергии. Локальная потенциальная энергия в соответствии с тем, как она была определена выше, увеличивается, если уже заметное изменение состояния поля происходит в малой области пространства. Интуитивно это также ясно: энергия, необходимая для изгиба или деформации тела, возрастает, если изгиб делается резче. Интерпретация локальной внутренней энергии еще более очевидна, поскольку она зависит от величины поля и в модели с бассейном внутренняя энергия относится к общему уровню поверхности воды: чем выше уровень воды, тем больше внутренняя энергия.

Поскольку и кинетическая и потенциальная энергии пропорциональны квадратам некоторых величин, то они никогда не могут стать отрицательными. При рассмотрении внутренней энергии поля необходимо учитывать лишь разность уровней энергии, как, например, в случае различных уровней воды в бассейне. Наименьшая наблюдаемая внутренняя энергия может быть положена равной нулю, а следовательно и внутреннюю энергию можно определить так, что она никогда не будет принимать отрицательных значений. Таким образом, минимальная суммарная энергия поля в рассматриваемой единице объема равна нулю. Состояние поля с минимальной, или нулевой, энергией называется вакуумным или основным состоянием, как это принято в физике. (Просим биологов, привыкших к употреблению термина «вакуум» как характеристики минимального содержания воздуха в объеме пространства, запомнить еще одно его значение как характеристики минимального содержания энергии у поля). Очевидно, что в состоянии локального энергетического вакуума поле должно быть в рассматриваемой единице объема постоянным в пространстве и во времени, так как любое изменение приведет к появлению положительной величины потенциальной или кинетической энергии. Для нахождения вакуумного состояния достаточно минимизировать только внутреннюю энергию. Энергетический ва-

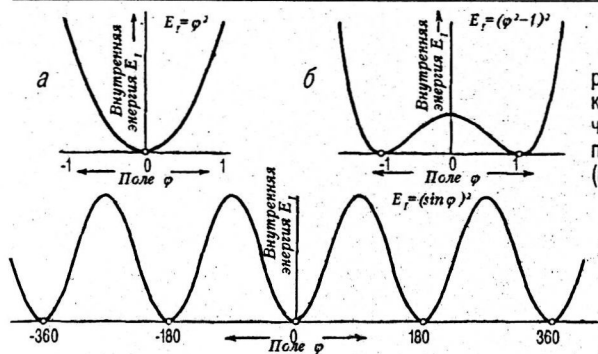


Рис. 3.3.1
Графики внутренней энергии E_i как функции величины поля φ в трех простейших случаях (по Ребби /1980/)

куум на рассматриваемом участке модельного бассейна есть состояние постоянного во времени и пространстве поля, имеющего на данном участке нулевую внутреннюю энергию. Вакуум есть состояние постоянного во времени и пространстве поля, имеющего нулевую внутреннюю энергию.

Если на всем протяжении бассейна поле постоянно во времени и пространстве, а внутренняя энергия на всех его участках равна нулю, то суммарная энергия всей поверхности воды равна нулю. Это соответствует простейшему мыслимому случаю поля, всюду равного нулю и имеющего всюду энергетический вакуум.

Однако в физике известны примеры полей, у которых локальный энергетический вакуум достигается не при нулевом значении поля. Примером этого является магнитное поле ферромагнетика. Состояние минимума энергии ферромагнетика не есть ненамагниченное состояние; напротив, ферромагнетик спонтанно генерирует магнитное поле и поддерживает его не равным нулю, поскольку, делая это, он уменьшает свою энергию. Известен целый ряд других полевых уравнений, в которых внутренняя энергия исчезает не при нулевом значении поля и энергетические вакуумы возникают при многих различных значениях поля. Существование, по крайней мере, двух таких энергетических вакуумов при разных значениях поля является необходимым условием возникновения топологического солитона.

На рис. 3.3.1 представлены графики внутренней энергии E_i как функции величины поля φ в трех простейших случаях. В первом из них (а) энергия растет как квадрат величины поля и существует только одно вакуумное состояние: энергия E_i равна нулю, когда поле φ равно нулю. Во втором случае (б) у поля

есть два вакуумных состояния: энергия равна нулю, когда поле принимает значение $+1$ и -1 . В третьем случае (в) показана энергия поля синус-Гордона в виде периодической функции поля $E_1(\varphi) = (\sin \varphi)^2$, имеющей бесконечное число вакуумных состояний. Если величину поля синус-Гордона измерять в градусах, то энергия обращается в нуль в точках $0, 180^\circ, 360^\circ$ и т.д.

Для пояснения топологии солитонов СГ-уравнения рассмотрим случай поля в одномерном пространстве, т.е. на бесконечно длинной линии, точки которой обозначим через x — единственную координату на линии. Каждой точке на этой линии сопоставляется некоторое единственное значение поля $j(x)$. Также как j зависит от x , так в свою очередь и внутренняя энергия $E_1(j)$ зависит от j . СГ-уравнение описывает движение волны в поле с внутренней энергией вида $E_1(j) = (\sin j)^2$. Из соображений простоты будем считать, что единицы измерения выбраны так, что внутренняя энергия меняется от нуля до единицы, а j измеряется в градусах. Синус и его квадрат обращаются в ноль при значениях j равных нулю или кратных 180° ; этим значениям j соответствует энергетический вакуум системы. Любые два таких соседних значения отделены друг от друга горбом, на котором внутренняя энергия, плавно увеличиваясь, достигает своего максимального значения.

Форма одномерного поля может быть представлена двумерным графиком. На рис. 3.3.2 ось x обозначает одномерное про-

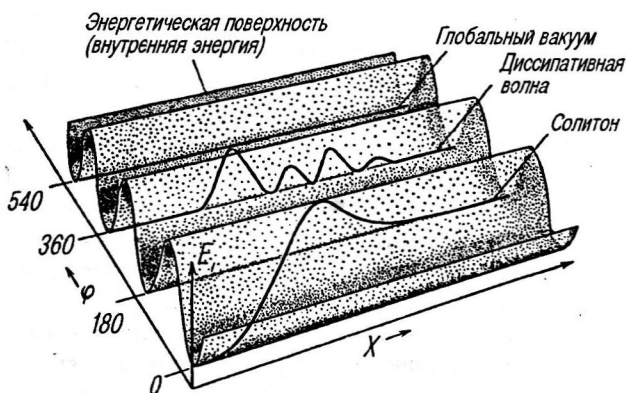


Рис. 3.3.2

Энергетическая поверхность (внутренняя энергия) поля синус-Гордона, иллюстрирующая топологические ограничения, гарантирующие стабильность солитона. Как диссипативная волна, так и солитон, обладают потенциальной энергией, а если они движутся, то и кинетической, но эти виды энергии на графике не изображены (по Ребби /1980/)

странство, а ось φ представляет все возможные значения поля. Для каждой точки x на плоскости делается отметка в том месте, которое соответствует значению поля в этой точке. Поскольку поле должно быть определено во всех точках x и поскольку значения поля должны образовывать континуум, то отметки на плоскости всегда образуют некоторую кривую. Линия, параллельная оси x , представляет состояние, в котором поле постоянно во всех точках x .

Для наглядной демонстрации вида внутренней энергии поля необходимо добавить третье измерение к рассматриваемой плоскости так, чтобы значения внутренней энергии были пропорциональны высоте над плоскостью. Для поля синус-Гордона точки, представляющие внутреннюю энергию $E_1(\varphi) = (\sin \varphi)^2$ при всех возможных значениях поля, образуют на рис. 3.3.2 волнообразную или гофрированную поверхность. Гребни волн энергетической поверхности параллельны оси x , а днища ее желобов соответствуют нулевой внутренней энергии.

В полученном трехмерном пространстве поле представляется утолщенной линией, лежащей на волнообразной («гофрированной») энергетической поверхности. Различным реальным вариантам возбуждений этого поля в рассматриваемом одномерном пространстве соответствуют различные варианты таких линий. Одним из вариантов является прямая линия, расположенная на дне желоба, соответствующем, скажем, $j = 180^\circ$. Поле в этом случае не меняется в пространстве и, если его ничто не возмущает, то оно не может меняться и во времени. Более того, поскольку при этом значении поля его внутренняя энергия обращается в ноль, то и полная энергия такого поля равна нулю. Поскольку при этом поле всюду одинаково, то оно называется глобальным вакуумом.

Другой конфигурацией поля является такая, при которой линия, лежащая на дне желоба нулевой энергии, подверглась некоторому возмущению. Возмущенная конфигурация поля представляется линией, которая сначала поднимается на один склон долины, но, не перевалив через гребень, возвращается ко дну и вновь взбирается на другой склон. Эти осциллирующие участки повторяются до тех пор, пока амплитуда их колебаний не станет пренебрежимо малой. Этот график соответствует такому волнообразному возмущению поля, которое, в конце концов, затухает. Там, где линия поля выше дна, поле имеет внутреннюю энергию, и

из-за того, что оно изменяется в пространстве, у него есть потенциальная энергия (в указанном выше смысле). Сам по себе процесс дисперсии привносит еще и кинетическую энергию. По мере распространения такой волны вдоль бесконечно длинной линии количество энергии на единицу длины стремится к нулю и поле возвращается к устойчивому состоянию глобального вакуума.

Наконец, солитонное поле синус-Гордона появляется, когда линия, представляющая состояние системы, взбирается со дна одной долины энергетической поверхности, переваливает через хребет и спускается на дно соседней долины. По обе стороны от перевала поле находится в устойчивых вакуумных состояниях, однако его значения в них различны. Например, значение поля во всех точках левее перевала может быть равно 180° , а правее перевала — 360° . В переходной области конфигурация поля имеет внутреннюю энергию, поскольку линия поля должна перевалить через хребет на энергетической поверхности, и потенциальную энергию, поскольку поле меняется в этой области от точки к точке.

Солитон представляет собой изгиб или излом линии, изображающей конфигурацию поля, и изгиб этот не может быть никаким образом ликвидирован, если координата x по обе его стороны не ограничена. Один конец линии прочно закреплен в вакуумном состоянии с $\varphi = 180^\circ$, а другой конец с $\varphi = 360^\circ$. Поскольку линия должна быть непрерывна, то где-то она обязательно пересечет энергетический максимум между этими двумя вакуумными состояниями. Солитон никогда не может затухнуть, а его энергия диссипировать.

Энергия солитона зависит от характера перехода между вакуумными состояниями. Потенциальная энергия минимальна, когда поле изменяется так медленно, как это только возможно, а следовательно, и линия поля пересекает хребет под очень острым углом, почти параллельно оси x . Однако при такой конфигурации линия поля поднята над дном долины на большую высоту на значительном расстоянии и ее внутренняя энергия велика. Внутренняя энергия становится минимальной, если линия поля пересекает хребет перпендикулярно к оси x , резко переходя от одного вакуумного состояния к другому, но в этом случае очень высока скорость пространственного изменения поля и потенциальная энергия достигает своего максимального значения. Минимум полной энергии солитона достигается при плавном пересечении хребта под некоторым промежуточным углом, таким, что при этом внутренняя и потенциальная энергия равны.

Солитон может быть приведен в состояние движения так, что его форма не изменится: область перехода между двумя вакуумными состояниями для этого должна скользить вдоль хребта с постоянной скоростью. Даже когда солитон находится в движении, ширина области перехода остается постоянной и единственное изменение в энергии сводится к добавлению слагаемого, отвечающего кинетической энергии.

СГ-уравнение не ограничивает возможное число солитонов и, в принципе, может существовать неограниченное число солитонов и антисолитонов. По определению солитоном в данном случае называется излом, при котором значение поля увеличивается (от одного вакуумного значения до другого) при возрастании x , и антисолитоном — излом, при котором значение поля уменьшается при возрастании x . Эти солитоны часто называются также кинками и антикинками (от английского *kink* — перегиб), причем кинку приписывают топологический заряд «+1», а антикинку — «-1». Очень легко создать солитон-антисолитонную пару (или пару кинк-антикинк) из состояния глобального вакуума. Для этого необходимо просто «приподнять» линию, лежащую соответственно на дне желоба, взявшись за любую ее не концевую точку (линия условно бесконечна, а потому за конец ее приподнять нельзя), и перебросить (не разрывая) приподнятую часть линии через хребет на дно соседней долины. На рис. 3.3.3 показано, что при этом одновременно образуются изломы обоих знаков, т.е. солитон и антисолитон с суммой топологических зарядов, равной нулю. В квантовой механике эта процедура демонстрирует рождение частицы и античастицы. В силу топологического характера кинки могут рождаться только парами (кинк и антикинк) при внешнем воздействии на систему.

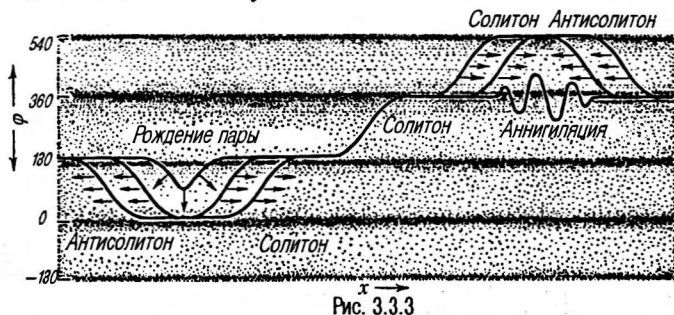


Рис. 3.3.3

Рождение и аннигиляция солитонов СГ-уравнения (по Ребби /1980/).

Существует и обратный процесс: столкновение солитона и антисолитона. СГ-уравнение обладает специальным свойством, позволяющим солитону и антисолитону покинуть область столкновения не изменившимися, однако легко так модифицировать уравнение, что при столкновении волны будут аннигилировать. Оба излома исчезнут, а их энергия перейдет в энергию обычной волны и равномерно распределится по всему состоянию глобального вакуума. Подобный процесс аннигиляции наблюдается также и для обычных частиц и античастиц.

Можно отметить, что качественное подобие между взаимодействующими солитонами СГ-уравнения и взаимодействующими частицами специального вида в квантовой физике расширено до формальной эквивалентности. В 1958 г. Тирринг сформулировал квантовомеханическую модель частиц и античастиц, движущихся в пространстве с одним измерением. Как позже было показано, модель Тирринга и солитоны СГ-уравнения описывают одни и те же явления.

Известна простая действующая модель энергетической поверхности поля синус-Гордона. Куску плотной бумаги придается форма гармоника или, если удастся, форма плавной волнообразной поверхности, на которую помещается гибкая цепочка для часов. Если цепочка начинается на дне одного желоба, а кончается на дне другого, то в области перехода цепочки из одного «вакуума» в другой должен существовать солитон. Абсолютное сохранение солитона в такой модели увидеть невозможно из-за конечных размеров цепочки и поверхности, но некоторые другие свойства наблюдать можно. Например, наклонив поверхность, можно заставить солитон двигаться, а действуя очень осторожно, можно даже наблюдать рождение и аннигиляцию солитон-антисолитонных пар.

Дополнительно отметим, что в случае двумерных и трехмерных пространств для возникновения топологических солитонов также необходимо, чтобы поле стремилось к различным вакуумным значениям при движении в любом из возможных направлений (подробнее см. у Реббн /1980/).

Заканчивая это наглядное пояснение свойств солитонов СГ-уравнения, заметим в связи с биосолитонной концепцией, что в биотелах многие протяженные структуры могут быть интерпретированы как, прежде всего, одномерные среды (поля), на протяжении которых (в том числе на концах) имеются вакуумные значения, разделенные состояниями с положительной внутренней

энергией. В таких средах при их возбуждении естественно возникновение топологических солитонов. В предыдущем параграфе уже было введено понятие о биоэластиках как биологических аналогах сегнетоэластиков, самопроизвольно образующих домены с солитонными стенками в связи именно с СГ-уравнением.

Обратимся теперь к бризерам, которые связывают два однопараметрических кинка с противоположными топологическими зарядами «+1» и «-1» и при этом являются двухпараметрическими солитонами. Связанные кинки разного знака колеблются относительно общего центра тяжести с амплитудой, обратно пропорциональной логарифму частоты их осцилляций. В связи с этими колебаниями могут наблюдаться так называемые солитоны огибающей, имеющие внутреннее осцилляционное наполнение (подробнее см., например, у Косевича и Ковалева /1989, с. 170–179/). При уменьшении частоты размах колебаний в бризере логарифмически возрастает (не это ли мы наблюдаем при многих видах тремора и дрожания у человека и животных, когда крупноамплитудному тремору, например, у больных паркинсонизмом соответствует сравнительно низкая частота?), и при стремлении частоты осцилляций к нулю бризер как связанное состояние «разваливается» на свободные кинк и антикинк. Если же к нулю стремится амплитуда бризера, то он делокализуется и превращается в линейное волновое решение СГ-уравнения — фонон.

Если не рассматривать пространственно-периодические решения СГ-уравнения и ограничиться возбуждениями системы при нулевых граничных условиях на бесконечности, то бризерные решения и кинки разных знаков исчерпывают все солитонные возбуждения. Это значит, что если в начальный момент времени $t = 0$ задать пространственно локализованные, достаточно плавные и быстро убывающие с координатой распределения смещений $U(x, t=0) = U_0(x)$ и скоростей $U|_{t=0} = V_0(x)$, то в пределе $t \rightarrow \infty$ решение представляет набор конечного числа бионов и кинков (и периодических волн нулевой амплитуды). Благодаря этому обстоятельству солитонные решения играют особо важную роль в физике при описании динамики и термодинамики нелинейных эволюционных систем — в их терминах исследование возбужденных состояний особенно просто и адекватно. В отличие от топологических солитонов, давно применяемых для описания дислокаций и доменных границ, двухпараметрические солитоны бризерного типа (имеющие нулевой топологический заряд и

потому не являющиеся топологическими солитонами) начали исследоваться гораздо позже из-за их более сложной структуры и трудностей учета их вклада. Бризеры представляют собой наиболее общий вид солитонных возбудений, включая линейные волны и кинки как предельные случаи. Особенно важна роль двухпараметрических солитонов в кинетике, в частности, при описании процессов, связанных с возникновением солитонов. В силу топологического характера кинки, как уже говорилось, могут рождаться только парами при внешнем воздействии на систему. При этом неизбежным этапом процесса являются бризерные состояния. Элементарные возбудения, возникающие под воздействием внешних полей, образуют вначале малоамплитудные бризеры, с ростом амплитуды последних они трансформируются в связанные состояния кинка и антикинка, рождая при дальнейшем росте энергии свободные топологические солитоны. Аналогично при аннигиляции кинки также проходят «бризерную фазу». В общем случае в физике считается, что возбуденные состояния нелинейных конденсированных сред можно описывать в терминах газов частиц трех сортов: элементарных возбудений (линейных волн), кинков и бризеров, которые взаимодействуют друг с другом и находятся в состоянии термодинамического равновесия. Малоамплитудные локализованные решения СГ-уравнения связаны с решениями солитонного нелинейного уравнения Шредингера (Косевич, Ковалев /1989, с. 170/).

Во многих физических приложениях СГ-уравнение применяется для описания нелинейных волновых явлений, связанных с вращением, например, для описания вращательных фазовых переходов в молекулярных кристаллах; вращения вектора намагниченности у ферромагнетиков (движение доменных стенок); и пр. Соответствующие солитонные решения, характеризующие вращение с монотонным изменением угла, являются устойчивыми и их именуют спиральными решениями, спиральными волнами, спиральными волновыми пакетами и т.п. Если названный угол изменяется всего на 2π (т.е. имеет место всего один цикл полного оборота, а не много циклов, как при периодических спиральных волновых пакетах), то реализуется одиночная петля в виде уединенной волны (Уизем /1977, с. 499, 578–580/). Не с этими ли солитонными спиральными волнами связаны спиральные формы биологических тел, настолько широко реализуемые в живой природе, что Cook /1914/ посвятил им книгу с харак-

терным названием «Линии жизни»? И не они ли являются ключом к разгадке многих механизмов наследования, отраженных, например, в суперспиральном строении и работе хромосом?

В качестве исторической справки упомянем также, что СГ-уравнение давно и хорошо известно в геометрии (в переменных x, y , а не x, t). По существу, оно впервые появилось еще в 1878 г. в работе Чебышева «О кройке одежды» в связи с задачей об «одевании» поверхности постоянной отрицательной кривизны (плоскости Лобачевского). В этой связи можно каждому решению СГ-уравнения дать геометрическую интерпретацию.

В заключение раздела приведем некоторые известные аналитические выражения. Для СГ-уравнения (1.3): $U_{xx} - U_{tt} = \sin U$, где индексы соответствуют частным производным по x и по t , односолитонные решения (кинк $U_+(x, t)$ и антикинк $U_-(x, t)$) имеют вид:

$$U_{\pm}(x, t) = 4 \operatorname{arctg} \exp [\pm(1 - \nu^2)^{-1/2}(x - \nu t - x_0)].$$

Бризер записывается так:

$$U(x, t) = 4 \operatorname{arctg} \left\{ v \sin [(w_1(1 - \nu^2)^{-1/2})(t - \nu x + \varphi_0)] / \mu \operatorname{ch} [(w_2(1 - \nu^2)^{-1/2})(x - \nu t - x_0)] \right\},$$

где $\mu = \operatorname{Re} E$, $v = \operatorname{Im} E$, $w_1 = \operatorname{Re} E / |E|$, $w_2 = \operatorname{Im} E / |E|$, $\nu = (1 - |E|^2) / (1 + |E|^2)$, E — комплексное число ($\operatorname{Im} E > 0$). Энергия, импульс и другие полезные характеристики покоящегося и движущегося бризера аналитически выведены Тахтаджяном и Фаддеевым /1974/, а полное описание решений СГ-уравнения дано Захаровым, Тахтаджяном и Фаддеевым /1974/.

В частности, энергия покоя бризера может иметь значение от 0 до суммарной массы покоя двух отдельных солитонов, равной 16. Следовательно, даже малого количества энергии может оказаться достаточным для возбуждения бризера (Додд и др. /1988, с. 440/).

Многосолитонные решения СГ-уравнения находятся, например, с помощью так называемого преобразования Беклунда (подробнее см., например, Додд /1988/, Косевич и Ковалев /1989/). С помощью этого преобразования можно строить иерархии решений, каждое из которых конструируется из предыдущих.

СГ-уравнение имеет связи с квантовой механикой, квантовым уравнением Шредингера и бозонами Голдстоуна (Додд и др. /1988, с. 47–51, 523/). Скирм в 1958 г. предложил нелинейную теорию поля с уравнением поля в виде СГ-уравнения (в скалярном случае и для случая одномерного пространства)

(Додд и др. /1988, с. 26/). Возмущенное СГ-уравнение $U_{xx} - U_{tt} = \sin U + aU_t - bU_{xxt} - c$ моделирует так называемые контакты Джозефсона и имеет «гроздевидные» солитоны, в которых два или более кинка связываются вместе и в виде устойчивой конфигурации движутся взад и вперед через контакт Джозефсона (Додд и др. /1988, с. 639/).

Интересный ряд задач в теории солитонов связан с многомерными аналогами СГ-уравнения (см., например, Додд и др. /1988/) и кратными (multiple) СГ-уравнениями, которые могут иметь биологические приложения.

Глава 4

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ДОМЕНЫ И БИОСОЛИТОННЫЕ ДОМЕННЫЕ СТЕНКИ

Биологические тела в ходе онто- и филогенеза разделяются по неизвестным законам на многочисленные части — молекулярные ультраструктуры, клетки, ткани и пр. — с вероятным участием механических напряжений. В рамках биосолитонной концепции с учетом сказанного о доменообразовании в предыдущей главе нами обнаруживается возможность трактовать многие из этих морфологически обособленных частей организма как биологические домены (области спонтанной «упорядоченности» в широком смысле), разделенные солитонными доменными стенками. Наши исследования показали полезность такой интерпретации. Ее началам посвящена эта глава.

Названные биодомены тела зачастую многократно повторяются, образуя симметричные последовательности. Следует отметить, что еще Аристотель обратил пристальное внимание на блочные принципы строения биотел: эти тела зачастую состоят из набора одинаковых по форме блоков, взаиморасположение которых определяется отношениями симметрии. Так, тело многоножки состоит из повторяющихся сегментов, взаимосвязанных отношениями трансляционной симметрии; цветки растений зачастую состоят из лепестков, взаимосвязанных отношениями симметрии вращения; тела многих животных состоят из зеркально симметричных половин, и т.п. Этот симметрично-блоч-

ный принцип строения реализуется на самых разных линиях и уровнях биологической эволюции (обзоры имеются в наших работах — Петухов /1981, 1988/). Из естественнонаучного осмысления явлений членения тела живых организмов на симметричные блоки в древности родилось само понятие симметрии и развилась современная наука о симметрии, занявшая место одной из основ современного математического естествознания.

4.1. Биологические домены

Во избежание терминологической путаницы сразу уточним, что понятие домена людьми зачастую применяется в разных смыслах. В одном из них — литературном, максимально широком — оно выступает синонимом слов «область» или «сфера». В этом смысле, например, отдельные лужи на асфальте могут быть названы «доменами». Такие отдельные домены могут вести себя совершенно независимо друг от друга, например, вычерпывание одной лужи никак не сказывается на состоянии других. В биологии и других науках описательного характера термин домен давно употребляется именно в подобном или близком смысле для обозначения выделенных областей.

Другой, значительно более узкий смысл стоит за понятием домен при его применении в физике явлений коллективного поведения в нелинейных средах — сегнетоэластиках, ферромагнетиках и т.п. В этом случае речь идет о спонтанном образовании разделенных солитонными стенками областей — доменов — с однородным внутри каждой такой области «упорядочиванием» или «агрегированием», которое различается по ориентации в соседних областях. Физическая природа этого «упорядочивания» может быть различной, например, оно может выступать в виде деформации у сегнетоэластиков или намагниченности у ферромагнетиков. В этом случае домены одной связки оказываются сильно взаимозависимыми и изменение характеристик одного из них сказывается на характеристиках других. Специфическими особенностями таких доменов являются:

- спонтанность (самопроизвольность) их образования при определенных внешних условиях,
- наличие солитонных доменных стенок, имеющих повышенную концентрацию энергии и способных к непрерывному

или скачкообразному движению при действии внешних факторов (включая возникновение новых стенок и исчезновение старых); сюда же относятся явления гистерезиса и скачки Баркгаузена, регистрируемые в физических экспериментах в связи со скачкообразным движением солитонных стенок при преодолении ими препятствий типа дефектов в кристаллах;

- разная по ориентации упорядоченность в соседних доменах;
- однородность упорядоченности внутри одного домена.
- взаимозависимость внутри множества доменов и доменных стенок, связанная с подчиненностью всего явления доменобразования интегральному энергетическому критерию.

Именно в этом узком, коллективно-поведенческом смысле нами будет употребляться понятие биодоменов.

Мы полагаем, что живая материя обладает очень развитой доменообразовательной способностью или способностью порождать биосолитонные доменные стенки. Многоблочные биообъекты зачастую представляют из себя последовательности биодоменов, взаимосвязанных отношениями зеркальной, трансляционной, вращательной, масштабной симметрии или более высоких, неевклидовых симметрий. Для живого характерно, что один биологический домен при ближайшем рассмотрении обычно предстает как полидоменная структура, т.е. в биотелах реализуется принцип иерархических или многоуровневых доменов: домен одного уровня может включать в себя домены более низкого уровня и т.д. Соответственно биосолитонные доменные стенки одного уровня обычно содержат более мелкие биосолитонные стенки низшего уровня и сами охвачены биосолитонными стенками более высокого уровня.

В биологии давно утвердился термин «суперспираль», означающий распространенную в биообъектах усложненную спиральную конструкцию, в которой одна спираль (например, меньшая по сечению своей нити) намотана с некоторым шагом на другую спираль, имеющую больший шаг и в свою очередь намотанную на третью спираль и т.д. Для однотипности терминологии можно называть вышеуказанные многоуровневые биодомены «супердоменами», имея ввиду под приставкой «супер» именно иерархичность, многоуровневость.

Разноуровневые спиральные укладки биодоменного типа очень характерны для биообъектов. На рис. 4.1.1 *а* приведена

тонкая структура клеточной оболочки млечников *Euphorbia splendens*. Рассматриваемые растительные клетки, имеющие на верхушке побега растения диаметр в 3 мкм, затем превращаются в трубки диаметром 60 мкм с многослойной оболочкой общей толщиной 10 мкм. В ходе онтогенеза клетки происходит образование этих слоев, как «ламелл спиральной структуры, причем в последовательно сменяющих друг друга слоях направление спирализации меняется: спираль закручивается то по направлению часовой стрелки, то против нее» (Фрей-Висслинг, Мюлеталер /1968, с. 371/). Эти слои, отличающиеся направлением укладки спиралей, представляются нам одним из примеров биодоменов.

Известно много других примеров многослойного устройства биотел, при котором наблюдается перекрещивание направлений упорядочивания соседних слоев: в каждом слое фибриллы укладываются однородным образом — параллельно друг другу, но ориентация этих параллелей в соседних слоях резко различается. Один из таких примеров, демонстрирующий, что число таких биодоменов в одной упаковке может исчисляться многими сотнями, дает оболочка морской водоросли *Valonia*. Эта оболочка толщиной около 40 мкм содержит примерно 800 слоев (ламелл). Каждая ламелла толщиной 500Å (состоящая из субслоя микрофибрилл толщиной 250Å и такого же субслоя матрикса) включает в себя уложенные параллельно друг другу фибриллы. Ориентация этих параллелей в соседних слоях взаимопересекается: при переходе к соседнему слою она меняется примерно на 60°. Фрей-Висслинг и Мюлеталер /1968, с. 366–371/ в книге о растительных клетках приводят обзор исследований многих авторов по таким слоевым укладкам, отмечая, что «во всех этих случаях в оболочках выявляется система параллельно текстурированных ламелл, разделенных прослойками пластического матрикса».

Такие же слоевые структуры с взаимопересекающейся у соседей ориентацией реализуются и в животных организмах. Например, в роговице глаз «волокна коллагена образуют ламеллы одинаковой толщины и выглядят как пачки пластин. Оси волокон соседних ламелл сильно наклонены друг относительно друга» (Браун и Уолкен /1982, с. 156/).

В виде краткого отступления отметим, что вопрос о спиральных укладках для биологии особенно интересен не только в силу их частой биологической реализации, но и потому, что с ними тесно связаны многие физиологические процессы, а также

механизмы передачи наследственной информации, включая двойную спираль ДНК. Например, хромосомы представляют собой, как известно, суперспирали высокого порядка (рис. 4.1.1 б), способные на некоторых участках — в местах активации генов — частично релаксироваться и т.д. Солитоны СГ-уравнения (прежде всего, «спиральные волны») имеют в проблематике биоспиралей интересные перспективы.

Приведем другие примеры биодоменов. На рис. 4.1.1 в представлено предполагаемое молекулярное строение слоев крахмального зерна доменного типа с антипараллельной ориентацией молекул амилопектина (Фрей-Висслинг и Мюллеталер /1968/). У всех живых организмов основу плазматических мембран образует доменообразная конструкция — двойной слой липидных молекул, полярные группы которых расположены на внутренней и наружной поверхности мембраны, аполярные — внутри мембраны.

На рис. 4.1.2 а приведена схема другого часто встречающегося варианта биологических супердоменов в виде разделенных стенкой двух больших и примерно зеркально симметричных областей с упорядоченным содержимым. Каждая из них включает в себя уложенные наискосок параллельные полосы, содержащих в случае реальных биообъектов при ближайшем рассмотрении еще более мелкие домены. Читатель, пытающийся по этой форме отгадать, о каком биообъекте идет речь, может в равной мере правильно назвать множество совершенно разных биологических образований с такой структурой. Это, например, перья птиц; листья растений с распространенным типом «перистого» жилкования, который из-за сходства с перьями в биологии официально называется «перистым»; по той же причине носят свое название «перистые» усики насекомых и «двуперистая» мышца (сгибатель большого пальца — *m. flexor hallucis longus*, и др.; на рис. 4.1.2 б приведена схема строения перистых мышц из книги Гурфинкеля и Левика /1985/), и т.д. Отметим, что аналогичные косые супердоменные структуры с зеркальной симметрией, демонстрируемые на рис. 4.1.2 в (по Хачатуряну /1974/), хорошо известны в кристаллографии гетерофазных сплавов; этим аналогиям посвящен следующий параграф.

Супердоменный характер демонстрирует строение птичьего пера, у которого такая перистость повторяется на разных уровнях (рис. 4.1.2 г). Центральный стержень пера разделяет его на две симметричные половины с однородной ориентацией остистых

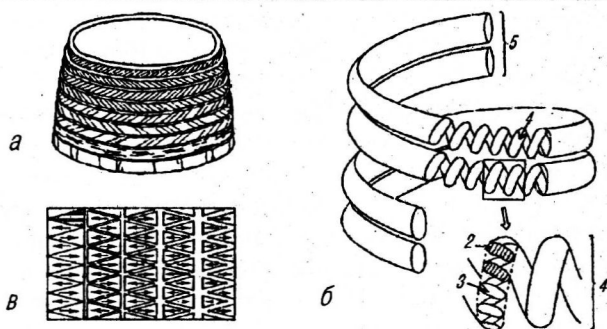


Рис. 4.1.1

Примеры биодоменов. *а* — оболочка млечников; *б* — предполагаемая биологами суперспиральная структура хромосом (цифрами указаны спирали со 2-го по 5-ый порядок); *в* — слои крахмального зерна (из Фрей-Висслинга и Мюлеталера /1968/).

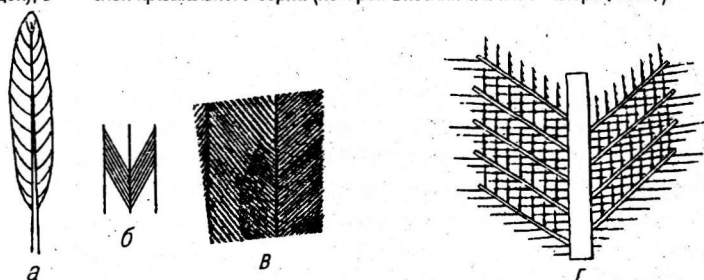


Рис. 4.1.2

Схема «перистых» структур. *а* — общая схема перистых биодоменов; *б* — схема перистых мышц; *в* — упругие домены в сплаве CuAu (по Хачатуряну /1974/); *г* — птичье перо как супердоменная конструкция с многоуровневой перистостью (по Гессе /1912/).

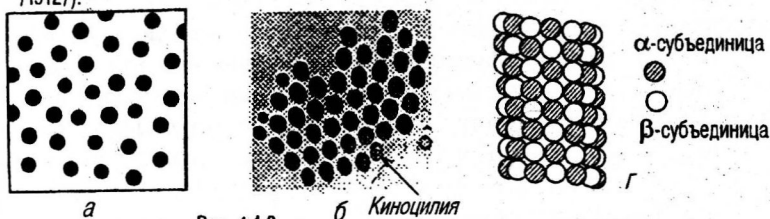
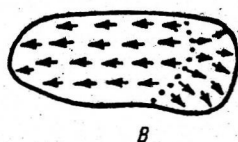


Рис. 4.1.3

Примеры доменов. *а* — цилиндрические магнитные домены; *б* — срез пучка волосков отолитовой макулы мыши; *в* — карта отолитовой макулы с указанием ориентации локальных рецепторных структур; каждая стрелка соответствует одному пучку и его ориентации (по Винникову /1979/); *г* — доменное строение микротрубочки (по Каппуччинелли /1982/).



отростков в каждой. Эти две половины пера могут интерпретироваться как два домена, разделенных биосолитонной доменной стенкой. Каждый остистый отросток в этих доменах сам выступает в роли доменной стенки для более мелких, но также однородно ориентированных остистых отростков следующего уровня доменизации, и т.д. Этот пример иерархической биодоменизации замечателен не только своим фрактальным характером, но и наглядной демонстрацией того, что вся многоуровневая биодоменная конструкция может быть построена *только из солитонных доменных стенок*, которые способны выступать элементами доменных укладок на предыдущем уровне доменизации. Тем самым, супердоменность в биологии, по крайней мере иногда, строится целиком на солитонных доменных стенках. Многократно оперируя одним и тем же математическим уравнением для солитонной доменной стенки, можно построить математическую модель всего пера. Подобный же характер имеет иерархическая биодоменная система жилкования листьев у растений.

Многие виды доменов, наблюдаемые в небιологических кристаллах, имеют выразительное сходство с некоторыми доменоподобными биообразованиями, хотя видов последних много больше. Так, в биотелах распространены пакеты или группировки доменообразных цилиндрических структур (их можно назвать цилиндрическими биологическими доменами или, кратко, ЦБД), напоминающих цилиндрические магнитные домены, но имеющих, конечно, иную, не магнитную природу кооперативных сил образования. К числу таких группировок ЦБД относятся пучки волосков рецепторной клетки вестибулярного аппарата. На рис. 4.1.3 б приведен срез такого регулярного пучка волосков отолитовой макулы мыши (Винников и др. /1971/). Функционально наиболее важный из этих волосков — киноцилия — окружен другими волосками — стереоцилиями (на рисунке им соответствуют темные овалы). Киноцилия находится на краю этой группы и содержит в себе меньшие по размеру ЦБД, расположенные по схеме «9+2» как на рис. 2.4.4.

Данные ЦБД в виде микротрубочек сами построены из более мелких биодоменов. На рис. 4.1.3 г из Каппуччинелли /1982/ это показано в виде черных и белых сферообразных субъединиц, попеременно расположенных в спирализованных стенках микротрубочки. Речь идет о том, что микротрубочки сложены из тубулина — специального белка, выделяемого из биообъектов в лабораторных условиях в виде димеров, т.е. в виде двух связан-

ных в единое образование субъединиц, называемых альфа — и бэта-тубулином и помеченных на рисунке черным и белым. Эти субъединицы имеют одинаковую молекулярную массу 55000, но каждая из них кодируется своей матричной РНК и отличается от другой по последовательности и составу аминокислот.

Возвращаясь к рассматриваемому пучку волосков, отметим, что стереоцилии в нем собраны (доменизированы) в однородные по составу ряды, в каждом из которых высота стереоцилий одинакова, но каждый ряд резко отличается от соседнего стандартной высотой своих стереоцилий, и т.д.

Вся группа волосковых клеток с рис. 4.1.3 б также является всего лишь единичным образованием в биодомене более высокого уровня, показанном на рис. 4.1.3 в, на котором каждая отдельная стрелка соответствует одному такому пучку волосков и направлена в сторону расположения киноцилии в пучке. Видно, что все множество стрелок (т.е. пучков, ориентированных расположением киноцилий в них) разделено на два биодомена, однородных по внутреннему составу стрелок, но различающихся между собой противоположным направлением стрелок. Эти два биодомена разделены четко выраженной полосой, представляющей собой солитонную доменную стенку. Направление стрелок соответствует не только морфологии, но и функционированию пучка волосков как рецепторного образования. В покое от него по отходящему нерву отводится стабильная частота нервной импульсации с частотой около 100 Гц. При отклонении этого пучка под действием внешней силы раздражителя в сторону киноцилии частота этой импульсации увеличивается примерно пропорционально отклонению, а при отклонении пучка в сторону от киноцилии — уменьшается. В связи с этим говорят о морфофункциональной поляризации данных рецепторных образований в смысле наличия в них двух выделенных противоположных направлений с противоположными знаками реагирования. Вся отолитовая макула на рис. 4.1.3 в, будучи расположенной в одной половине головы, имеет своего зеркального двойника в противоположной половине.

Другой пример цилиндрических биодоменов дают наборы параллельно уложенных волокон в поперечно-полосатых мышцах. На рис. 4.1.4 а приведен поперечный срез такой мышцы, состоящий из волокон диаметром около 50 мкм. Каждое из этих волокон само состоит из множества более мелких фибрилл диаметром 1–1,5 мкм, образующих домены второго уровня. Отслеживая строение этих

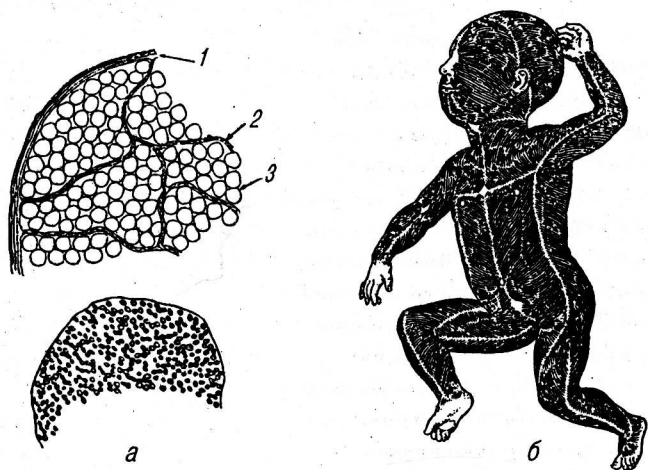


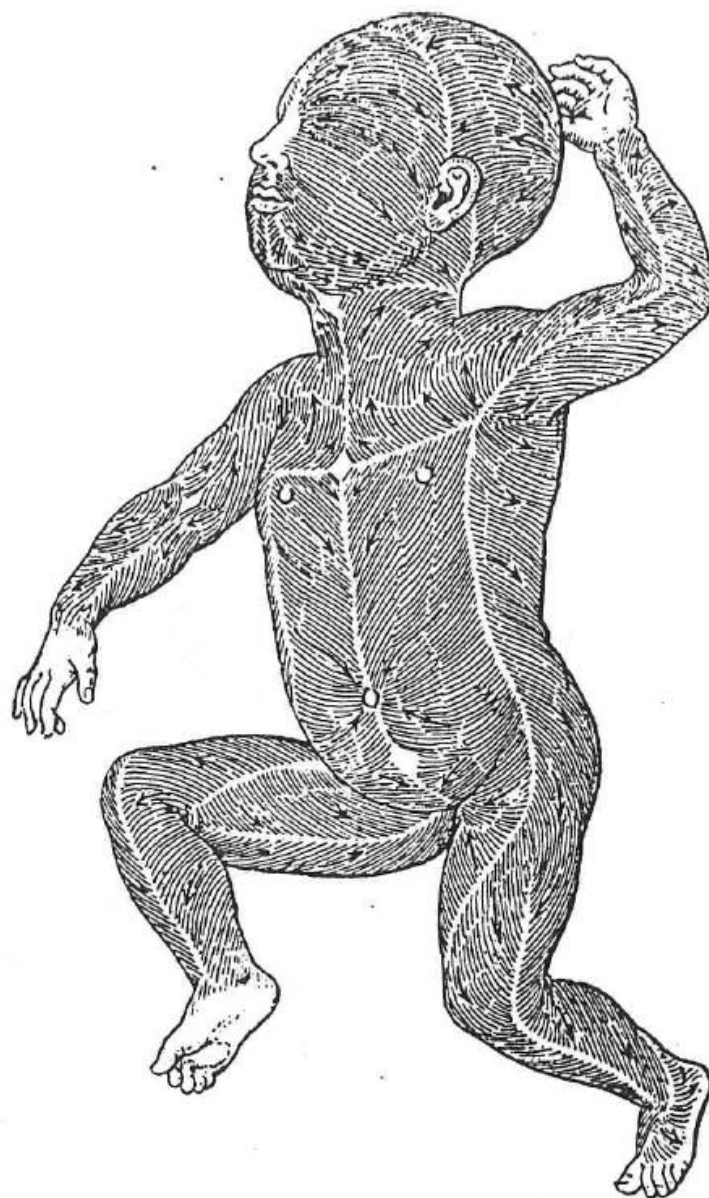
Рис. 4.1.4

Биодомены. *а* - поперечные сечения пучка мышечных волокон (сверху) и части мышечного волокна (снизу) (из Бендолла /1970/); *б* - направление волосяных токов на человеческом теле (из Бушана /1911/)

мышц как биологических супердоменов, можно отметить, что каждая из мышечных фибрилл по длине разделена на так называемые саркомеры — регулярные участки стандартной длины, и т.д.

На рис. 4.1.4 б показан биодоменный характер волосяного покрова на теле человека. Все тело человека предстает здесь как разделенное четкими границами на области с различной ориентацией так называемых волосяных токов. Эти токи однородны внутри каждой области и идут, как считается, по спиралям подобно волосам на макушке головы у человека. По обе стороны от каждой границы области имеют волосяные токи существенно различной ориентации. Эти границы в виде белых линий представляют, по нашему мнению, биосолитонные доменные стенки. Волосяные токи соответствуют распределению волосяного пушка, появляющегося на теле человека (а также на теле имеющих шерсть животных) еще в эмбриональном состоянии. Подробнее об этом сказано в книге Бушана /1911/, из которой взят рисунок. Данная карта волосяного покрова напоминает рассмотренную выше картину поляризации отолитовой макулы (рис. 4.1.3 в).

Отметим, что в биомеханике биологические ткани принято рассматривать как некие многоуровневые композитные материалы вне



К рисунку 4.1.4. о биодоменах.
Доменная организация волосяных токов
на человеческом теле (из Бушана /1911/)

связи с механизмами доменообразования. В работе Мелниса и др. /1986/ показано, что костная ткань как композит имеет пять уровней структуризации, сухожилия — шесть, древесина — семь и т.д.

Мы полагаем оправданным исследовать всякий живой организм, в том числе человека как *биологический супердомен высокого уровня с соответствующим суперансамблем биосолитонных стенок*. По аналогии с тем, что в кристаллах рост доменов обусловлен движением солитонных доменных стенок, в рамках биосолитонной концепции биологический рост и многие другие биологические трансформации рассматриваются нами как обусловленные движением биосолитонных доменных стенок.

Систематическое изучение биодоменов, которое представляется полезным для большого числа биологических задач, включая деление клеток, функционирование мышц и т.п., требует соответствующих методов наблюдения биодоменов на микро — и макроуровнях. Видимо, они могут быть во многом заимствованы из кристаллографии и металловедения, за многие десятилетия исследования кристаллографических доменов развивших целый ряд таких методов. Например, для визуализации доменов в сегнетоэлектриках применяются одиннадцать основных методов (из которых первые пять используются для наблюдения доменов в объеме кристалла, а остальные — для выявления областей пересечения доменов с поверхностью кристалла): оптическое дву-преломление; оптическое вращение; генерация второй гармоники; электронная микроскопия; пирозлектрический метод; химическое травление; порошковые методы; метод росы; метод жидких кристаллов; рентгенотопография; ультрафиолетовая фотоэмиссия (Лайнс, Гласс /1981/).

В живых телах доменообразование происходит в условиях значительной биохимической неоднородности их состава. Это обусловлено, видимо, тем, что различные биохимические компоненты синтезируются в организме так, что их совокупность может вести себя в отношении доменообразования во многом аналогично кристаллической среде. Другими словами, при биологическом синтезе в организме имеет место жесткий отбор соединений по критерию способности к особым коллективным формам поведения.

В кристаллографии также известны феномены доменизации и супердоминизации в неоднородных по химическому составу кристаллических средах, к рассмотрению которых перейдем, отмечая их аналогии с биоморфологическими явлениями.

4.2. Аналогии между биодоменами и упругими доменами гетерофазных сплавов

Анализ существующей физической литературы по доменам обратил наше внимание на гетерофазные сплавы или твердые растворы, в которых проявляются макроскопические феномены доменизации и супердоменизации, во многом напоминающие биологические. В предыдущем параграфе на рис. 4.1.2 *в* уже демонстрировалась одна из таких структур — перистая. На рис. 4.2.1 представлены некоторые другие примеры, способные вызвать у биологов ассоциацию со структурами поперечно-полосатых мышц, периодической исчерченностью волокон коллагена, клеточными оболочками водорослей с перекрестно-параллельной текстурой и пр. В данной области знаний развита теория упругих доменов для объяснения наблюдающихся в таких сплавах модулированных периодических макроструктур. Эти материалы из области кристаллографии позволяют лучше понять явления биодоменов и возможности интерпретации живого организма с солитонно-доменных позиций. Поэтому скажем о них подробнее.

Изложение сведений о гетерофазных сплавах проведем по монографии Хачатуряна /1974/, при цитатах из которой будем в скобках указывать номер страницы. В технике используются сплавы, находящиеся как в гомогенных, так и — чаще всего — в

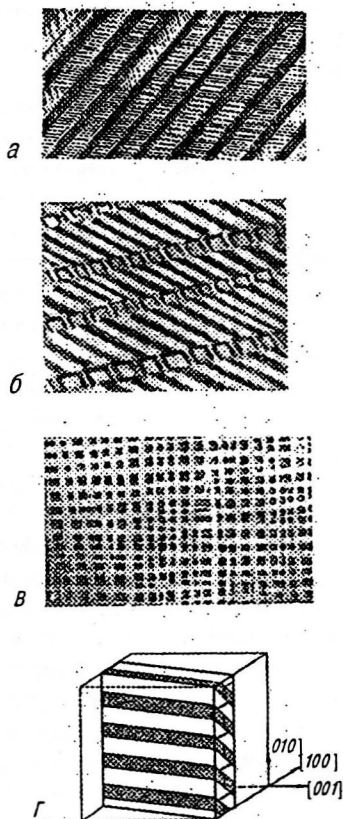


Рис. 4.2.1

Примеры периодических структур или систем упругих концентрационных доменов в гетерофазных сплавах: *а* — дигидрит циркония (увеличение 1500); *б* — сплав NbTe_2 (увеличение 16000); *в* — сплав тикональ (увеличение 100000) (по Хачатуряну /1974/)

гетерофазных (гетерогенных) состояниях. В первом случае материал представляет собой однофазный твердый раствор, физические свойства которого в основном определяются структурой кристаллической решетки. Во втором случае это смесь фаз, отличающихся друг от друга составом и кристаллической структурой. Именно это последнее состояние реализует многие особые физические свойства сплавов: высокую механическую прочность и жаростойкость, высокую коэрцитивную силу, аномально низкую электропроводность, большое критическое поле в сверхпроводниках и пр.

Фазовые превращения в твердых растворах во многих случаях могут рассматриваться как результат спонтанного перераспределения атомов по узлам некоторой кристаллической решетки. Если перераспределение атомов происходит в масштабах, существенно превышающих межатомные расстояния в решетке, то происходит расслоение (распад) однородного твердого раствора на две или более фазы, отличающиеся друг от друга составом.

Высокотемпературное состояние рассматриваемых сплавов представляет собой однородный твердый раствор, в котором атомы компонентов хаотическим образом распределены по узлам кристаллической решетки, такое состояние является неупорядоченным. В неупорядоченном состоянии вероятность заполнения любого узла атомом определенного сорта есть величина постоянная, равная атомной доле этого компонента. При понижении температуры происходит фазовый переход типа порядок-беспорядок. В результате фазового перехода узлы кристаллической решетки неупорядоченного раствора разбиваются на несколько подрешеток. «В геометрическом отношении каждая подрешетка представляет собой пространственную сетку, основные трансляции которой в целое число раз больше, чем соответствующие основные трансляции неупорядоченного раствора... Упорядоченные фазы, возникающие в результате разбиения решетки неупорядоченного кристалла на несколько кристаллографически неэквивалентных подрешеток, обычно называют сверхструктурами» /с. 9–10/.

Таким образом, процесс упорядочения заключается в перераспределении атомов разного вида между различными подрешетками. Он всегда сопровождается понижением симметрии пространственной группы кристалла. В самом деле, все преобразования симметрии неупорядоченного кристалла, совмещающие друг с другом узлы, принадлежащие к различным подрешеткам, перестают быть

элементами симметрии упорядоченного кристалла, так как в последнем эти узлы становятся кристаллографически неэквивалентными. Кристаллографическая симметрия упорядоченной фазы всегда является подгруппой симметрии неупорядоченной фазы.

Физической причиной упорядочения является взаимодействие между атомами компонентов, составляющих твердый раствор. Взаимное расположение атомов компонентов в упорядоченном твердом растворе определяется условием минимума внутренней энергии. «При фазовых превращениях порядок-беспорядок однородное распределение атомов по узлам кристаллической решетки испытывает пространственно-периодическую модуляцию» /с. 31/. При этом «процесс упорядочения может происходить в несколько этапов с образованием сверхструктур, последовательно сменяющих друг друга при понижении температуры» /с. 102/. На примерах гидритов показано, что «монокристаллы упорядоченных фаз не являются монокристаллами в обычном смысле этого слова. Они представляют собой систему антифазных доменов упорядочивания, различным образом ориентированных относительно кристаллографических осей... В этой ситуации мы, по существу, имеем дело с поликристаллом, обладающим сильно выраженной текстурой» /с. 152/. При этом в организации доменов наблюдается многоуровневость, для описания которой Хачатурян употребляет термин «колония», например, «колонии периодически чередующихся пластинок» /с. 299/ или «колоний одномерных модулированных структур» /с. 308/.

Уже упоминавшиеся особые физические свойства, реализуемые в гетерофазных сплавах и вызвавшие их преимущественное использование в технике, «оказываются резко зависящими от морфологии, пространственных масштабов гетерофазной структуры (субструктуры) и характера сопряжения фаз... Рентгеновские и особенно электронномикроскопические исследования показали, что существует большое разнообразие гетерофазных структур, отличающихся друг от друга формами и ориентировками включений относительно кристаллографических осей матрицы, а также их взаимным расположением. Эти три фактора определяют понятие морфологии гетерофазного кристалла. В настоящее время обнаружены самые различные формы выделений: сферические, полиэдрические, пластинчатые, игольчатые и т.д. В некоторые случаи отмечалось изменение формы выделений в ходе самого процесса распа-

да. Однако наиболее интересная особенность субструктуры гетерофазного состояния все же связана не с формой выделений, а с их взаимным расположением. Так, например, во многих исследованиях отмечалось существование периодических или модулированных распределений включений... Совершенство в периодическом распределении включений иногда оказывается столь высоким, что при рассеянии рентгеновских лучей возникает дифракционная картина с лауэвскими отражениями. Эта дифракционная картина имеет ту же природу, что и обычная дифракционная картина, полученная от совершенного кристалла. Различие здесь заключается в том, что при рассеянии на совершенном кристалле основным рассеивающим элементом является атом, при рассеянии же на периодическом распределении включений таким элементом является отдельное включение... Перечисленные особенности в морфологии кристалла не могут найти убедительного объяснения в рамках обычных представлений о термодинамике фазовых превращений» /с. 192–193/.

В самом деле, как далее указывает Хачатурян, форма кристалла новой фазы обычно связывается с его поверхностным натяжением. Такая точка зрения приводит к выводу, что выделение новой фазы должно всегда иметь форму правильного многогранника. При этом остаются непонятными наиболее интересные и наиболее распространенные случаи, когда выделения имеют форму пластин или игл (такие формы не могут быть объяснены чисто кинетическими причинами так как пластинчатые и игольчатые включения существуют в течение времен, достаточных для достижения равновесных форм). Еще более непонятным представляется существование правильных сеток, образуемых выделениями: если пользоваться классическими представлениями термодинамики фазовых превращений, что свободная энергия любой двухфазной системы зависит от суммарных объемов каждой из фаз и от площади границ включений и не зависит от их взаимного расположения. В такой ситуации распределение включений должно быть хаотическим.

«Ключ к объяснению механизма формирования субструктуры гетерофазного кристалла лежит в понимании того факта, что особенности фазового превращения, развивающегося в твердой фазе, не могут найти объяснения, если не принимать во внимание *упругие напряжения*, возникающие при таких превращениях. Не удастся понять такие важные характеристики реальных

сплавов, как ориентационные соотношения, форма и взаимное расположение фазовых составляющих, а также те, во многих случаях важные коррективы, которые вносят внутренние напряжения в диаграмму равновесия сплавов» /с. 193/. К числу распространенных форм, наблюдаемых в таких твердых растворах, относятся пластинчатые, т.е. такие, у которых толщина постоянна и много меньше остальных линейных размеров. Например, это могут быть диски, прямоугольники и другие многоугольники, эллипсы, вытянутые пластины — «иглы» и т.д. В работах по твердым растворам фигурируют также цилиндры, например, с эллиптическим сечением и пр.

«Во многих гетерофазных системах включения новой фазы образуют правильные периодические сетки (макрорешетки), масштабы и симметрия которых зависят от кристаллогеометрии фазовых превращений... Этот эффект может быть связан только со взаимодействием включений, обусловленным интерференцией полей внутренних напряжений» /с. 257/. Как показал Хачатурян на примере двухфазного равновесного состояния сплава, учет внутренних напряжений при распаде твердых растворов действительно приводит к кардинальному изменению этого состояния: сплав обретает мелкодисперсную субструктуру, которая образуется за счет периодического распределения включений. В отсутствие же внутренних напряжений равновесное состояние достигается при расслоении однородного твердого раствора на две фазы, разделенные одной плоской границей.

«Периодические распределения включений (модулированные структуры) можно интерпретировать как системы упругих концентрационных доменов, образование которых приводит к достижению абсолютного минимума суммы химической свободной энергии и энергии внутренних напряжений... *Механизм образования упругих доменов почти идентичен механизму образования ферромагнитных доменов.* Основное различие здесь заключается в том, что в первом случае процесс доменизации приводит к исчезновению дальнедействующих полей внутренних напряжений; во втором — к исчезновению дальнедействующих магнитных полей... Таким образом,... кроме доменов, возникающих при ферромагнитном и сегнетоэлектрическом переходах, *имеются домены, которые возникают при фазовых переходах, связанных с перестройкой кристаллической решетки*» /с. 258–259/.

Их теория называется Хачатуряном «теорией упругих (или упруго-концентрационных) доменов». Аналогия между упругими и ферромагнитными доменами является столь полной, что может быть прослежена вплоть до мельчайших деталей. Известно, что равновесное состояние одноосного ферромагнетика дважды вырождено относительно направления вектора намагниченности. Это означает, что одному и тому же равновесному значению свободной энергии отвечают две магнитные «фазы», отличающиеся друг от друга только направлением вектора намагниченности. Точно так же оказывается дважды вырожденным равновесное состояние двухфазного сплава: одному и тому же значению термодинамического потенциала отвечают две фазы, отличающиеся равновесным составом. Таким образом, если доменная структура ферромагнетика формируется из двух «фаз», отличающихся направлением вектора намагничивания, то в случае распада доменная структура формируется из двух равновесных фаз, отличающихся составом. При этом роль среднего состава сплава в ферромагнетике играет внешнее магнитное поле.

Состояние ферромагнетика с доменной структурой является энергетически более выгодным, чем монодоменное состояние, потому что при нем дальнедействующее магнитное поле локализуется в слое, расположенном вблизи поверхности кристалла. Аналогично этому разбиение комплекса на тонкие упругие домены — «выделения» — приводит к локализации дальнедействующих полей внутренних напряжений в слое, примыкающем к поверхности комплекса. Общими являются также факторы, лимитирующие неограниченное дробление доменных структур. В случае упругих (или концентрационных) доменов этим фактором является поверхностное натяжение на границах между соседними доменами, в случае ферромагнитных доменов — энергия блоховских стенок, являющаяся поверхностной энергией границ доменов. Период модулированной структуры в твердых растворах может монотонно увеличиваться за счет удаления экстраплоскостей, образованных выделениями. «Описанный процесс увеличения периода представляет собой аналог переползания дислокаций» /с. 313/.

Кроме диффузионных фазовых превращений в твердых растворах существует довольно обширная группа бездиффузионных фазовых превращений, идущих без изменения состава. «Бездиффузионные фазовые превращения также приводят к образо-

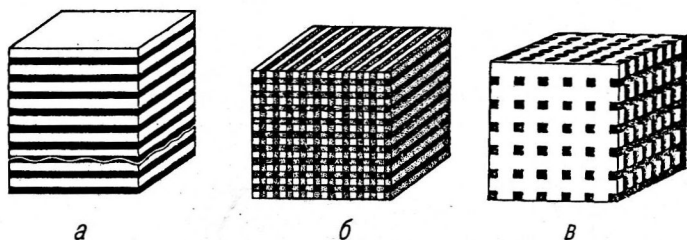


Рис. 4.2.2

Модулированные структуры или системы упругих концентрационных доменов в гетерофазных кристаллах: а - одномерная модулированная структура (волнистая линия внизу стопы означает условную линию разрыва чертежа); б - двумерная; в - трехмерная вторично модулированная структура (по Хачатуряну /1974/)

ванию упругих доменов. Процесс домениации здесь, как и во всех рассмотренных выше случаях, обусловлен релаксацией внутренних напряжений при фазовых превращениях» /с. 200/.

В твердых растворах названные периодические распределения, часто называемые в литературе модулированными структурами, носят макроскопический характер и их периоды составляют десятки и сотни ангстрем. Наблюдаемая периодичность носит как одномерный, так и двухмерный и трехмерный характер, что иллюстрирует рис. 4.2.2. При этом двухмерная модулированная структура, изображенная на рисунке, представляет собой результат наложения двух одномерных структур с того же рисунка.

Изучение процесса образования периодически-модулированных структур в твердых растворах показало, что на первой стадии зачастую образуется система хаотически распределенных включений новой фазы, которые лишь спустя некоторое время выстраиваются в периодические распределения. (Отметим, что и в биологических объектах зачастую строгое упорядочение множества доменов возникает не сразу, а занимает значительное время, например, в онтогенезе поперечно-полосатых мышц с их периодически-модулированной структурой, характерной для зрелого состояния). Но «в тех случаях, когда размерный эффект в сплаве достаточно велик, модулированные структуры могут образоваться сразу. Модулированные структуры с хорошо выраженной периодичностью, по-видимому, возникают в тех случаях, когда объемные доли матрицы (т.е. основной кристаллографической решетки — С. П.) и выделяющейся фазы соизмеримы друг с другом» /с. 313/.

Интересной особенностью упорядочения в твердых растворах внедрения является экспериментальное обнаружение упорядоченных структур при чрезвычайно малых концентрациях примеси внедрения (порядка атомных процентов), что связывается Хачатуряном с упругими искажениями кристаллической решетки /с. 323/.

Хачатурян рассматривал только кристаллографические гетерофазные системы и, насколько нам известно, нигде не отмечал аналогию возникающих в этих системах морфологических картин с биологическими структурами. Мы отмечаем такую аналогию и хотим рассмотреть ее подробнее.

Исследования по биологической морфологии за последние десятилетия выявляют закономерную структурированность биотел не только на уровне различных невооруженным глазом структур, но и на субклеточном уровне, в том числе «периодическую модулированность». Там, где раньше в биообъектах предполагалась хаотически организованная микросубстанция, неожиданно исследователям открывается регулярная структурированность, например, в виде внутреннего цитоскелета клеток из спирализованных микротрубочек и т.п. Даже на таком сравнительно изученном объекте как клетки поперечно-полосатых мышц исследователи с изумлением открывают новые и новые факты регулярных укладок. Так, в 1983 г. обнаружено, что белок винкулин «организован в удивительную поверхностную решетку, которая охватывает всю мышечную клетку. Примечательно, что эта решетка тесно связана со структурой расположенных глубже, в цитоплазме, саркомеров. Напоминающие обручи бочки, поперечные полосы решетки охватывают мышечное волокно парами колец... В том же году было показано, что спектрин, основной связывающий актин белок мембранного скелета эритроцитов и многих других клеток, подобно винкулину, содержится в поперечно-полосатых мышцах и тоже образует подобную структуру. Поперечные полосы, содержащие спектрин, также имеют периодичность, совпадающую с периодичностью расположенных под ними саркомеров. Итак, мышечная клетка имеет настоящий «мембранный скелет», содержащий два связывающих актин белка — винкулин и спектрин... Поразительна регулярность этой опорной структуры» (цитируется по Гурфинкелю и Левику /1985, с. 15/).

Биологические тела существенно отличаются от кристаллов и не имеют свойственных последним собственно кристаллических решеток. Однако они, как это все более становится ясным, имеют

свои, пока недостаточно изученные регулярно структурированные каркасы типа цитоскелетов. Вопрос о механизмах образования таких биологических каркасов или «скелетов» в широком смысле давно обсуждается в биологии, например, в связи с коллоидными биологическими субстанциями. Так, Фрей-Висслинг и Мюлеталер /1968, с. 49/ отмечают следующее. Коллоидная система может существовать как в более жидкой форме (золь), так и в форме, которая в большей степени приближается к твердому состоянию (гель). Оба эти состояния обратимы и между ними возможны переходы. Примером такой обратимости может служить переход основной плазмы клетки из активного, подвижного в неактивное, покоящееся состояние. Когда золь переходит в более твердое, гелеобразное состояние, его частицы, сохраняя в известной мере способность двигаться независимо друг от друга, вместе с тем оказываются взаимосвязанными, образуя определенную ультраструктуру. На рис. 4.2.1 показаны примеры образования таких ультраструктур («скелетов»). В литературе также широко обсуждается возможное значение лиотропных жидких кристаллов с их способностью структурно упорядочиваться в зависимости от характеристик раствора. Конечно, в отличие от случая кристаллов в биологических субстанциях переход из жидкой формы в скелетную определяется вовсе не перепадом температуры, а факторами растворимости, полимеризации и пр.

Как и рассмотренные выше гетерофазные твердые растворы, биологические тела представляют собой многокомпонентные составы, в которых взаиморасположение отдельных видов компонентов также определяется правилами минимизации энергии, например, минимизации суммы химической свободной энергии и энергии внутренних напряжений. Наблюдаемые аналогии между морфологией названных твердых растворов и морфологией биологических объектов дают основания полагать, что скелетной структуризации биологических субстанций (то есть организации некоторой решетчатой матрицы, при перестройке которой реализуются фазовые переходы с образованием доменов) достаточно для проявления в них сходных эффектов макроскопической супердоменной структуризации типа периодической модуляции и пр. При этом, как и в супердоменах твердых растворов металлов с их доменными стенками, в биологических супердоменах реализуются солитонные доменные стенки, которые обладают подвижностью и обуславливают, например, рост доменов.

В целом, по нашему мнению, биодомены не жидкостного статуса (в форме типа геля и пр.) в очень многих случаях являются упругими доменами гетерофазных биомолекулярных «сплавов» или твердых растворов. (В жидких гетерофазных растворах — например, у либтронных жидких кристаллов — также наблюдаются разнообразные модулированные структуры и разнообразные конфигурации, напоминающие биологические, но механизмы их образования и значение механических напряжений при этом иные, чем в случае твердых растворов).

Упоминая гелеобразное состояние живого вещества, например, в клетках, следует не забывать его весьма необычный характер, наблюдаемый под электронным микроскопом и описываемый следующим образом: «В целом гель производит впечатление, весьма отличное от того, которое можно было бы ожидать от таких моделей, как сгусток фибрина. Его можно было бы описать скорее как «мицелярный гель», чем как «молекулярный гель», а это означает, что желатизация включает следующие ступени: соединение молекул в двумерные мицеллы, связывание мицелл в более крупные листки, группировка листков в трубочки, пузырьки и т.п. и, наконец, соединение этих более крупных элементов в компактную массу» (Мэзия /1963, с. 233/).

При спонтанном возникновении в среде доменных стенок и доменов возникает неоднородность распределения энергии в этой среде. В солитонных доменных стенках имеет место повышенная концентрация энергии. И с этой энергетической неоднородностью оказывается связанной неоднородность вещественного состава тела. Например, в гетерофазных сплавах домены различаются по составу и виду кристаллических подрешеток. При доменообразовании в живом веществе эта связь неоднородностей в распределении энергии и химического состава с различными формами его упаковки также имеет место, проявляясь в еще более выраженной и специфической форме. Энергетический фактор здесь можно трактовать как определяющий для формообразования биодоменных стенок и их движения при доменных перестройках. Эти биосолитонные доменные стенки являются прямыми участниками формообразования и движения живого вещества.

Именно упругие домены и механические напряжения представляют первостепенный интерес в связи с локомоторными и многими другими биосолитонами, сопровождаемыми этими напряжениями. Механические напряжения «вморожены» во мно-

гие биологические объекты и составляют основу многих видов активной деятельности организмов относительно окружающего мира: постройки жилища, добывания пищи и т.п. Энергетическое функционирование живых организмов базируется на — пока не до конца понятном — непосредственном переходе химической энергии АТФ в механические формы энергии. Кроме того, как выше уже отмечалось, в биологии механические напряжения давно подозревают в активном, хотя во многом не понятном участии в процессах морфологической структуризации.

Например, биологические процессы роста и формообразования зависят от тургора клеток и тканей. Тургором (от латинского *turgor* — вздутие, наполнение) называют напряженное состояние клеточной оболочки, создаваемое гидростатическим давлением внутриклеточной жидкости и связываемое с осмосом. В растительных клетках внутреннее давление на клеточную стенку всегда превышает давление на нее наружного раствора. У большинства растений тургорное давление лежит в пределах 5-10 атм, у галофитов, грибов — 50-100 атм. Благодаря тургору ткани обладают упругостью, сохраняется вертикальное положение стеблей (у травянистых) и т.д. Тургор клеток тесно связан с их физиологическими функциями. Например, высокий тургор у замыкающих клеток устьиц на листьях растений приводит к открыванию этих устьиц, а потеря тургора ведет к закрыванию. Все процессы увядания, автолиза (самопереваривания тканей, клеток или их частей на разных этапах жизнедеятельности организма) и старения сопровождаются снижением тургора. В животных клетках тургор не бывает таким высоким из-за отсутствия в них прочных клеточных стенок (плазматические мембраны выдерживают разницу внутреннего и внешнего давления не более 0,5-1,0 атм).

О некоторых модельных возможностях биосолитонов и биодоменов. Отметим, что обнаружение биосолитонов обращает внимание на новый и, вероятно, важный механизм перестройки биологических ультраструктур, в частности, звеньев скелетной матрицы. Речь идет о том, что солитоны представляют собой автолокализованные энергетические объекты (пакеты, сгустки и пр.). При пробегании такого энергетического сгустка, например, по молекулярной цепи или линейчатой ультраструктуре тот участок, на котором находится в данный момент этот солитон, может по своим энергетическим характеристикам резко отличаться от остальных участков. Напрашивается условное

сравнение с локальным разогревом цепи, но это сравнение неверное. Прохождение солитона по цепи, вообще говоря, не меняет тепловые, то есть хаотические движения частиц, и речь идет об особой форме локального энергетического изменения. На некоторых участках биологических цепей этой энергии может оказаться достаточным для разрыва цепи, изменения ее фазового состояния или конфигурации (например, спирализации или деспирализации как в хромосомах). При этом возможно образование новых связей с соседними структурами, создание новых очагов механического напряжения и т.д. Отметим, что сам по себе вопрос о химических реакциях в зонах солитонов еще очень слабо разработан и таит много неожиданностей.

Если по цепи бежит несколько солитонов, то набор мыслимых возможностей для названной энергетической регуляции локальных перестроек расширяется в силу возможного взаимодействия солитонов между собой с образованием связанных систем солитонов и пр. При этом вновь приходящие биосолитоны могут взаимодействовать не только друг с другом, но и с уже находящимися в местной структуре биосолитонами. Возникновение или исчезновение биосолитона в нелинейной среде, например, при ее распаде на домены с образованием солитонных доменных стенок, могут изменять характер нелинейности данной среды. Другими словами, существует много возможностей построения регуляционных систем на солитонных механизмах. Нам представляется, что подобные биосолитонные механизмы локального и даже адресного воздействия на переагрегацию и фазовые переходы широко используются при физиологической регуляции. С ними, видимо, связаны многие феномены необычно высокой эффективности биологических процессов (например, ферментативных), недостижимой пока в технических системах.

Концепция биосолитонов открывает возможность понимания механизмов морфогенетического членения биологических тел по аналогии с известным в кристаллографии физическим процессом распада тела на домены. Видимо, как и в кристаллографии, эта доменизация связана с процессами релаксации в биообъекте. Данная релаксация уменьшает, например, его внутренние напряжения, и сопровождается минимизацией его энергии, например, суммы химической свободной энергии и энергии внутренних напряжений. При этом внутри самого объекта происходит перераспределение остающегося минимума энергии с закладкой замет-

ной части ее в солитонные доменные стенки как энергетические сгустки. В последних могут вторичным образом протекать и дополнительные биохимические реакции с отложением продуктов реакции в этих стенках как особых энергетических зонах. Сами доменные стенки воздвигаются и функционируют автоматически с учетом состояния всего объекта. Текущее многообразие доменов может перестраиваться при изменении энергетического состояния всего объекта или его отдельной части, каким-то образом выделенной (обособленной) в энергетическом плане. Характерно, что ширина существующих биосолитонных стенок между биологическими доменами может сильно изменяться в ходе физиологических процессов, например, биосолитонные доменные стенки в структуре мышечных саркомеров могут сильно утончаться при мышечном сокращении (см. параграф 7.3).

Пять особенностей доменизации. Перечислим вместе пять давно известных в кристаллофизике особенностей доменизации, каждая из которых, как отмечается нами, имеет прямое отношение к свойствам биологической структуризации и существенно используется в рамках солитонной биологии:

1. Энергетический уровень тела определяет его распад на домены, в котором судьба каждой части (то есть расположение и размеры отдельного домена) является функцией ее положения относительно целого. Эта особенность интегрально-коллективного поведения компонентов тела при его доменизации служит моделью известного биологического свойства организмов, выраженного, например, в эмбриональном законе Дриша так: «путь развития части зародыша есть функция положения этой части относительно целого» (Газарян, Белоусов /1983, с. 13/).

2. Возможен «объемный» рост множества доменов, обусловленный согласованным движением всех его доменных стенок при изменении регулирующих воздействий на энергетический уровень доменизированного тела. Известным примером этого может служить изменение величины всех цилиндрических магнитных доменов у ферромагнитных пленок в зависимости от величины прилагаемого поля подмагничивания. Данная особенность доменов может использоваться для объяснения объемного роста биологических тел, то есть роста, происходящего по всему объему организма и принципиально отличающегося от поверхностного роста кристаллов, которые могут прирастать только за счет отложения вещества на их поверхности.

3. Возможно движение доменов, обусловленное движением доменных стенок. Например, те же цилиндрические магнитные домены, как известно, неподвижны только в однородном поле подмагничивания, а в неоднородном поле они перемещаются в область с меньшей напряженностью поля. В биологии такое свойство доменов предлагается нами в качестве модели биологического движения, конечно, связанного не с полями подмагничивания, а, прежде всего, с полями механических напряжений и деформаций.

4. Наличие масштабного фактора образования полидоменных структур. Речь идет о том, что, как известно, при размере, меньшем некоторого критического, кристаллообразное тело может находиться только в монодоменном состоянии. Величина названного критического размера зависит от природы доменизуемого кристалла и различна у ферромагнетиков, сегнетоэлектриков, сегнетоэластиков и пр. Одним из вариантов проявлений масштабного фактора у тонких ферромагнитных пленок является существование критической толщины доменизуемой пленки. Этот масштабный фактор может использоваться в моделях возникновения и перестройки частей биологических супердоменов. Например, усложнение морфологии тела путем распада на биологические домены начинается у биологического монодомена, который является частью супердоменной структуры, только при его вырастании до определенного размера. Этот размер зависит от особенностей состава самого биологического монодомена и в каждом биологическом субдомене может, вообще говоря, задаваться по своему. В параграфе о биологическом росте данный фактор будет существенно использован нами.

5. Возможность двойникового — образования в монодомене (или монокристалле) двух сходным образом структурированных областей с различной ориентацией. Другими словами, распада монодомена на два домена, подобных друг другу, но отличающихся направлением агрегации (ориентацией) составляющих их элементов и находящихся в отношении той или иной симметрии друг к другу. В физике твердого тела известно, что двойникование может происходить при механической деформации, а также при быстром тепловом расширении или сжатии и пр. Примером этого является механическое двойникование кальцита: достаточно простого нажатия ножа на поверхность кристалла кальцита для того, чтобы он двойниковался, то есть чтобы возникли одновременно существующие копии

исходной кристаллографической структуры, отличающиеся друг от друга только своей ориентацией. В биологии этот механизм удвоения (или своеобразного копирования с изменением ориентации) исходной монокристаллической структуры может служить важным дополнением к области представлений о размножении аналогичных друг другу биологических структур. Механизмы биологического двойничества — подобно кристаллофизическим — могут базироваться на механических напряжениях или на изменении параметров растворимости. Последние в биологических средах зачастую выступают в роли аналогов тепловых параметров структуризации (тепловые изменения как фактор регуляции для биотел не характерен, а температура тела у теплокровных животных даже специально стабилизируется). В современной теоретической биологии царствует представление о пошаговой репликации матричных линейных молекул, порождающей комплементарную копию исходной молекулы. Данное представление, несомненно, очень важно, но оно не исчерпывает всех возможных вариантов образования биологических двойников. Учет двойниковой доменизации как способа тиражирования аналогичных структур может прояснить многие биологические явления. Кстати сказать, подобно тому, как при механико-деформационном двойничестве кристалла его суммарный объем и масса не увеличиваются, так и при митотическом делении клеток у зародыша «суммарный объем и масса всех возникших клеток не превышает объема и массы яйцеклетки сразу после оплодотворения» (Газарян, Белоусов /1983, с. 96/).

Совокупность этих пяти особенностей доменизации позволяет нам дополнительно выдвинуть общую модель или общий принцип биологической регуляции, который можно кратко называть «регуляцией по уровню энергии среды». Речь идет о том, что с физической точки зрения доменизация представляет собой процесс релаксации изначально возникших в доменизируемой нелинейной среде механических или иных напряжений. Эта релаксация осуществляется за счет перегруппировки элементов среды и образования солитонных доменных стенок для достижение минимума некоторой ее энергии (например, образование рассматривавшихся в параграфе 4.2 упругих доменов происходит для достижения абсолютного минимума суммы химической свободной энергии и энергии внутренних напряжений). Очевидно, что, если начальный уровень названных напряжений и

энергии среды меняется, то в картине доменов происходят соответствующие изменения, связанные с решением задачи энергетической минимизации с новыми исходными условиями.

Тем самым, у доменизируемых организмов имеется возможность через задание тех или иных исходных напряжений в своей собственной среде вызывать процессы перестройки биологических доменов. Такое задание напряжений может носить локальный и даже точечный характер, но — поскольку оно затрагивает общий энергетический уровень — его последствия способны перестраивать всю карту доменов, как это известно в физике. У организмов локальное изменение напряжений может быть связано с классическими механизмами местного выделения энергии от АТФ по команде нервной системы или в связи с приходом биосолитона из другой части организма. Возвращение к первоначальным исходным напряжениям в рассматриваемой нелинейной среде вызывает обратную перестройку с возвращением первоначальной картины биологических доменов в ней (при этом необходимо учесть наличие гистерезисных явлений и так называемых скачков Баркгаузена, обычных для процессов доменизации). В параграфе о мышцах эта модель биологической регуляции будет применена нами к частному виду регуляций — явлениям мышечного сокращения и расслабления.

Представление о доменах и солитонных доменных стенках оказывается настолько работоспособным в биологической области, что иногда у автора появляется желание назвать это направление солитонно-доменной биологией.

Об ансамбле биосолитонных стенок. Возвращаясь к системе солитонных стенок биологических супердоменов, заметим, что, если принимать во внимание только эту систему, то биологические тела предстают как некоторая ячеистая, сетчатая или губчатая субстанция, пронизывающая все тело. Эта субстанция как ансамбль относительно неподвижных солитонов, видимо, образует для подвижных солитонов удобный путепровод с необходимыми нелинейными свойствами. По такому путепроводу могут бежать биосолитоны разнообразного назначения, например, метаболического, локомоторного и пр. В результате пробегания подвижных биосолитонов по биосолитонным доменным стенкам конфигурация последних может не нарушаться в силу известной специфики неразрушающего взаимодействия солитонов.

Мы только что сказали, что биосолитоны движутся по сетям биосолитонных же дорожек. Вообще, чем больше изучаешь био-

солитоны, тем более складывается впечатление, что в живой материи имеет место ситуация, которую образно можно охарактеризовать так: солитон на солитоне сидит и солитоном погоняет. Возникнув в нелинейной среде и образовав в ней активную колонию, биосолитоны эту среду видоизменяют, достраивают и наращивают за счет переработки и автолокализации все новых порций энергии и вещества, притекающих извне.

Уточним сказанное нами об относительной неподвижности биосолитонных стенок. Многие биосолитоны по своему пространственному взаиморасположению практически неподвижны друг относительно друга, образуя стабильный групповой каркас, по которому могут пробегать другие биосолитоны. Вместе с тем, в живом теле, возможно, все биосолитоны — в том числе солитоны доменных стенок — находятся в движении в смысле постоянного обновления своего телесного состава, но скорость этого движения по обновлению своего состава у разных биосолитонов — локомоторных, метаболических, ростовых и пр. — может отличаться на много порядков.

Названная губчатая субстанция из солитонных стенок биологических супердоменов ассоциируется с известной многим читателям сеткой прожилок разного уровня на листке растения. Рассмотрим внимательнее пример такой губчатой органической субстанции, остающейся после растворения минеральной начинки любого скелетного образования и играющей ведущую роль в биогенных кристаллах.

4.3. Биогенные кристаллы

В биогенных кристаллах или кристаллах биологических скелетов известна строго периодическая модулированность (сходная с вышерассмотренной в разделе об упругих доменах гетерофазных сплавов), одинаково наблюдаемая у совершенно разных организмов, например, у одноклеточных водорослей кокколитофорид и у позвоночных. Этому посвящена монография Голубева /1981/, впервые изучившего собственно дефектную структуру реальных биогенных кристаллов. Она содержит много фактических материалов, подтверждающих положения нашей солитонно-доменной концепции. Цитируя эти материалы в данном параграфе, будем указывать только номера ее страниц.

«Для биогенных кристаллов характерна сложная иерархическая структура, имеется несколько соподчиненных порядков структуры. В типичном случае раковина состоит из слоев, слой, например, из призм, которые в свою очередь — из каких-нибудь пластин, а последние могут состоять из удлиненных кристаллитов. Получается целый ряд элементов, состоящих «друг из друга». Конкретная геометрия меняется от организма к организму и составляет предмет исследований по микроструктуре скелетов» /с. 88/.

Давно известно, что если в мягких условиях растворить или иным образом удалить минеральную начинку любого биологического скелетного образования, будь то кость человека или раковина беспозвоночного, то останется некоторая губчатая субстанция, форма которой на макроскопическом уровне будет повторять исходную форму скелетного образования. На самых различных эволюционных группах животных показано, что матрица в виде тончайшей органической пленки обволакивает каждый кристаллит. При этом, как схематично показано на рис. 4.3.1 *а*, иерархической структурированности минерального компонента соответствует аналогичная структурированность органических матриц: чем более крупные элементы обволакиваются, тем больше толщина органической пленки. «Взаимодействия между соседними микронными блоками биогенных кристаллов геометрически подчиняются законам рационального двойникования» /с. 136/.

Основным принципом биологической структурной организации любого минерализованного скелета является то, что скелет не представляет собой агрегат непосредственно сросшихся кристаллов, соседние кристаллиты не только не срастаются, но даже

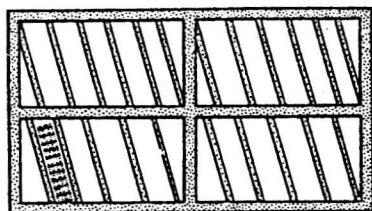
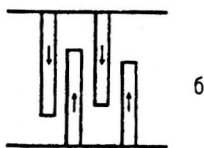


Рис. 4.3.1

- а* — схема морфологического соотношения между органическим и минеральным компонентами скелета. Видно несколько соподчиненных уровней структуры, каждый кристаллит любого уровня как бы обволакивается тонкой органической пленкой. На одном из элементарных кристаллитов условно показана обнаруженная периодическая дефектная структура; *б* — стрелками показано направление роста соседних кристаллитов (по Голубеву (1981/).



не соприкасаются между собой. Существование скелетного образования как единого твердого тела обеспечивается за счет взаимодействия кристаллитов через посредничество органических матриц. В одних случаях скрепляющая органическая пленка выступает в качестве обособленной ламеллярной структуры, в других случаях это морфологически не обособленная часть более крупной фибриллы. Но эта структура такова, что практическая прочность скелета «определяется не только, может быть, даже не столько параметрами идеализированной решетки кристаллов и геометрическими особенностями микроструктуры, сколько энергией специфического взаимодействия между кристаллической и минеральной фазами скелета. Только подход к веществу скелета как к композиционному материалу, причем с учетом характера взаимодействия, позволяет хотя бы в принципе понять такие известные случаи патологии костной ткани человека, когда лишь наблюдаемые в электронный микроскоп нарушения структуры кости приводят, казалось бы, к совершенно непропорциональным уменьшениям прочности, вплоть до самопроизвольных переломов костей во время сна» /с. 137/.

Исследование проблем биоминерализации тесно связано с всесторонним изучением специфики биогенных минеральных отложений, в первую очередь с изучением ионных кристаллов кальция и оксиапатита, из которых состоят скелетные образования организмов. По своей идеализированной решетке это те же самые «обычные» кристаллы, но только образующиеся и расположенные внутри организмов. Наличие органического компонента скелета, органической матрицы существенно влияет на свойства таких кристаллов, особенности их реальной структуры, тонкий механизм процессов образования. Органический полимерный компонент составляет около 20–30% веса скелета. Формирование скелета начинается с образования именно этого органического компонента, который во многом определяет рост кристаллов в ходе биоминерализации. В этой связи в литературе утвердился термин «органическая матрица».

«Молекулярная природа взаимодействия органического и минерального компонентов скелета неизвестна. По имеющимся данным состав матрицы, с точностью до групп соединений, один и тот же у самых различных организмов, от водорослей до человека... Формирование скелета начинается с образования органической матрицы, структурно представляющей собой некоторую

губчатую субстанцию. В дальнейшем за счет поступления из физиологических растворов происходит *биологически управляемое* осаждение кристаллов минерального компонента, причем именно в объеме первоначально *губчатой матрицы, которая определяет и внешнюю форму скелетного образования*, и особенности его микроструктуры... Органическая матрица влияет на химические свойства биогенных кристаллов (так в одних и тех же условиях раковины одних видов растворяются, а других нет). И это при условии, что по идеализированным решеткам кристаллы идентичны» /с. 85–86/.

Органическая матрица только очень условно может быть уподоблена полимерной губке, опущенной в насыщенный раствор, из которого происходит осаждение на нее минеральных компонентов. Реальные механизмы биоминерализации принципиально отличаются от такой простейшей губчатой модели эффективностью регуляции кристаллообразования. Главным образом тем, что органическая матрица обладает определенным сродством по отношению к формируемому минеральному компоненту. Наиболее отчетливо это проявилось в экспериментах по осаждению на коллагене апатита из метастабильных растворов: в условиях, близких к физиологическим, кристаллизацию вызывает только коллаген с упаковкой молекул, соответствующей фибриллам с нативной периодичностью 640–700 Å. Коллаген с нарушенной структурой и другие структурные белки кристаллизацию в идентичных условиях не вызывали. В опытах происходила кристаллизация и на коллагенах из исходно неминерализуемых тканей, например из кожи.

«Практически несомненно, что матрица определяет расположение центров нуклеации — центров первичного кристаллообразования. В результате электронно-микроскопических исследований показано, что расположение этих центров на матрице подчинено строгой упорядоченности... Установлено, что у иглокожих нуклеация происходит именно в тех точках, где кристаллизация в больших объемах минимально нарушит высокоупорядоченную структуру матрицы. Матрица влияет на кристаллографическую модификацию образующегося минерального компонента. Фрагмент еще неминерализованной матрицы арагонитовой раковины двустворки хирургически пересаживался другому моллюску, у которого раковина состоит только из кальцита. После пересадки из одного и того же физиологического раствора на пересаженном фрагменте арагонитовой матрицы кристаллизовался арагонит, а

на кальцитовой матрице — кальцит» /с. 86–87/. Добавим, что после искусственного нарушения структуры матриц кристаллы утрачивают биологическую специфичность и растут в насыщенных растворах, как и полагается обычным кристаллам.

Органическая пленка матрицы «должна быть проницаемы для физиологических растворов, в противном случае кристалл просто не смог бы возникнуть. Причем матрица должна работать не только в роли проницаемой «мембраны», вся совокупность матричных структур должна играть роль системы подводящих каналов, т.е. должен существовать поток вещества, идущий вдоль границы раздела органической и минеральной частей скелета» /с. 90/. Это перекликается со сформулированным выше нашим представлением о сети биосолитонных доменных стенок, по которым бегут метаболические и иные относительно подвижные биосолитоны. Отметим, что сходная биологическая задача об обеспечении метаболического потока веществ по аксону нервной клетки решается путем использования биосолитонов, движущихся вдоль аксона, что рассмотрено в другой главе нашей книги. Вероятно, в биогенных кристаллах для обеспечения метаболического потока вещества вдоль органических матричных структур также используются транспортные биосолитоны.

Биологический контроль роста кристаллов со стороны органической матрицы, помимо прочего, останавливает рост кристаллитов, не выпуская растущий кристалл за пределы отведенной ему ячейки и обеспечивая высокую упорядоченность всей структуры. На рис. 4.3.1 б показано направление роста соседних кристаллитов у кокколитов. В биогенных кристаллах обнаружена периодичность дефектной структуры элементарных кристаллитов, то есть минимальных структурных единиц, еще имеющих обволакивающую органическую пленку с коллагеном в ней. «Эта периодичность практически повторяет тонкую исчерченность коллагена, поэтому и наблюдается количественное совпадение параметров структуры у кристаллитов одноклеточных водорослей и человека — структурированность коллагена почти одинакова у самых разных организмов» /с. 103/. В целом доказано, что матрица во многом осуществляет биологическую регуляцию роста кристалла, задавая не только параметры, но и ориентацию винтовой дислокации — спирали роста. Доказано также, что на уровне индивидуальных вариаций дефектной структуры существует дальний порядок: хотя кристаллиты непосредственно и не

соприкасаются, их реальная структура всегда на уровне дальнего действия согласована с индивидуальной структурой соседних кристаллов /с. 104–108/.

На примере позвоночных показано, что на ранней стадии минерализации, когда только возникают ядра нуклеации, кристаллографические оси ансамбля зародышей кристаллитов ориентированы хаотично, упорядоченность ансамбля возникает лишь на последующих стадиях, Биогенный элементарный кристаллит не вырастает из одного центра нуклеации. По крайней мере иногда элементарный кристаллит является результатом срастания блоков, происходящих из разных центров нуклеации. Центры нуклеации обычно располагаются во вполне определенных точках внутри коллагеновой фибриллы и повторяют свойственную коллагену периодичность примерно в 700 Å. «Удивительна полная синхронность развития таких центров нуклеации на протяжении по крайней мере 10 периодов коллагена, ничего похожего на постепенное распространение фронта минерализации нет; другими словами, *минерализация распространяется крупными скачками*» /с. 108/.

Настоящий параграф был призван, прежде всего, продемонстрировать читателю всю первостепенную важность органической матрицы, содержащей биосолитонные доменные стенки, в построении и жизнедеятельности различных скелетов. Однако, органические матрицы — в том же виде губчатой или сетчатой субстанции — важны не только для организации и жизни биогенных кристаллов, но и во множестве других биообъектов без кристаллитовой компоненты, в которых иные формы организованного вещества под биологическим управлением этой матрицы заполняют ее ячейки и интегрированно функционируют в составе единого биообъекта. Одним из многих примеров таких губчатых субстанций является хорошо всем известная многоуровневая сеть жилкования листьев. Крайним примером биосолитонной суперсети высокого уровня, видимо, является во многом человеческий мозг.

4.4. Колониальные организмы

Рассмотрим еще один пример фундаментальной роли органической матрицы с ее биосолитонами, на этот раз в жизни колониальных организмов. Название «колониальные» в биологии присвоено организмам, у которых особи дочерних поколений при

бесполом размножении (почковании) остаются соединенными с материнским организмом, образуя более или менее сложное объединение — колонию. Признаком истинной колонии считается наличие органической связи между особями: все особи колонии погружены в единую органическую субстанцию, называемую у колониальных организмов, например, туникой. Наличие этой субстанции обеспечивает интеграцию особей, включая обмен веществ между особями и формирование колонии за счет ограничения роста колонии в определенных направлениях и взаиморасположения особей в ней, подчас очень упорядоченного. Это подчеркивает, в частности, Беклемишев /1964, с. 404, 417, 423, 426/), из книги которого мы заимствуем здесь многие факты.

Колониальные организмы встречаются главным образом среди одноклеточных водорослей, губок, кишечнополостных, оболочников, мшанок. Одни колониальные организмы ведут прикрепленный образ жизни на неподвижном субстрате и имеют более или менее развитый скелет; другие — обитают в толще воды, обычно полупрозрачны, скелета не имеют. В колонии отдельные особи (у животных называемые зооидами) занимают определенное место и выполняют специальные функции, важные для всей колонии; у сифонофор, например, функции отдельных зооидов четко разделены, а все вместе они образуют колонию, которая внешне имеет вид единой особи. Считается, что колониальные организмы из одноклеточных особей сыграли роль промежуточного звена в процессе возникновения многоклеточных организмов, явились их предшественниками. Поэтому, изучая колониальные организмы, мы одновременно изучаем во многом и многоклеточные организмы с характерным для них согласованным поведением отдельных клеток. Именно высшая степень функциональной интегрированности отдельных клеток в единый организм отличает, прежде всего, многоклеточный организм от колониального.

По конфигурации обычно различаются колонии линейные, мешковидные и разветвленные. Колонии линейного типа, пример которых приведен на рис. 4.4.1 *а*, свойственны некоторым типам плоских червей и аннелидам, у которых во второй главе нашей книги уже демонстрировались локомоторные биосолитоны.

Одним из типов являются разветвленные, правильные колонии, вроде *Meniprea* или *Scrupocellaria*. «Важнейшей чертой определенных или правильных колоний является наличие единого для всего вида плана, определяющего направление рядов зоо-



Рис. 4.4.1

Колониальные организмы: *a* — линейная колония кольчатых червей *Myrianida fasciata*: бесполой особь с цепочкой из 29 зооидов; *б* — колония *Pyrosoma*: 1 — околопоровые придатки; 2 — полость колонии; 3 — зооиды (по Беклемишеву /1964/)

идов, места их разветвлений, взаимное расположение, число и форму зооидов, составляющих каждое междуузлие» (Беклемишев /1964, с. 405/).

Рассматривая характерные для асцидий массивные колонии с зооидами, погруженными в общий мантийный студень, Беклемишев отмечает, что во всех случаях при почковании почка отделяется внутри студня и не остается на месте своего образования, а передвигается на окончательное место сквозь толщу туники. При этом зачастую возникают объединения отдельных почек в кружки с общей клоакой, так называемые кормидии. «Иногда эти кормидии достигают высокой степени интеграции, как, например, у *Botryllidae*, где порядок образования, движения и расположения членов кормидия обладает замечательной сложностью и правильностью. Интеграция как всей колонии, так и отдельных кормидиев *Botryllus* еще усиливается благодаря наличию и правильности их колониальной сосудистой системы. Каждый кормидий окружен кольцевым сосудом, с которым сообщаются по два сосуда от каждого зооида...; из этих сосудов каждый играет роль то приносящего, то выносящего сосуда, смотря по направлению работы *сердца*. Сосудистые системы отдельных кормидиев сохраняют сообщение между собой и, таким образом, возникает и общеколониальная сосудистая система. В колонии *Botryllus* каждая особь... остается, если не пожизненно, то долгое время в соединении с материнской особью, а через нее — и с остальными членами колонии при помощи узких стельков. У большинства синасцидий такая связь отсутствует, и

особи ничем не соединены между собой, кроме общей туники, в которую они все погружены» (Беклемишев /1964, с. 405/).

Важным фактором в развитии колониальных организмов является их переход к подвижному образу жизни. Так, например, колонии *Cristatella* отличаются от колоний большинства мшанок своей подвижностью: они ползают при помощи подошвы (подобно улитке). «Как и в других группах животных, подвижность колонии сразу предъявляет требование повышенной интеграции. И действительно, колония *Cristatella* представляет компактное целое, обладающее правильной 2-лучевой формой; полное слияние цистидов ведет к возникновению общеколониальной локомоторной мускулатуры с общеколониальным нервным сплетением, обеспечивающими возможность переползания в ответ на внешние раздражения. Общеколониальный целом обеспечивает единство внутренней среды колонии. Колония способна размножаться как таковая путем поперечного деления; она обладает и способностью регуляции формы после повреждения; одним словом, она является полноценным органическим индивидом» (Беклемишев /1964, с. 401/).

К числу подвижных относятся также колонии пирсом, салп и долиолид. На рис. 4.4.1 б приведен пример высокорегулярного строения колонии пирсом, по своей правильности не уступающий примерам регулярного строения многоклеточных организмов. У пирсом отдельные особи, возникающие путем почкования, связаны между собой только общей туникой, и почки попадают на свое место, странствуя в толще последней. При этом у большинства видов почки передвигаются при помощи фороцитов, которые представляют собой «амебоидно-подвижные клетки» (Беклемишев /1964, с. 420/). Мы подчеркиваем это, поскольку в нашей книге уже отмечали локомоторные биосолиитоны в амебоидном движении. Соответственно можно считать, что и движение почек в рассматриваемых колониальных организмах строится на локомоторных биосолиитонах. Рассматривая колонии *Doliolum*, Беклемишев называет подобный перенос почек и предпочек фороцитами и рассаживание их группами в строго определенном порядке наиболее поразительным явлением /там же, с. 420/.

В представленной на рис. 4.4.1 б колонии пирсом ее вытянутая форма закрыта сводом на одном конце и снабжена подвижной диафрагмой на другом конце; здесь при переносе почек

фороцитами располагаются самые молодые особи и сосредоточен рост колонии. «Помимо геометрической правильности колонии, интеграция ее выражается и в согласованности движений, которая достигается своеобразным путем при отсутствии мышечных, сосудистых или нервных связей между особями: механические волокна туники протянуты от одной особи к другой и в теле каждой особи примыкают к концам дуговидной клоакальной мышцы, приводящей их в движение. Сокращение мышцы одной особи дергает при помощи волокон туники другую особь и передает ей раздражение... В отношении питания и размножения все особи независимы между собой» (Беклемишев /1964, с. 419/).

Интересно, что в цитологии давно введен характерный термин «энергида», видимо, отражающий ощущение биологов о каких-то устойчивых формах энергии, играющих организующую роль в клетках. Под энергидой понимают «часть многоядерного комплекса, состоящую из ядра с обслуживаемым этим ядром участком протоплазмы. Энергида является клеткой, частично утратившей свою обособленность, благодаря исчезновению границ между нею и соседними клетками». «Многоядерная клетка или всякая клетка, обладающая несколькими наборами клеточных органелл, уже, в сущности, ... агрегат энергид». «Общей исходной точкой для всех простейших и многоклеточных является моноэнергидное простейшее. Из этого типа выводятся и Metazoa, и различные формы полиэнергидных простейших... Тело полиэнергидного простейшего, отдельные энергиды которого стоят на амебоидном уровне организации, обозначается как плазмодий» (цитируется по Беклемишеву /1964, с. 34–36/).

Принято считать, что максимальная интеграция колонии достигается под влиянием требований подвижного образа жизни, и что, вообще, «активность — главный фактор биологического прогресса» /там же, с. 426/. С точки зрения биосолитонной концепции это может интерпретироваться, как обеспечение данного прогресса за счет повышения у организма уровня его физической энергии, которая самоорганизована — благодаря солитонным механизмам — в устойчивые и наследуемые формы, образующие «энергетическую колонию». При этом названная биологическая «активность» естественным образом предстает как солитонная заряженность организма движением в широком смысле или как жизнь солитонного движения.

Глава 5

РОСТОВЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ И МОРФОГЕНЕЗ

В предыдущих главах уже не раз затрагивались те или иные аспекты и примеры ростовых трансформаций и морфогенеза биологических тел, в том числе биогенных кристаллов и колонизальных организмов. Обратимся к этой теме более систематическим образом, используя представления о биосолитонах и принципы биологической доменизации, перечисленные в параграфе 4.2.

5.1. Ростовые трансформация

Объемный рост живых тел — один из самых интересных и загадочных примеров закономерного кооперативного поведения множества составных частей биотел. При этом под «объемностью» понимается не столько трехмерность, сколько относительно равномерная рассредоточенность роста по всем внутренним участкам тела. Данный рост принципиально отличается от поверхностного роста кристаллов, который происходит за счет прибавления вещества только на поверхности кристалла и не затрагивает его нутро. Объемный рост живых тел сопровождается изменением размеров, а зачастую и формы их внутренних областей. Кооперативность процесса объемного роста характеризуется тем, что, зная трансформацию нескольких точек телесной фигуры, охваченной таким ростовым преобразованием, зачастую можно определить трансформацию всего множества точек этой фигуры.

Примером может служить известный масштабный вид объемного роста, зачастую реализуемый, прежде всего, у животных организмов, для которых характерно расти «всем телом». При этом виде телесных преобразований по изменению расположения трех точек тела можно определить трансформацию всего множества его точек. Масштабные преобразования являются частным случаем более общих геометрических преобразований, прежде всего, конформногеометрических или мебиусовых (локально-подобных и сохраняющих величины углов), которые также реализуются в объемноростовых биологических трансформациях. Более подробно об этом можно прочитать в нашей работе — Петухов /1988/.

В связи с объемным ростом заметим, что в отличие от роста самого кристалла трансформации его доменных ансамблей могут происходить коллективным образом сразу по всему «объему» ансамбля доменов под влиянием соответствующих изменений регулирующего поля, например, поля механических напряжений у упругих доменов или поля намагничивания у ферромагнетиков. При этом изменения размеров и положений каждого из множества доменов происходят взаимосогласованно в связи с диктатом интегрального критерия энергетической минимизации, о чем уже много говорилось выше. В свете этого нами предлагается моделировать объемный биологический рост, интерпретируя его как трансформацию ансамблей доменов и супердоменов с солитонными доменными стенками.

Поясним это подробнее, обратившись, пожалуй, к наиболее изученному случаю доменообразующих структур — пленкам или пластинам ферримагнетиков (феррит-гранатам), которые уже рассматривались в главе 3. Данные структуры нашли важные применения в вычислительной технике, а потому им посвящено немало монографий. В этих пленках при наложении подмагничивающего поля по их оси легкого намагничивания образуются цилиндрические магнитные домены — ЦМД (см., например, Лисовский /1984/). Обращение именно к этому случаю доменообразования обусловлено также тем, что магнитные домены, как уже отмечалось, очень сходны с упругими доменами, особо интересными для биологических приложений.

В отсутствии внешнего подмагничивающего поля доменная структура феррит-гранатовых пленок имеет неупорядоченный лабиринтообразный вид. При наложении подмагничивающего поля домены, не имеющие контакта с краями пластины, стягиваются и образуют ЦМД. Последние можно наблюдать под микроскопом в поляризованном свете как округлости диаметром в единицы микрон и более. ЦМД существуют в определенном интервале полей подмагничивания и могут существенно менять свои размеры. Нижняя граница интервала устойчивости соответствует переходу ЦМД в домены эллиптической формы, верхняя — исчезновению (коллапсу) ЦМД. Регулируя поле подмагничивания на участках такой пленки, можно управлять величиной всего ансамбля ЦМД и размерами отдельных доменов, получая трансформации, сходные с преобразованиями объемного роста у биотел. В частности, можно получить расширение

(«рост») области пленки, на которой существуют ЦМД, с пропорциональным увеличением размеров каждого отдельного ЦМД, что соответствует случаю масштабного объемного роста. Аналогичным образом можно моделировать конформные и другие неевклидовы виды объемного роста. Конечно, в данном простейшем варианте магнитных доменов не отражена способность живого вещества к образованию супердоменов. Видимо, при развитии этого перспективного класса моделей биологического роста каждый биологический домен, занимающий определенный уровень в многоуровневой, супердоменной структуре, можно условно сравнивать с отдельной ферритмагнитной пластинкой, на которой происходят процессы доменизации данного уровня.

Тем самым, солитонно-доменный подход обращает внимание на существование удобных физических моделей для объемного биологического роста. Представление о биологических доменах оказывается удобным и работоспособным не только для описания статичных биоструктур, но и для их ростовых трансформаций. Это важно, поскольку, например, тело человека, нелинейно меняя свои пропорции с возрастным перерастанием из детского во взрослое состояние, сохраняет свои навыки моторных движений, которые были им получены еще в детстве, а также представления об окружающем пространстве, привязанные к специфике его тела. Подобные факты позволяют думать о том, что сохраняемая с ростовыми трансформациями основная суперсеть биосолитонных доменных стенок определяет так называемую схему тела человека, играющую важную роль в учениях о биомеханике движений и пространственном восприятии (данные вопросы будут рассмотрены в конце главы). Другими словами, рост и структуризация у биотел являются по необходимости тесно взаимосвязанными.

В отличие от роста животных, которые растут «всем телом», растения растут благодаря деятельности специальных образовательных тканей — меристем (от греческого «меристос» — «делимый»), обеспечивающим им способность роста в течение всей жизни за счет роста своих клеток. В зависимости от расположения меристем растения одних видов растут верхушками (таких большинство), а, например, у злаков рост происходит в нескольких участках стебля-соломины у зон у оснований междоузлий. Для этого типа роста может быть развита своя солитонно-доменная модель.

Рассмотрим еще одно характерное свойство доменообразования, имеющее важную аналогию в процессах ростовых транс-

формаций. Речь идет об отмеченном в главе 3 существовании у доменообразующих сред «масштабного фактора» или «критического размера»: меньше некоторого размера (или толщины в случае пленки) для среды характерно лишь монодоменное состояние, и только при превышении этого размера на ней образуются полидоменные структуры. Сходная картина наблюдается при многих вариантах биологического роста, при которых достижение в ростовой зоне некоторого критического размера сопровождается членением телесного участка на части — доменизацией. На рис. 5.1.1, взятом из книги Короны /1987/, приведен характерный пример роста листка растения, у которого в периферической растущей зоне листка последовательно образуются новые и новые листовые прожилки, делящие периферию листка на все новые области, сходные друг с другом, но по разному ориентированные, — биодомены. Заметим, что новые, подобные друг другу прожилки располагаются под одинаковым углом к центральной (или базовой) для них прожилке, но с направленностью в разные стороны от нее. В результате с возрастом такой листок растения оказывается не только увеличенным в размерах, но и наделенным значительным числом прожилок (доменных стенок) и доменов на своем уровне биологической супердоменизации. При этом листовые прожилки (доменные стенки) выступают как бы организаторами или направляющими образованиями, определяющими расположение новых прожилок и доменов. Этот процесс доменизации на данном ее уровне можно себе представить состоящим из многократного повторения следующего элементарного процесса.

Для конкретности будем говорить о верхнем доменообразующем конце средней листовой прожилки на рисунке, хотя ана-

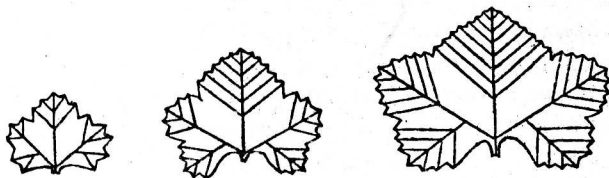


Рис. 5.1.1

Развитие структурных типов листа манжетки (по Короне /1987/). Слева — исходная пространственная конструкция. В центре и справа — пространственные конструкции после пятого и седьмого шагов усложнения соответственно

логичное имеет место также на концах боковых прожилок. Растущий кончик листка вначале имеет размер меньше критической величины и находится в мономерном состоянии, даже несмотря на наличие полей напряжений, прежде всего, механических, способных в других случаях вызвать доменизацию. Затем в ходе роста, видимо, обеспечиваемого процессами на других уровнях доменизации, размер этого кончика в некоторый момент достигает критического. В данный момент происходит закономерная доменизация с образованием дополнительных листовых прожилок и доменов. В результате этого растущий кончик опять оказывается маленьким и растет далее как мономер до очередного достижения им критического размера, позволяющего ему породить новые доменные стенки и домены. У листка на рис. 5.1.1, очевидно, имеется несколько зон такой доменизации, и число таких зон может увеличиваться с ростом числа прожилок. На других уровнях доменизации у растущего листка, видимо, происходят сходные повторяющиеся процессы. Подчеркнем, что эти доменообразовательные процессы, в зависимости от характера среды, могут происходить при размерах, значительно превышающих клеточные. Они дают для рассматриваемых ростовых процессов новое объяснение, согласующееся со следующим мнением биологов: «удивительно четкий геометризм ростовых процессов, проявляющихся на огромных по сравнению с отдельными клетками масштабах организма, кажется невозможным понять без допущения параметрического управления, связанного с ... пространственной решеткой и, несомненно, с механическими напряжениями» (Белоусов /1987/). Подобные алгоритмы «доменизации по достижению критического размера» (или «надкритической доменизации») имеют физический смысл и их можно трактовать как общебиологические.

Отметим также, что встречаются волнообразные ростовые трансформации, которые можно интерпретировать как связанные с ростовыми биосолидонами. Например, закономерное последовательное распускание отдельных цветков в корзинках сложноцветных растений по типу метахрональных волн, сходных с теми, которые рассматривались в главе 2 при описании локомоторных биосолитонов. Или волнообразное явление закономерного образования закладок листьев в верхушечной зоне роста у побега растений — филлотаксис, — которое можно пытаться понять в связи с представлением о ростовом биосолидоне-

ном процессе. Или так называемый аккреционный рост, связанный с разделением органа на камбиальную и дифференцированную зоны и с постоянным перетоком клеток из первой зоны во вторую, сохраняющим постоянные соотношения между размерами зон (Газарян, Белоусов /1983, с. 258/). При рассмотрении вопросов роста существенно, что солитоны обладают возможностями массопереноса и доставки строительного материала в зоны роста. Однако, при моделировании явлений роста надо учитывать, что зачастую они носят пульсирующий характер, поэтому при солитонном моделировании ростовых пульсаций может оказаться целесообразным обращение к «бризерам», «пульсонам» и другим пульсирующим солитонным объектам.

Ростовые трансформации являются частью процессов морфогенеза, которым посвящен следующий параграф.

5.2. Морфогенез

Биологический морфогенез определяется как процесс возникновения новых форм и структур в ходе индивидуального и, через его посредство, исторического развития организмов. Относящиеся к морфогенезу процессы, кратко называемые морфопроцессами, очень многочисленны: поляризация еще незрелой яйцеклетки, перераспределение в ней цитоплазматических компонентов после оплодотворения, закономерно ориентированные деления дробления, движения клеточных масс в ходе гастрюляции и закладок различных органов, изменения пропорций тела организма уже в постэмбриональный период в ходе его роста, и пр.

Конечно, эти морфопроцессы как-то связаны с биохимическим молекулами, которые могут образовывать свои «молекулярные морфогенезы»: распад и воссоздание, изменение конформации, а также взаимного расположения отдельных молекул и более или менее крупных молекулярных комплексов. «Однако важно подчеркнуть, что между молекулярными морфогенезами и всеми другими перечисленными выше (назовем их макроморфогенезами) имеются количественные и качественные различия. Молекулярные морфогенезы непосредственно основаны на хорошо изученных силах межмолекулярных взаимодействий: ковалентных, ионных, гидрофобных и других. Изменения конформаций или взаимного расположения молекул в надмолекулярных комплексах могут быть рассчитаны при

учете этих сил, хотя технически это весьма трудная задача. Однако уже в одиночной клетке эукариот содержится по меньшей мере 10^6 – 10^7 молекул белка. Расчет их поведения на основе межмолекулярных сил становится практически невозможным. Более того, возникает вопрос: почему вообще такие огромные по сравнению с молекулярными масштабами структуры... не находятся в состоянии беспорядочных флуктуаций, а совершают закономерные и к тому же спонтанные (не порождаемые непосредственно внешними силами) макроскопические морфогенетические движения?» Эта цитата взята нами из книги Белоусова /1987, с. 6/), которая содержит обзор трудов многих поколений ученых, занимавшихся проблемами биологического морфогенеза.

Эти труды включают принципы преформистского толка Гиппократата; «целевой» тип объяснения и положения о постепенном развитии — эпигенезе — Аристотеля; типологический способ объяснения Бэра; исторический способ объяснения, возникший благодаря Дарвину и Геккелю; преформизм Лейбница и других авторов; «механику развития» Ру; эмбриональные регуляции Дриша; теорию морфогенетического поля Гурвича; концепцию физиологических градиентов Чайльда и вытекающие из нее более поздние представления о позиционной информации; химические модели Тьюринга и их усовершенствование школой Пригожина, и многие другие. Благодаря им к настоящему времени биология располагает колоссальным объемом конкретных знаний о путях и формах развития организмов. Мы лишь кратко отметим некоторые из них, наиболее интересные с точки зрения нынешнего, первоначального этапа солитонной биологии и ее задач разработки солитонных математических и физических моделей биологических явлений.

Дриш, в ходе эмбриологических экспериментов отделив друг от друга два бластомера морского ежа, показал, что каждый из них способен развиться в полноценный организм. Способность части зародыша развиться в целостную особь, т.е. компенсировать отсутствующую часть, Дриш назвал эмбриональной регуляцией. Он также сформулировал в этой связи закон: путь развития части зародыша есть функция положения этой части относительно целого (обратим внимание на то, что в созвучии с этим «путь развития» отдельного домена также является функцией его положения относительно целого ансамбля доменов).

Накопление фактических материалов об интегрированности процессов развития обусловило необходимость поиска факторов,

действием которых ее можно было бы объяснить. В этой связи Гурвич поставил задачу отыскания характеристик зависимости между судьбой элемента зародыша и его положением для совершенно конкретных процессов развития, а также выдвинул идею морфогенетического поля, основы теории которого он постоянно видоизменял и совершенствовал. Морфогенетическое поле рассматривалось как поле сил, действующих на клетки и управляющих их движением. Вопрос об источниках силового поля и тем более о его физической природе не ставился. Гурвичу принадлежат первые математические модели развивающихся систем.

В работах по морфогенезу он отмечал, что «здесь мы сталкиваемся с основной проблемой биологии — поддержанием формы при постоянном обновлении субстрата — в ее наиболее глубоком смысле» (Гурвич /1983, с. 27/). Отметим созвучие этой «основной проблемы биологии» со свойствами солитона как движущегося устойчивого образования, поддерживающего свою форму при постоянном обновлении своего состава (субстрата). Если субстрат постоянно обновляется и не может поэтому выполнять функцию устойчивого начала биологической системы, то что же в ней устойчиво и способно выполнять данную функцию? Предлагаемый нами ответ заключается в том, что ее могут выполнять и выполняют устойчивые автолокализуемые энергетические сгустки — биосолитоны.

Поясним слова о постоянном обновлении субстрата в организмах, напомнив, что, например, белки организма постоянно распадаются до аминокислот и воссоздаются вновь. Только третья часть этого синтеза приходится на долю аминокислот, поступающих с пищей. Период полураспада (время, за которое обновляется половина белковых молекул) составляет для белков организма человека примерно 80 дней, для белков печени и плазмы крови — десять суток, слизистой оболочки кишечника — трое-четверо суток, а гормона инсулина — шесть-девять минут. Такое постоянное переваривание собственных и «чужих» белков обеспечивает его непрерывное обновление. Более того, «белки цитоскелета соединяются друг с другом... и формируют сложные, динамические, взаимодействующие между собой структуры» (Фултон /1987, с. 7, 109/). Другими словами, цитоскелет — истинно динамическая структура, а вовсе не ферма из статичных строительных балок, как мы обычно представляем себе строительную конструкцию. Каж-

дая микротрубочка и филамент в трубочке постоянно локально перестраиваются.

Обзор биологических данных о важной роли цитоскелетно-мембранных перестроек практически для всех морфогенезов имеется в книге Белоусова /1987, глава 2/, который связывает его с утверждением Гурвича: «в живых системах в молекулярной области понятие структуры нельзя противопоставлять понятию процесса; единственно правильным было бы говорить о структурированных процессах, протекающих в молекулярных комплексах очень различной степени устойчивости». Белоусов подчеркивает, что «в любом случае при образовании надмолекулярных структур цитоскелета и мембраны решающее значение имеет конформация (пространственные характеристики) взаимодействующих субъединиц». Он также отмечает, что все известные «факты ставят важнейший, еще не решенный вопрос о факторах пространственно-временной регуляции структурных преобразований... цитоскелетных структур».

Важная часть этой проблемы заключается в связи цитоскелета с белоксинтезирующей системой: имеется много достоверных данных о влиянии формы клеток — степени их распластанности, поляризации или округления — на протекающие в них синтетические процессы. Например, клоны эритроидных клеток, гибридизированных с фибробластами, резко различаются по своей способности синтезировать гемоглобин в зависимости от того, распластаны ли они по субстрату как фибробласты или же находятся в суспензии и имеют шаровую форму. Между тем их геном в обоих случаях одинаков. С учетом множества подобных примеров можно заключить, что «форма клеток и характер их контактов, а значит и целостная структура ткани оказывают весьма существенное, а в ряде случаев и определяющее влияние на спектр синтезируемых клетками белков. Следовательно, морфогенез тканей может оказаться звеном, определяющим их последующую дифференцировку. Этот вывод имеет общебиологическую важность, так как он показывает, что, изучая механизмы собственно морфогенеза, мы можем надеяться понять также и принципы регуляции клеточных дифференцировок. О реальных механизмах связей между морфогенезом и дифференцировкой пока известно еще очень мало. Однако очевидно, что речь должна идти о каких-то влияниях на клеточный геном, исходящих от мембраны клетки и внеклеточного матрикса и передающихся через структуру цитоскелета» (Белоусов /1987, с. 72/).

В последние десятилетия в биологии наблюдается возрождение интереса к проблеме морфогенетических полей и появление новых полевых подходов: концепция позиционной информации Вольперта (Wolpert, 1969), информационные волны Гудвина и Коэна (Goodwin, Cohen, 1969), эпиморфные поля (French et al., 1977) и ряд других. «Следует отметить, что ни в одном из этих подходов почти не обсуждается... вопрос о физической природе поля. Тем не менее наличие каких-то факторов, посредством которых каждая клетка соотносит свой путь развития со своим положением, уже не подвергается сомнению» (Белоусов, Чернавский /1982/). В третьей главе нашей книги уже показывалась тесная связь понятия «солитона» с понятием «поля». Соответственно солитонная биология располагает своими особыми подходами для развития идей морфогенетического поля и полевого объяснения многих биологических феноменов. В частности, загадочная «позиционная память» клеток понимается ею как имеющая биосолитонную основу.

В организме человека и млекопитающих насчитывается около 200 типов различных клеток. «Можно утверждать, что в основе большинства, если не всех морфогенезов лежит чередование процессов поляризации (растяжения) и сокращения клеток; при этом «информация» о будущей форме возникает в основном на первой фазе, а ее физическая реализация происходит на второй (Белоусов /1987, с. 87/). У всех многоклеточных организмов все клетки объединены в особые системы — ткани. Тканью называется группа клеток вместе с межклеточным веществом, которые имеют сходную структуру и выполняют определенную функцию в организме. В развивающемся организме каждая ткань формируется из особых частей зародышевых листков. Наиболее древние ткани — покровные и ткани внутренней среды (кровь и соединительная ткань), а мышечная и нервная — относительно «молодые» и более специализированные, без них обходятся некоторые животные. Эти четыре типа тканей универсальны для всех видов животных и благодаря им выполняются все функции любого организма. Лишь у немногих групп низших многоклеточных (например, губок) тканей вообще нет или они слабо выражены. Ткани растений значительно отличаются от тканей животных и более разнообразны. Ткань состоит из клеток, окруженных межклеточным веществом, которое вырабатывают сами клетки. Межклеточное вещество — очень важная составная часть тканей,

во многом определяющая их свойства. В каждой ткани соотношение количества клеток и межклеточного вещества различно и служит одной из важных ее характеристик.

Блочный характер построения биотел с течением времени обогащается все новыми научными фактами универсального биологического характера. Так, цитогенетика выявила, что все клетки каждого многоклеточного организма, в том числе самых сложных, идентичны по набору генетического материала, упакованного в хромосомные нитевидные наборы, и вся видимая, нередко очень значительная разница в формах между отдельными клетками организма определяется только соответствующим различием в активации тех или иных участков на этих нитях. Другими словами, организм построен из одинаковых клеток как стандартных блоков, но каждая клетка из-за специфической активации тех или иных своих генов в ходе развития организма модифицируется по своему. Подобные факты самоорганизующегося суперблочного строения живого организма, вероятно, имеют значительную область пересечения (если не полного совпадения) с выдвигаемым нами положением о супердоменной структуризации организма с реализацией в нем суперсети биосолитонных доменных стенок.

На рис. 5.2.1 приведен пример дробления яйца у представителя мшанок *Syniopelta*, происходящего в ходе онтогенетического развития и имеющего «2-лучевую симметрию с неполной 4-лучевой» (Беклемишев /1964, с. 68/). Обращает на себя внимание закономерный доменообразный характер взаиморасположения клеток при таком дроблении. Известно несколько основных типов дробления яйцеклеток у живых организмов, отличающихся отношениями симметрии во взаиморасположении обра-

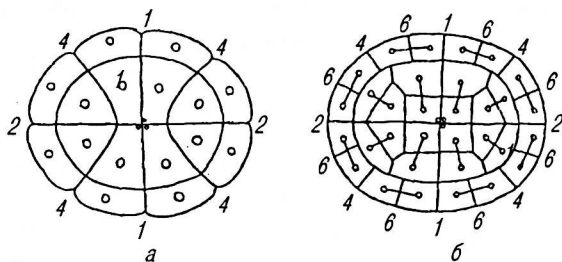


Рис. 5.2.1

Две стадии дробления яйца у *Syniopelta* (по Беклемишеву /1964/). Цифры обозначают последовательность полос дробления.

зующихся клеток: спиральный, радиальный и билатеральный. Редко наблюдается еще тип дробления, при котором дробящиеся клетки образуют неправильные цепочки.

На проявление такой строгой пространственной организации значительное влияние оказывают распределения желтка и активной цитоплазмы в яйце (см., например, книгу Газаряна, Белюсова /1983, глава 5/).

Интересен вопрос об участии биосолитонов в избирательной взаимоадгезии клеток, определяющей многие особенности поведения многоклеточных систем. По одной из известных гипотез (Маленков /1965/) эта адгезия определяется согласованностью давно известных волнообразных деформаций поверхности обеих клеток. По нашему мнению, данные волны деформации, вероятно, являются биосолитонами, и в результате их прохождения и взаимодействия адгезирующие клетки обретают возможность создать совместный биодоменный комплекс (неадгезирующие клетки такого комплекса создать соответственно не могут).

Заметим попутно, что нет необходимости в разделе о морфогенезе рассматривать патологическое формообразование как что-то принципиально отличающееся от нормы, поскольку в морфологии существует положение о том, что уродство есть вариант нормы. В этой связи «наверное нельзя назвать хотя бы один тип отклонений, который у какого-либо таксона не становился нормой» (Мейен /1973/).

В качестве основной рабочей гипотезы для изучения биологических объектов с солитонно-доменных позиций нами выдвигается следующее положение: все живые организмы (и вообще живое вещество) представляют собой супердомены с суперсетью биосолитонных доменных стенок, причем их биологические движения обусловлены движением биосолитонных доменных стенок. В свете данного положения могут быть переформулированы известные ранее биологические законы, например, указанный выше закон Геккеля может звучать так: онтогенез биологических супердоменов (или суперсети их биосолитонных границ) есть краткое повторение их филогенеза.

В качестве одного из важнейших процессов морфогенеза рассмотрим деление (митоз) клеток, представляющего собой вариант сложной биологической трансформации, на предмет возможного участия в нем биосолитонов.

5.3. Деление клеток

Обязательная репродукция биологических систем является условием их существования на протяжении длительного времени. Важность репродукции клеток определяется во многом следующими моментами: 1) рост отдельной клетки ограничен известным пределом; 2) отдельная клетка имеет ограниченную продолжительность жизни. Оба этих ограничения преодолеваются в процессе репродукции, которая определяется как образование двух совершенно новых клеток из одной старой. Организм человека, например, состоит из 10^{13} клеток и почти все они делятся с разной скоростью: одни каждые восемь часов, другие лишь раз в несколько недель. Обсуждаемое на протяжении всей истории науки сходство кристаллов и живых тел выразилось, в частности, в существовании теории, появившейся вскоре после открытия клеток (но затем отвергнутой), которая постулировала, что «клетки выкристаллизовываются из жидкости, называемой цитобластемой» (Мэзия /1963, с. 124/).

Задачей настоящего параграфа является выявление первичных данных о возможном участии биосолитонов в делении (митозе) клеток с тем, чтобы предоставить специалистам принципиально новый подход к ряду фундаментальных для биологии и загадочных явлений митоза, а также дополнительно подкрепить веру многих биологов и автора в существование универсальных принципов и механизмов биологических трансформаций. На протяжении данного параграфа нами будет использоваться стандартная для биологов терминология в рамках классической монографии о митозе Мэзия /1963/, из которой нами воспроизводятся основные биологические факты.

Митоз (от греческого — «нить») — общий способ деления всех клеток растений и животных. При этом наследственный материал (ДНК), заключенный в удвоенном наборе хромосом, распределяется между двумя дочерними клетками. Более или менее равномерно распределяются также все цитоплазматические органеллы. Митоз представляет собой упорядоченный процесс с синхронным протеканием многих его частей, включающий ряд этапов: интерфазу, профазу, метафазу, анафазу, телофазу. Он осуществляется с помощью «митотического аппарата», обладающего двойным лучепреломлением и включающего веретена, центриоли, звезды, ядра (до их распада) и хромосомные структуры (после

разрушения ядерной оболочки). Этот митотический аппарат вовсе не является постоянным органом клетки. Условно можно сказать, что он появляется тогда, когда в нем возникает необходимость, и исчезает, когда его работа выполнена. Он представляет из себя в высшей степени нестойкую структуру и с большой легкостью исчезает всякий раз, когда делящаяся клетка подвергается «дурному обращению». (Это напоминает рассмотренный нами в параграфе 2.4 пример с поэтапным самовосстановлением заново двигательной системы у амёбы, обездвиженной в результате применения механического, теплового или химического воздействия; кстати, амёбоидные движения у делящихся клеток давно известны). Наблюдение за частями данного митотического аппарата показывает, что на определенных этапах митоза с ними происходят удивительные и малопонятные трансформации.

Так, в начале профазы тонкие двойные нити хромосом закручиваются в плотную спираль, и одновременно исчезают ядрышко клетки и ядерная оболочка, так что хромосомы оказываются лежащими внутри цитоплазмы. Удвоенные во время интерфазы центриоли перемещаются к полюсам клетки животного организма, и между ними формируется веретено деления, построенное из многочисленных микротрубочек. В конце профазы каждая хромосома оказывается построенной из двух сестринских хроматид, соединенных между собой. Каждая хроматида — это будущая хромосома дочерней клетки. В начале метафазы хромосомы совершают ряд резких движений, но затем как по мановению волшебной палочки внезапно выстраиваются по порядку и словно застывают, образуя «метафазную пластинку». Анафаза всякий раз изумляет исследователя своей неожиданностью: все сестринские хроматиды вдруг теряют связь между собой и дружно удаляются друг от друга к противоположным полюсам клетки. При этом своем движении хромосомы обычно принимают V-образную форму. Вершины этой фигуры направлены в сторону полюсов, и к ним прикреплены микротрубочки (нити веретена). Телофаза начинается с резкой остановки хромосом в полюсах клетки. Здесь они постепенно разрыхляются, теряя форму спирали и обретая вновь форму тонких нитей. Вокруг обеих групп хромосом одновременно формируются новые ядерные оболочки, а затем появляются и ядрышки. Веретено деления исчезает. Все тело клетки делится на две половины с образованием жесткой перегородки у расте-

ний или с перетяжкой плазматической мембраны у животных клеток по типу перепоясывания в талии.

Известны многочисленные попытки объяснить наблюдаемые движения частей митотического аппарата — прежде всего, митотических центров и хромосом — апелляцией к известным в физике силам: электрическим, магнитным, реактивным и др. (обзор имеется у Мэзия /1963/). Все эти гипотезы оказались или экспериментально опровергнутыми или «зависшими в воздухе» без подтверждения или полезного продолжения. В качестве примера отметим силы, возникающие между телами в колеблющейся жидкости. «Физический принцип, приписываемый Бьеркнесу и заключающийся в том, что два колеблющихся тела в жидкой среде могут взаимно притягиваться и отталкиваться в зависимости от соотношения их колебаний, уже в течение многих лет владеет умами исследователей митоза; ибо здесь, может быть, и кроется механизм, объясняющий взаимодействие между митотическими центрами и кинетохорами. Этот механизм в отличие от многих других, по крайней мере, ставит перед экспериментаторами вопрос: колеблются или не колеблются тела, с которыми мы имеем дело? Недавно Пфейфер сообщил о своих наблюдениях над митотическими центрами в делящихся лейкоцитах, где он обнаружил колебания с амплитудой от 2 до 5 мкм и частотой от 0,7 до 1,4 колебания в минуту» (Мэзия /1963, с. 262/). Конечно, названных колебаний со столь малыми параметрами совершенно недостаточно для развития сколь-либо значимых сил, и принцип Бьеркнеса за прошедшие десятилетия в теории митоза также не утвердился.

Возникновение концепции биосолитонов (включающей раздел о доменизации) предлагает новый подход к объяснениям ряда митотических явлений. Проведенный нами первичный анализ обратил внимание на существование следующих групп фактов, свидетельствующих в пользу участия биосолитонов в митозе:

- параллелизм ряда движений в делящейся клетке с движением у амёб, ресничек и жгутиков, участие в которых биосолитонов нами уже отмечалось во второй главе;

- энергетические особенности митоза, включающие протекание основной фазы деления клетки без видимого энергопотребления;

- непосредственное наблюдение волновых процессов солитонного типа при делении клеток.

Кратко рассмотрим каждую из этих групп фактов по отдельности.

Параллелизмы между движениями в клетке при митозе и биосолитонными движениями у клеток в других ситуациях. Имеется целый ряд данных о связи дробления с амебоидным движением, а также об аналогии между цитокинезом и мышечным сокращением (Мэзия /1963, с. 313, 317, 318, 331/). Многим специалистам в области митоза, также как и другим биологам, верится в существование унифицированной природы биологических движений; аналогия между разными видами биологических движений и двигательных структур «неизбежно должна страстно взывать к нашему представлению о биологическом единстве» /там же, с. 318/. Участие биосолитонов в амебоидном движении демонстрировалось нами в главе 2. Также нами уже отмечалась аналогия между самовосстановлением заново амебоидного движения у амёб после его разрушения и периодическим самовосстановлением митотического аппарата после его полной деструкции.

Напомним, что, как рассматривалось в главе 2, жгутиковое движение может переходить в амебоидное и наоборот. Показательный пример легкого биологического превращения амебоидного образа тела и движения в жгутиковый образ, демонстрирующий принадлежность этих двух образов к единой морфодинамической системе, дает простейший одноклеточный организм *Naegleria gruberi*. Перемещаясь по поверхности субстрата этот организм имеет амебоидную форму и движение, но попав в подходящую жидкую среду он превращается в свободно плывущую клетку, имеющую вытянутую обтекаемую форму и снабженную жгутиками с обычной для ундулоподий схемой строения «9+2».

Исследователи митоза считают, что митотические центры и «базальные тельца» ресничек и жгутиков представляют собой идентичные или гомологичные образования. Этот класс самовоспроизводящихся частичек может служить альтернативно либо при образовании нитей митотического веретена, либо при образовании жгутиков и ресничек, либо, наконец, у некоторых жгутиконосцев выполнять обе функции одновременно. При этом кинетохор может стать центриолью, центриоль может стать базальным тельцем, а цитастер может представлять собой предсуществующую базальную гранулу, превратившуюся в центриоль (Мэзия /1963, с. 74, 78/).

Добавим к этому, что сравнительное содержание аминокислот в митотическом аппарате, состоящем более чем на 90% из белка, оказывается поразительно сходным с аминокислотным составом белка, выделенного из жгутиков *Chlamydomonas*, а так-

же в активные мышцы млекопитающих. Сходство по происхождению сократительных элементов митотического аппарата с сократительными элементами жгутиков и ресничек подтверждается также в иммунологических тестах.

Энергетические особенности митоза. Митоз имеет две важные особенности: период деления не требует затрат энергии (движется как запущенная солитонная волна) и после начала деления его трудно остановить (как и движущуюся солитонную волну). Скажем об этом подробнее.

Период деления не только не сопровождается повышением дыхательной активности, поставляющей новую энергию, но даже ослабляется. «Целая серия разнообразных экспериментов по искусственному выключению дыхания и окислительного фосфорилирования, а также по ограничению поступления энергии привела к ... обобщению: митоз может быть предотвращен, если эти воздействия производятся до начала деления, но, раз начавшись, он уже не останавливается. Более того, момент наступления необратимости характеризуется выраженным постоянством для одного и того же типа клеток... Эти обобщения логически приводят к гипотезе, согласно которой энергия для данного деления запасается в процессе подготовки к этому делению и не зависит от процессов окисления, протекающих во время самого деления. Следующая гипотеза, наиболее полно разработанная Сванном, заключается в том, что завершение наполнения «энергетического резервуара» играет роль регулирующего фактора при делении. Если представить эту гипотезу в предельно упрощенном виде, то можно вообразить, что «спуск» резервуара приводит в действие механизм деления» (Мэзия /1963, с. 94/). Добавим, что АТФ как универсальный биологический аккумулятор энергии оказывается здесь ни при чем, поскольку, например, в яйцах морского еже уровень АТФ не изменяется в течение деления /там же, с. 96, 341/.

Наша концепция биосолитонов предлагает в качестве такого энергетического резервуара солитонные энергетические объекты. При этом процесс аккумуляции энергии в стадии подготовки митоза представим в виде образования сгустка энергии — солитонной волны (или связки волн), начало движения которой после ее образования запускает механизм деления и определяет его безостановочность. (Ниже будут приведены данные о прямых наблюдениях волн солитонного типа как «волн активации» клеточного деления).

«Привлекательная черта представления о резервуаре энергии состоит в том, что оно дает одно простое объяснение потребности в окислительных процессах у клеток, готовящихся к делению, и видимому отсутствию таких потребностей во время деления... Говоря об энергии в биологическом смысле, мы обыкновенно имеем в виду последовательность процессов, включающих «активацию» некоторой системы, после чего эта система выполняет какую-то операцию, по-видимому, спонтанно. Вместо того, чтобы представлять себе «склад энергии» в виде запаса какого-то макроэргического соединения, мы можем скорее вообразить, что митотический аппарат сам представляет собой такой склад энергии, но не в том смысле, что он содержит некое высококалорийное топливо, химический состав которого может быть установлен..., а в том смысле, что его потенции представляют собой результат затраты энергии при подготовке к его образованию и что эти подготовительные процессы не могли бы быть завершены без такой затраты энергии. Эта точка зрения открывает возможность простого истолкования обсуждавшихся нами данных. «Момент наступления необратимости» можно трактовать как момент времени, к которому завершаются какие-то синтезы, происходящие с поглощением энергии... С точки зрения «экономики» клетки «стоимость» митоза в энергии оплачивается еще до того, как он начинается» (Мэзия /1963, с. 98, 99/).

Данная цитата дополнительно обращает внимание на возможность истолковывать митотический аппарат как распределенный склад солитонных форм энергии, готовящихся заранее и определяющих ход митоза после запуска стартовых солитонных волн. Это вполне согласуется с представлением о том, что «энергетический резервуар может быть вмонтирован в митотический аппарат, который в этом случае можно было бы рассматривать как активированную систему, видимая «работа» которой уже не предъявляет никаких дальнейших требований к внешним источникам энергии. Такой взгляд согласуется с накопленными нами наблюдениями над тем, как осуществляется «биологическая работа», при которой активация предшествует целесообразной конечной реакции и кажется, что последняя происходит самопроизвольно» /там же, с. 341/. Напомним, что солитоны могут быть неподвижными, «сидячими», и для их запуска в движение может потребоваться весьма малая энергия.

Цитологами особенно подчеркивается одновременное, параллельное существование многих процессов в клетке: например, подготовка к следующему делению начинается тогда, когда еще не закончено предыдущее деление, причем «энергетические резервуары» для разных делений не взаимодействуют, хотя существуют одновременно, и т.д. (Мэзия /1963, с. 41, 100/). Поэтому любая теория, пытающаяся объяснить наблюдаемые феномены митоза, должна предусматривать такую «развязку» одновременно протекающих в клетке событий, возможность их взаимодействия без взаимного разрушения. Теория солитонов, возможно, как никакая другая, естественным образом дает такие возможности на основе известных способностей солитонов к неразрушающим столкновениям с другими солитонами, а также прохождению через солитонные среды без диссипации энергии и «без беспокойства» (или с относительно малым беспокойством) для других структур на этих средах. А как ведут себя при делении клетки другие биосолитоны, присутствующие в клетке: локомоторные, ростовые и пр.? Являются ли энергетические объекты — биосолитоны, участвующие в митозе, вновь образованными без затрагивания уже существовавших в клетке? Биологические факты свидетельствуют о том, что клетка экономно распоряжается биосолитонами как своими энергоресурсами, преобразуя в период своего деления биосолитоны других видов в биосолитоны митотические. Речь идет о том, что в период деления клетки многие другие виды деятельности клетки, связанные с биосолитонами, практически прекращаются. Например, амёбы и фибробласты с их локомоторными биосолитонами и псевдоподиями, вступая в деление становятся шаровидными и неподвижными. Делящиеся амёбы теряют свою способность плотно примыкать к поверхностям. У ресничных инфузорий деление характеризуется поразительным ослаблением интенсивности движений. Гены функционируют именно в период между делениями клетки, а не во время деления. Во время деления не происходит увеличения «сухого веса» клетки. Снижается активность ферментов и т.д. «Многие из наблюдаемых нами проявлений активности клеток позволяют предполагать, что период деления — это период пониженной физиологической активности, как будто клетка сосредотачивается на воспроизведении и забрасывает свои обычные дела по хозяйству» (Мэзия /1963, с. 348/). Создается впечатление, что все биосолитоны по-возможности мобилизуются на митоз, а по его окончанию

возвращаются к своей обычной деятельности. Соответственно, из фактов резкого снижения конкретных видов физиологической деятельности и способностей клеток при митозе можно получать дополнительные свидетельства в пользу того, что в этих видах деятельности участвуют биосолитоны, отмобилизованные на митоз. Например, утрата клетками при митозе способности к взаимной адгезии свидетельствует об участии солитонных механизмов в этой специфической адгезии, к чему мы вернемся несколько позже. То, что гены функционируют только в период между делениями клетки, также дополнительно свидетельствует в пользу существования солитонных генных механизмов.

Наблюдения волн солитонного типа при делении клеток. Перечислим ряд известных биологических данных, включая участие волн в акте оплодотворения яйцеклеток.

В дробящихся яйцеклетках амфибий были обнаружены периодические изменения оптических и механических свойств поверхности, прокатывающиеся волнами от анимального к вегетативному полюсу с постоянной скоростью около 0,6 мм/мин и частотой, равной частоте нормальных делений дробления (Takeichi, Kubota /1984/; Белоусов /1987, с. 122/). Насколько мы можем судить по описанию, данные волны имеют признаки солитонных волн. Для их запуска достаточно приложить к яйцеклетке механический стимул — уколоть ее иглой, что напоминает рассмотренные в главе 2 ситуации, когда механических стимулов оказывается вполне достаточным для реализации локомоторных биосолитонов через межклеточные стенки у нитчатых водорослей (рис. 2.4.5) или через нитку, связывающую две половинки перерезанного пополам дождевого червя. Аналогичные волны у данной яйцеклетки инициируются также ее обычным осеменением, т.е. являются биологической нормой. Их движение сопровождается выраженной структурной перестройкой среды их прохождения. Другими словами, сам акт осеменения яйцеклетки — зарождения нового организма — связан с прохождением по неоднородной яйцеклетке интегральной волны солитонного типа, названной биологами волной активации.

Расхождение хромосом (точнее кинетохоров) от экватора к полюсам клетки при митозе «носит характер равномерного, иногда замедленного, но никогда не бывает ускоренным; это исключает возможность притяжения (при котором величина силы обратно пропорциональна квадрату расстояния)» (Мэзия /1963,

с. 257/). Это равноскоростное движение хромосом предваряет идущая несколько впереди хромосом особая волна солитонного типа, похожая на доменную стенку. «Сванн установил, что ослабление двойного лучепреломления в областях веретена, расположенных между хромосомами и полюсами... движется по направлению к полюсам как волна, идущая впереди движущихся хромосом. На этом основании он приписывает изменения в двойном лучепреломлении действию «структурного агента», возникающего в хромосомах, который может быть частью механизма, приводящего в движение хромосомы» /там же, с. 275/. Кроме прочего, подобные волны «структурных агентов» связываются их открывателем Сванном, являющимся одним из широко цитируемых цитологов, с образованием борозды на поверхности делящейся клетки и пр. По совокупности данных нам представляется, что таким «структурным агентом» являются биосолитоны.

К этим фактам можно добавить, что митотический аппарат обычно описывается как связанный с гелем, в котором могут распространяться фронты желатинизации. Эта митотическая желатинизация, измеряемая по внезапному увеличению вязкости цитоплазмы, предшествует образованию организованного митотического аппарата и играет в нем важную роль. Характерно, что воздействия, препятствующие желатинизации, блокируют и сам митоз (Мэзия /1963, с. 105/).

О доменизации. Ряд известных структурно-функциональных особенностей митоза обращает внимание на процессы (Мэзия /1963, с. 129, 132–141, 207, 261, 292 и др./), сходные с процессами доменизации, при которых поведение частей зависит от энергетических характеристик целого и при которых образуются солитонные доменные стенки. «Самой яркой демонстрацией влияния «внутренней среды» клетки на митотические процессы является синхронное протекание столь многих из них... Синхронность столь многих процессов приводит нас к заключению, что процессы, определяющие скорости, могут управляться изменениями, скрытыми во внутриклеточной среде. Нам едва ли удастся понять, как приводится в действие митотический цикл, если мы будем рассматривать только «внутреннее хозяйство» митотического аппарата» /там же, с. 333/.

Имеется ли в клетке какое-либо напряжение, релаксация которого может осуществляться через процесс доменизации и супердоменизации? Да, имеется, и это напряжение связано во мно-

гом с ростом клеточной массы. Например, для цитологов сохраняет определенный смысл гипотеза, выдвинутая 90 лет назад Гертвигом: «когда масса цитоплазмы приближается к пределам сферы влияния ядра, в клетке устанавливается состояние физиологической неустойчивости, которое он /Гертвиг/ образно описал как состояние «напряжения». Именно это напряжение и толкает клетку на путь деления» (Мэзия /1963, с. 43/). Кстати, как известно, в детородных органах животных организмов перед копуляцией также генерируется механическое напряжение, создающее предпосылки для особо интенсивных в этом случае доменообразовательных биологических процессов.

5.4. О проблеме морфологических параллелизмов, законе гомологических рядов Вавилова и целостности в биологии

Еще в XIX веке И.В.Гете утверждал единство структурных принципов формообразования у разных биологических объектов и выступил автором названия «морфология» для самостоятельной науки о биологических формах и ее законах. Он считал, что все части растения есть повторение с теми или иными модификациями одной и той же его части или элементарного члена — листка. По Гете, «все есть лист, а в силу этой простоты становится возможным величайшее многообразие» (Шафрановский /1968, с. 133/). «Различные части растения возникают из одного тождественного органа, который, оставаясь в своей основе всегда одним и тем же, модифицируется и усложняется путем прогрессивного развития» (Гете /1953, с. 103/). «Мы убеждены, что при некотором упражнении не составит труда объяснить таким путем все многообразие форм цветков и плодов; для этого, однако, требуется уметь надлежащим образом оперировать установленными выше понятиями расширения и сжатия, сближения и анастомоза как алгебраическими формулами, зная, где их нужно применять» (Гете /1953, с. 50/).

Однако, судьба представления о существовании собственно морфологических законов и механизмов оказалась далеко не простой. Сложность этих вопросов, помноженная на распространенную в биологии практику объяснять все особенности строения биологических организмов адаптацией к внешней среде и предполага-

емой функции (подчас очень упрощенно трактуемым без учета полифункциональности биологических органов, знания физических особенностей живого вещества и пр.), привели к своеобразной ситуации: «Живое вещество мы обычно мыслим в виде бесформенной амёбы, аморфной протоплазмы. Дескать только функция и среда наложили на эту протоплазму определенные формы. Так ли это? Неужели живая протоплазма не может организовать свое пространство в нечто более упорядоченное?» (Мейен /1977/).

С вопросом о существовании биоморфологических законов связана одна из актуальных проблем биологии — проблема морфологических параллелизмов или проблема независимых сходств. Ее развернутый анализ можно найти, например, в работах Белоусова /1980/, Воробьевой /1980/, Заварзина /1974/, Мейена /1972–1977/, Meyen /1973/, Татарина /1976/, Урманцева /1974/.

Речь идет о том, что среди задач эволюционной морфологии важное место занимает исследование характера признаков сходства между организмами с целью выяснения их филогении и установления общих закономерностей структурных преобразований. При этом внимание исследователей все чаще привлекают независимые сходства, именуемые в морфологии параллелизмами и конвергенциями. Проблема независимых сходств ведет свое современное научное начало от Ч. Дарвина, Е. Копа, Н.И. Вавилова. Накопилось очень большое число данных о конвергенции при развитии тканевых и других структур (желез, мышц, нервов и пр.), как, например, присутствие в хитине насекомых гаверсовых систем, аналогичных гаверсовым системам в кости позвоночных, т.е., казалось бы, совсем в другой по химическому составу среде и совсем у других организмов. В настоящее время признается, что явления независимого сходства в биологическом плане имеют две первопричины — унаследованную организацию и ограниченность путей ее приспособления. Эти причины тесно связаны с механизмами морфогенеза или самоорганизации живого вещества, имеющими ключевое значение для реализации независимых сходств.

Яркой страницей в истории этой проблематики явился известный закон гомологических рядов Вавилова, установивший параллелизм в изменчивости организмов. Эта работа Вавилова обобщила ряд ранее известных данных и способствовала множеству новых исследований о гомологических рядах изменчи-

ности у растительных и животных организмов. К настоящему времени гомологические ряды изменчивости установлены, например, у паразитических червей, моллюсков, земноводных, черепах, ящериц, млекопитающих и пр. Многие другие исследователи также внесли ценный вклад в данную тематику. Так, Заварзин /1925/ опубликовал работу с характерным названием «Параллелизм структур как основной принцип морфологии», для которого наиболее характерно то, что аналогичные структуры развиваются во многом независимо от сходства генотипов.

Кренке обнаружил, что все так называемые отклонения в строении листовых пластинок какого-либо вида растений — неполное расчленение, асимметричное вычленение новой лопасти и т.п., можно упорядочить в закономерные ряды форм, причем сходные последовательности формирования пространственной структуры, отмечаемые в пределах ряда, будут свойственны различным по систематическому положению группам растений. Кренке назвал обнаруженную закономерность «феногенетической изменчивостью», особенно подчеркивая ее отличие от закона гомологических рядов наследственной изменчивости Вавилова. По существу, Кренке обнаружил и продемонстрировал на сотнях видов растений выполнение собственных структурных законов морфологии (цитируется по Меуен /1973/). Продолжение этих исследований освещено в книге Короны /1987/.

D'Arcy Thompson /1942/ предпринимал попытки найти соответствующие морфологические закономерности путем сравнительного анализа форм различных биотел с помощью обобщенных координатных сеток.

Фундаментально подходил к биологической тематике Вернадский /1965, 1975, 1978/, предполагая специфичность пространства живого вещества, отраженную в особенностях биологических симметрий. Он утверждал, что между симметрией косных естественных тел и явлений и симметрией живого вещества существует резкое различие, без всяких переходов и исключений, причем для живого вещества характерна какая-то неевклидова геометрия. В явлениях жизни Вернадский видел проявления специального реального пространства-времени, которое физически проявляется в смене поколений живых организмов и т.п. Прогресс науки, по его мнению, должен привести к такому уровню развития биологии, когда станет естественным трактовать биологические явления именно с этих позиций.

Любищев /1982/, ставя целью своей жизни создание естественной системы классификации организмов, полагал, что путь к этому лежит через математическое изучение симметрий и характерных кривых в строении организмов, не имеющих непосредственного функционального значения. «Он считал, что закономерности формы являются не только результатом приспособления, но имеют и собственную логику. Более того, форма не является внешним результатом («эпифеноменом») взаимодействия составных частей, а может рассматриваться как самодовлеющая сущность. Форма зависит от этих компонентов, но не определяется ими целиком. Поэтому нужно вскрывать морфологические целостные законы, проявляющиеся в статической и динамической симметрии организмов» (Любищев /1982, с. 6/). Любищев и его единомышленники полагали, на наш взгляд, совершенно справедливо: «биологические структуры лишь в частных случаях определяются выполняемыми функциями, а в более общем случае подчиняются некоторым математическим законам гармонии. В многообразии форм есть своя, независимая от функции упорядоченность, своя закономерная система, обнаруживаемая, например, в процессе выявления симметрий на основе строгого математического описания» (Мейен и др. /1977/).

В работах Любищева имеется множество конкретных биологических фактов, ценных для биосолитонной концепции. Например, рассматривая регенерацию у многоклеточных водорослей, которая обычно сводилась к особой эмбриональной плазме, он приводит пример независимости формы от химического состава и клеточных границ: «у сифонофеи *Briopsis* нет клеточных границ и «эмбриональная плазма» находится в непрерывном движении. Однако регенерация приводит к восстановлению обычной формы, как если бы плазма была неподвижной» (Любищев /1982, с. 235/). Или он рассматривает вопросы эволюционного смещения границ между телесными частями организмов, например, «миграцию» плавников: «в сравнительно анатомическом ряду в построении того же плавника перестают принимать участие задние метамеры и включаются новые, передние. В результате оказывается, что гомологичные плавники у крайних форм (организмов) могут не содержать ни одной общей гомологической части: форма сохранилась, содержание полностью сменилось... Подобных фактов можно привести множество: форма оказывается постоянной при изменении состава, и эпифе-

номенальное толкование этого явления на низшем уровне более или менее гомогенных образований (водопад, пламя) становится все менее убедительным, чем более гетерогенными являются разбираемые объекты» (Любищев /1982, с. 236/). Названные эволюционные смещения границ, по нашему мнению, можно интерпретировать как смещения биосолитонных доменных стенок.

Говоря о загадочной гармоничности взаимосвязи множества частей у организмов, он отмечал: «Сюда же относятся многочисленные факты, показывающие наличие чего-то однородного, гомогенного в заведомо неоднородном материале. Здесь интереснейшие работы по рисунку бабочек Гебхардта (Gebhardt, 1912) и особенно Шванвича (1949). Везде сложный рисунок бабочек складывается из элементов, которые изменяются как нечто целое, обладающее прочностью, способностью растягиваться, хотя весь рисунок крыла заведомо неоднороден и является мозаикой из множества чешуек» (Любищев /1982, с. 238/). Это «однородное, гомогенное в заведомо неоднородном материале» имеет, по нашему мнению, энергетическую природу (независимую во многом от конкретного химического состава объекта), связанную с автолокализацией энергетических сгустков, и представляет собой ансамбль биосолитонов, гармония которого определяется физико-математическими принципами солитонных конструкций.

Вслед за Любищевым Мейен утверждал, что глубокое понимание биологических явлений невозможно без некоторых высших универсальных принципов Морфологии (с большой буквы). В соответствии с этим при анализе проблемы органических форм с учетом различных исторических, функциональных и адаптивных потребностей формирования биоструктур он подчеркивал: «Но все эти исторические, функциональные и адаптивные потребности не могут быть объединены в форму вне специфических законов живых существ. Чтобы открыть эти законы, мы должны изучить физическую структуру органических форм, их математическое описание, свойства биологического пространства (т.е. симметрию живых тел) и законы структурных преобразований, каждое из которых на основе универсальных принципов отвечает за полиморфизм и изоморфизм в мире в целом» (Мейен /1973/). Он также отмечал, что наличие морфогенетических законов или законов «кристаллизации» живого вещества вовсе не отвергает наличия механизмов приспособления формы к функции и вполне согласуется с существовани-

ем естественного отбора, понимаемого именно как отбор из тех форм живого вещества, которые вообще могут быть реализованы. Аналогично этому в физической кристаллографии наличие законов кристаллизации не снимает вопроса о том, как растут кристаллы, каково происхождение определенной модификации в природных условиях и как изменение условий внешней среды сказывается на особенностях кристаллизации.

О движущихся в теле биосолитонах как пробе возможной формы будущих органов. Остановимся на одном интересном варианте использования биосолитонов в теле организмов, иллюстрирующем дополнительные возможности участия солитонов в морфогенезе и эволюции телесных форм. Движущийся ансамбль биосолитонов (или отдельный биосолитон) представляют собой некоторую форму в движении. Если ее движение остановить, сделать этот биосолитон «сидячим» (подобно сидячей дислокации в кристалле), то она становится статичной формой. Судя по всему, живые организмы широко используют эту возможность первичного динамического опробывания возможной формы в составе организма до ее фиксации в качестве постоянной формы той или иной части тела. Возможно даже форма всякой локальной части организма в ходе эволюции сначала возникает в виде динамической солитонной волны или целого ансамбля таких волн. Если эта пробная движущаяся солитонная форма оказывается выгодной для жизнедеятельности всего организма (как суперколонии биосолитонов, перерабатывающей неживую материю в живую), то она останавливается в нужном месте и вводится в состав постоянного ансамбля биосолитонов организма в качестве новой формы, статичной относительно других таким же образом возникших его форм.

Тем самым организм имеет возможность сделать богатый перебор и тестирование вариантов форм в составе своего эволюционирующего тела до окончательного выбора того или иного варианта. Однако, если избранная на каком-то этапе эволюции форма части тела становится ненужной или препятствующей жизнедеятельности организма, то он может вновь — в большей или меньшей степени — перевести ее в динамическое солитонное состояние и сдвинуть на новое место, уменьшить в размере и даже вообще избавиться. Косвенным подтверждением этой точки зрения на процесс эволюции форм в организме является то, что в организмах встречаются статичные формы, имеющие вид соли-

тонных волн. Так, форма важного рецепторного образования -ампулярного гребня (крысты) полукружных каналов вестибулярного аппарата человека и животных воспроизводит колоколообразную, одногорбую форму одномерной солитонной волны, наблюдающуюся у многих видов одиночных солитонов (см. параграф 7.2). А форма многочисленных биологических спиралей подобна спиральным волнам солитонного СГ-уравнения. В общем случае форма всего ансамбля солитонов может, конечно, сильно отличаться от простейшей формы одиночного солитона.

О целостности в биологии. Завершая этот краткий тематический экскурс, отметим важную специфическую особенность живого — целостность, чрезвычайную взаимосвязанность разных его проявлений. Ощущение взаимосвязанности, единообразия живого представлено и в художественных произведениях, например, в стихотворении С. Есенина «Цветы»:

«А люди разве не цветы?
О, милая, почувствуй ты,
Здесь не пустынные слова.
Как стебель тулово качая,
А эта разве голова
Тебе не роза золотая?
Цветы людей и в солнь и в стыть
Умеют ползать и ходить...»

В связи с этой специфичностью живой материи «обычно биологу, рассматривающему конкретный феномен, трудно отделаться от мысли, что в этом феномене уже сосредоточены все особенности живого. В науках о неживой природе и в технических исследованиях легко выделяются частные феномены, которым присуща некоторая самодостаточность. ... Биологические феномены устроены иначе — их смысл, как правило, не понять вне общих представлений о природе живого. Правда, очень часто под давлением научной традиции, установившихся образцов научного описания биолог пытается построить локальную модель изучаемого. Но, как уже говорилось, модель неожиданно отказывается работать в той самой области, для которой она строилась. ... Необходимость создания системы четких понятий для биологического теоретизирования — один из ключевых пунктов любичевской программы. Существенно, что понятия должны образовывать именно целостную систему, — вне целого не существует смысла» (Мейен и др. /1977/).

В свете этого важную задачу настоящей книги автор видит в том, чтобы показать возможности теории солитонов и концепции биосолитонов для построения целостной системы биологического теоретизирования.

5.5. Одномерность и двухмерность в биообъектах

Современная математика связывает солитоны, прежде всего, с пространствами одномерными, наиболее исследованными и предпочтительными для солитонов, и двухмерными. Эта выделенность одно — и двухмерных пространств для солитонов определена существованием бесконечного числа законов сохранения для солитонных уравнений, вопросами устойчивости солитонов и пр.

Сходная ситуация базовой одно- и двухмерности имеет место также для биоструктур. Речь идет о линейном характере основных биологических полимеров и ультраструктур — белков и нуклеиновых кислот, хромосомных нитей и пр. Эти линейные биоструктуры тесно связаны с явлениями спирализации, которые могут быть сопоставлены со спиральными волнами солитонного уравнения синус-Гордона. Одновременно для биообъектов характерно присутствие доменообразных, двойниковых структур, на границе между которыми могут существовать биосолитонные стенки одно — или двухмерного характера.

Начнем с белков, которые представляют собой линейные полимеры: их первичная структура имеет вид одномерной цепи, звеньями которой являются аминокислоты (органические соединения двойственного характера, содержащие одновременно кислотную, карбоксильную и основную, аминную группы). Видов этих звеньев, т.е. аминокислот у практически всех белков в организмах всего двадцать. Следующий уровень строения белка — его вторичная структура — представлен двумя типами: альфа-спиралью и бэта-структурой. Альфа-спираль — это жесткое образование, скрепляемое вдоль цепи продольными водородными связями между ближайшими атомами азота и кислорода карбоксильных и аминок групп ее звеньев. В результате остов белковой цепи приобретает вид правозакрученной спирали, а радикалы свободно располагаются вокруг. Бэта-структура — это антипараллельное плоскостное расположение двух участков белковой цепи, сложен-

ной вдвое и скрепленной в этом положении поперечными водородными связями. (Этот спиральный и плоский тип вторичной структуры белковой цепи напоминает спиральный и плоскостной типы движения у жгутиков простейших, рассмотренные в главе 2). В большинстве белков присутствуют оба типа вторичной структуры, но в ряде белков они представлены по отдельности.

Белки имеют также третичную структуру как трехмерную укладку их частей. В некоторых случаях весь полипептид компактно организован в третичную структуру — глобулу. В ней имеются две основные части. Во внутренней части собираются альфа-спиральные гидрофобные участки, плотно прилегающие друг к другу и не оставляющие места для молекул воды. Это гидрофобное ядро — основа третичной структуры многих белков, плотно удерживающая ее конформацию от разрушающего действия окружающей среды. Снаружи от ядра расположен слой, где преимущественно находятся группировки, несущие заряд, т.е. участки, которые обеспечивают реакции белка. Помимо названных гидрофобных сил третичная структура поддерживается водородными связями и силами Ван-дер-Ваальса. Изредка встречаются ионные связи, возникающие в результате соединения двух цистеинов: образуется дисульфидная связь. Четверичная структура белков образована соединением двух или большего числа белковых цепей. Как правило, при этом каждая белковая субъединица имеет все три предыдущих уровня структурной организации. Белки способны образовывать и более высокие уровни структуризации, что лежит в основе создания надмолекулярных образований — органоидов клетки, вирусных частиц. (Эти известные данные приводятся нами по книге Газаряна и Белоусова /1983/).

Заметим, что, если рассматривать спираль первого порядка как одномерную нитевидную структуру и подвергать ее спирализации второго порядка, то можно получить глобулярную, трехмерную структуру, весьма напоминающую третичную структуру белков. (Подобная картина наблюдается у спирального телефонного шнура, который при вращении телефонной трубки из-за дальнейшей его перекрутки более высокого уровня теряет одномерный характер и образует петли с участками двойных спиралей и пр.). Видимо, определенные типы суперспиралей, получаемых на изначально одномерном, нитевидном образовании в результате последовательной реализации на нем спиральных волн солитонного СГ-уравнения все более высокого порядка,

могут служить моделями вторичной, третичной и, может быть, более высоких структурных уровней у белков.

Белки нитевидной формы (фибрилярные) часто играют роль каркаса организма или его отдельных органов. Прежде всего, это кератин, входящий в состав волос, ногтей, мышц, рогов и перьев, и коллаген, образующий сухожилия, кожу, кости и соединительные ткани. Другие нитчатые белки — актин и миозин — образуют мышцы.

Дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК), несущая на себе генетическую информацию в виде линейной последовательности нуклеотидов, представляет собой линейный полимер. За редким исключением молекула ДНК состоит из двух спирально закрученных цепей. Молекулы, способные понимать язык наследственных записей в ДНК, называются рибонуклеиновыми кислотами (РНК) и также являются линейными молекулами. Хотя обычно РНК имеют вид одноцепочечных образований, для всех РНК (в разной степени) характерно образование локальных внутрицепочечных спиральных участков. Хромосома представляет собой суперспирализованную нить, несущую на себе гены. Как подчеркивает Мэзия /1963, с. 127/, «понятие о спиральной структуре красной нити проходит через все описание хромосом, но более глубокий смысл спирализации остается неуловимым». По нашему мнению, весь механизм передачи наследственной информации тесно связан с солитонами.

Филаменты и фибриллы играют основную роль в биологических движениях, что уже отмечалось в параграфе 2.5. Сборка самих микротрубочек, являющихся структурами общепедагогического значения, происходит поэтапно от одномерных к двумерным и трехмерным образованиям: сначала формируются спирали и кольца, с участием которых затем формируются спирально закрученные ленточные структуры, из которых образуются листовые структуры, свертывающиеся в микротрубочки (Каппуччинелли /1982/).

Основной способ деления ядерных (т.е. эукариотных) клеток называется митозом от греческого *mitos* — нить. Это отражает то важное значение, которое одномерные, нитевидные структуры имеют для данного процесса.

Остановимся на наглядных модельных демонстрациях солитонов СГ-уравнения. В главе «Кинки и уравнение СГ» книги о солитонах Додд и др. /1988/ поясняет специфику кинков (т.е. солитонных решений названного уравнения) на примере упругой ленты, воспроизведенном на рис. 5.5.1 а. Конец PS этой ленты

закреплен вертикально, а сама лента достаточна узка по сравнению с ее длиной. Если другой конец QR ленты повернуть вокруг ее продольной оси на угол 2π , а затем закрепить, то скрутка оказывается «в ловушке», блокированная граничными условиями на концах ленты, и не может быть удалена. Таким образом поясняется топологическая, особо устойчивая природа солитонов СГ-уравнения. Если отметить стрелками, как сделано на данном рисунке, вектора нормали к ленте в разных точках ее продольной оси, то при движении от одного закрепленного конца ленты к другому вектор нормали поворачивается на угол 2π . Для рассматриваемой узкой ленты нормальный вектор быстро меняет угол поворота лишь в сосредоточенной области скрутки (для широкой ленты эта область сильно увеличивается). Как указывают авторы цитируемой книги, на этой ленте можно выполнить следующие интересные эксперименты, демонстрирующие свойства кинков.

Предположим, что экспериментатор пальцами перетянет область скрутки в сторону от ее положения равновесия к концу PS ленты и задержит ее там. Если он затем разожмет пальцы, то удерживавшиеся ранее силы упругости смогут себя свободно проявить, и скрутка вернется в исходное положение равновесия. При этом скрутка будет двигаться вдоль ленты. Как отмечают авторы, «такое локализованное распространяющееся возмущение оказывается очень похожим на частицу». Предположим теперь, что прежде, чем освободить скрутку у конца PS, экспериментатор открепит ленту у конца QR, совершит скрутку в противоположном направлении также на угол 2π , снова закрепит конец QR и затем пальцами переведет новую скрутку к концу QR, зафиксировав ее там. Таким образом, в силу противоположного характера двух равных по величине скруток создана конфигурация, которая после освобождения скруток будет эквивалентна неперекрученной ленте. Поэтому, при освобождении экспериментатором обеих удерживаемых его пальцами скруток, они начинают «двигаться вдоль ленты навстречу друг другу подобно частицам перед столкновением. Когда они встретятся, происходит аннигиляция, после которой остается лишь возбужденная, но неперекрученная лента. Эта ситуация, когда освобожденная энергия аннигиляции переходит в энергию колебательных движений ленты, в точности копирует ситуацию, когда аннигилирующие электрон и позитрон передают свою энергию электромагнитному полю. При этом скрутка в направлении по часовой стрелке ведет себя подобно частице, заряженной,

например, положительно, и тогда скрутка в направлении против часовой стрелки подобна отрицательно заряженной частице. Любое реалистическое уравнение, описывающее динамику такой ленты, должно допускать решения, которые описывают только что приведенные локализованные возмущения. Такие решения известны как кинки, и одна из наших целей заключается в том, чтобы выделить не на интуитивном уровне, а достаточно строго те свойства решений, которых здесь можно ожидать. Классические теории, в которых появляются решения-кинки, так же как их квантовые варианты, служат моделями, которые могут помочь нам разобраться в поведении элементарных частиц» (Додд и др. /1988. с. 426–427 /). Далее, эта авторы отмечают легкий переход от данной ленты к известной в истории науки о солитонах линии механических передач Скотта в виде цепи дискретных маятников с упругими нелинейными связями, уже рассмотренной в главах 1, 3.

Интересно отметить, видимо, не принципиальный характер расположения оси отсчета угла скрутки у данной упругой ленты. Поясним это на еще более простом для воспроизведения эксперименте. Читатель может взять узкую бумажную ленту и, закрепив один ее конец на столе скотчем, вытянуть ленту и, перекрутив на угол 2π второй ее конец, получить на этой вытянутой ленте некоторый аналог упругой ленты со скруткой относительно продольного положения оси (рис. 5.5.1 а). Если теперь второй конец ленты, не перекручивая его, просто приближать по столу к первому, закрепленному концу, то в некоторый момент лента самопроизвольно под действием внутренних механических напряжений примет петлеобразную форму с перегибом относительно другого — поперечного — положения оси к ленте. Данный случай представлен на рис. 5.5.1 б с демонстрацией закручивания векторов нормали ленты вокруг поперечного к

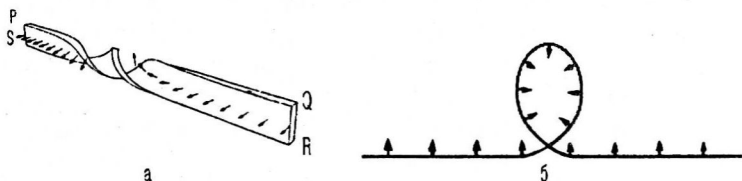


Рис. 5.5.1

Примеры кинков (стрелками обозначены вектора нормали к поверхности лент): а — узкая упругая лента со скруткой вокруг оси продольного положения (по Додду и др. /1988/); б — вид сбоку на ту же ленту со скруткой вокруг оси поперечного расположения

ленте положения оси скрутки. Заметим, что, если концы ленты с такой петлеобразной скруткой удалять друг от друга, то она вновь самопроизвольно вернется к исходному виду скрутки, т.е. видом скрутки можно управлять через изменение расстояний между концами ленты и это, вероятно, используется в механизмах биорегуляции. Реализуемая здесь петлеобразная форма ленты сходна с формой так называемого «ручного солитона», рассматриваемого в книге Филиппова /1990, с. 106, 186–190/, который на примере таких петлеобразных солитона и антисолитона демонстрирует процесс аннигиляции (подобно рассмотренной выше из работы Додда и соавторов аннигиляции кинка и антикинка, скрученных вдоль продольного к ленте, а не поперечного, как у ручного солитона, положения оси). Между этими двумя крайними случаями перегибов — продольного и поперечного положения оси скрутки — заключено целое множество промежуточных винтообразных случаев перегибов (кинков), когда данная ось, относительно которой отсчитывается угол скрутки, расположена между ее названными крайними положениями, продольным и поперечным.

Очевидно, что, если угол скрутки составляет не 2π , а многократное повторение этой величины, то имеет место реализация разнообразных многовитковых спиралей и петель, сходных с теми, которыми во множестве населен мир биологических форм. Последовательное использование рассмотренных перегибов на разных уровнях спирализации порождает значительное разнообразие суперспиральных конструкций.

Подобные спирали определяют не только статичные формы, но и выступают в качестве спиральных локомоторных волн, как это уже рассматривалось в главе 2. Добавим, что в биологии известны организмы, которые в покое имеют лентовидную или пластинчатую форму тела, а при поступательных локомоциях — и только при них — винтообразно закручиваются, генерируя и пропуская через себя спиральные волны телесной деформации. К числу таких организмов относятся, например, *Bryophyllum* и *Cladotricha* из отряда *Spirotricha* (Беклемишев /1964, т. 1, с. 32/).

Кстати сказать, практически все виды этих спиральных конструкций, в том числе петлеобразные, характерны для динамической структуры хромосом, несущих генетическую информацию (рис. 5.5.2). В области именно таких петель, образуемых хро-

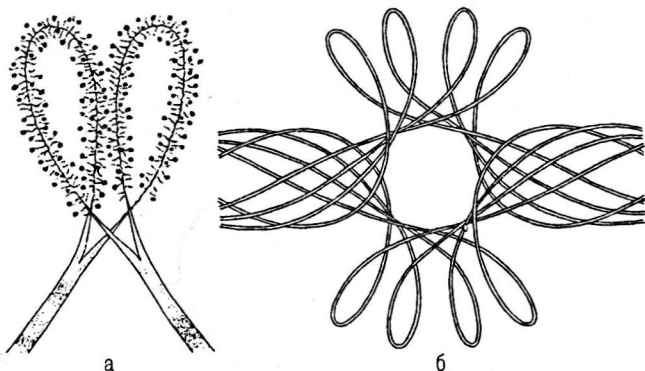


Рис. 5.5.2

Примеры петель на участках пufов у суперспирализованных хромосом; точками на петле показаны гранулы информационной РНК (по Кикнадзе /1972/)

момерами, происходит интенсивный синтез РНК. Эти петли создают так называемые пufы, то есть набухшие участки хромосом, и возникают за счет постепенной деспирализации нитей хромосом. «При этом с одной стороны хромомера происходит раскручивание хромономы, а с другой стороны он вновь закручивается так, что в области собственно боковой петли хромонома как бы все время «течет»» (Кикнадзе /1972, с. 14/). Такое постоянное движение с сохранением формы петли, происходящее без видимых затрат энергии на его поддержание, дополнительно свидетельствует в пользу солитонной природы хромосомных механизмов. (По вопросам геометрии полос с их кручениями, изгибаниями и пр. рекомендуем книгу Бляшке /1935/).

Хромосома заключена в матрикс, который в благоприятных случаях выглядит как колбасовидное тело, играющее, по мнению ряда авторов, важную роль в суперспирализации хромосом. Распад матрикса сопровождается деспирализацией хромосомы, а его формирование и сокращение связано со спиральным уплотнением хромосомных нитей (Мэзия /1963, с. 129/). Интересным является вопрос об удвоении элементов хромосомы, которое происходит на другом этапе деления клетки, чем разъединение такой хромосомы на две сестринские хромосомы. Здесь может быть полезно представление о двойниковании, сходном с кристаллографическим.

Перейдем теперь к двухмерным, слоевым биоструктурам. Одно из основных отличий многоклеточного организма от простой коло-

нии клеток заключается в том, что его клетки объединены в устойчивые слои, и каждый слой или ткань имеет определенное физиологическое значение для многоклеточной особи. При этом известно, что «активные движения индивидуальных клеток играют, конечно, большую роль в процессах развития ткане- и формообразования, но преобладающая роль в процессах развития принадлежит движениям сплошных клеточных пластов» (Маресин /1982/).

В 1817 г. Пандер впервые нашел, что зародыш цыпленка на определенной стадии состоит из трех пластов — зародышевых листков, из которых и развиваются все системы взрослого организма. Бэр распространил этот структурный принцип на всех позвоночных, обнаружив такие же листки в развитии рыб, лягушки и черепахи. Однако у зародышей птиц он насчитывал четыре листка, полагая за отдельный листок каждый из двух слоев, на которые в ходе развития расслаивается мезодерма. Таким образом, Бэр установил единство плана строения зародышей разных видов. Это привело его к важному для биологии обобщению — «закону зародышевого сходства». Согласно этому закону зародыши разных видов, относящиеся к одному биологическому типу, более сходны между собой, чем взрослые формы, и что их видовые различия в ходе развития постепенно нарастают. Иными словами, сначала в развитии проявляются черты типа, потом класса и т.д. Дарвин предлагал эволюционное истолкование этого закона Бэра, в более категорической форме выраженное в биогенетическом законе Геккеля: «онтогенез есть краткое повторение филогенеза». С позиций биосолитонной концепции этот закон можно воспринимать как указание на специфические способности солитонных колоний к развитию, которые, вероятно, смогут быть со временем продемонстрированы математиками на языке солитонных уравнений.

О контактных преобразованиях. В заключение параграфа кратко отметим, что часто реализуемые в растительных формах циклоидальные кривые и ряд других распространенных в биоморфологии плоских криволинейных форм (поперечные срезы стеблей, формы листьев и пр.) можно интерпретировать как следствие контактных преобразований, связанных с гамильтоновыми системами и совершаемых над некоторыми стандартными модульными биоформами, прежде всего, цилиндрическими биодоменами. Ранее контактные (или касательные) конечноточечные преобразования (подэрные и пр.) уже от-

мечались нами при анализе отношений неевклидовых симметрий между биологическими доменами в цикломерных биоструктурах (Петухов /1987, 1988/). Частными случаями названных контактных симметрий являются углубленно изучавшиеся нами неевклидовы биосимметрии, прежде всего, конформные.

Уравнения с солитонными решениями являются примерами бесконечномерных полностью интегрируемых гамильтоновых систем. В гамильтоновых системах «весь процесс движения можно рассматривать как постепенное разворачивание контактного преобразования» /Уиттекер, 1937, с. 335/. Представляет интерес обнаруживаемая здесь связь между солитонами, гамильтоновыми системами с их контактными преобразованиями и — с другой стороны — широко реализуемыми в биоморфологии плоскими кривыми, например, эпициклоидами и гипоциклоидами (кардиоидами, астроидами и пр.).

Проблема подобного сходства математических и биологических форм обсуждалась математиками еще в Древней Греции. С изобретением Декартом метода координат началось аналитическое описание биологических форм многими естествоиспытателями. Сам Декарт исследовал кривую с поэтическим названием «лепесток жасмина», впоследствии получившую название «декартов лист». В XIX веке немецкий геометр Habenicht /1955/ составил целый ряд уравнений, с хорошим приближением описывающим формы некоторых листьев и плодов. Любичев /1982 и др./, ставя целью своей жизни создание естественной системы организмов, полагал, что путь к этому лежит через математическое изучение подобных закономерных кривых и симметрий в строении организмов, не имеющих непосредственного функционального назначения. Многие исторические вопросы, в частности, в связи с кардиоидной формой у листовых пластинок, освещаются в книге Короны /1987, с. 127/, который отмечает, что «геометрическое сходство графиков функций и биологических форм чаще всего рассматривается как математический курьез, поскольку не находит места среди существующих способов объяснения сходства». Мы надеемся, что в рамках физически содержательной концепции биосолитонов, затрагивающей гамильтоновы системы и касательные преобразования в них, удастся естественным образом интерпретировать и наполнить биофизическим содержанием названное геометрическое сходство.

Глава 6

ЖИЗНЬ КАК ФОРМА СУЩЕСТВОВАНИЯ СОЛИТОННОЙ ЭНЕРГИИ

С давних времен в организмах было принято различать телесную плоть и характерную для живого специфическую активность. Последняя называлась в разные времена «жизненной силой (vis vitalis)», «энтелехией» и т.п. Зачастую под этим понималось особое нематериальное начало, например, говорилось о «духах жизни (архях)». Под телесной плотью же обычно подразумевалось то, что остается при уходе жизни из тела, то есть мертвая масса вещества с запасами химической энергии в ней, которая вскоре начинает разлагаться.

Концепция биосолитонов и развиваемая на ее основе солитонная биология предлагают энергофизическое понимание феномена жизни. Они рассматривают жизнь как солитонную форму существования энергии в биосолитонных средах. Или, более кратко, жизнь как форму существования солитонной энергии. Очевидно, что это «энергетическое» определение жизни существенно отличается, например, от общеизвестного «молекулярно-видового» определения жизни как формы существования белковых тел, которое сосредоточено на специфике молекулярного состава организмов.

В этой главе рассматривается ряд фундаментальных особенностей биологических организмов, имеющих прямое отношение к такому солитонно-энергетическому пониманию жизни и живого вещества.

6.1. О создании порядка в живом и биологической эволюции

Естествоиспытатели давно (еще в досолитонную пору науки) заметили, что во всех естественных процессах в неживой природе *энергия рассеивается* и снижается упорядоченность, или, говоря современным языком, количество информации. Например, дом, если его не ремонтировать, постепенно разрушается, а горные породы со временем превращаются в песок, который сносится ветром, водой и силой притяжения Земли. В бытовой жизни любая уборка требует определенных усилий, а беспорядок обра-

зуются сам собой. Это соответствует второму закону термодинамики. Степень неупорядоченности была названа физиками энтропией, а информация — негэнтропией.

И только живые существа ведут себя, казалось бы, противоположным образом. Семечко само превращается в дерево, растение из воды и углекислого газа создает органические вещества и т.п. «Жизнь... являет собой разрастающийся центр упорядоченности в менее упорядоченной Вселенной» (Гробстайн /1968, с. 17).

В современной биофизике распространено следующее объяснение этого «парадокса» живого, представленное в учебниках и энциклопедиях. «Законы классической термодинамики верны для так называемых закрытых систем — таких, которые не обмениваются энергией с другими системами. А жизнь — это постоянный обмен веществами и энергией между организмом и окружающей средой. Можно сказать, что жизнь — своего рода насос, снабжающий организмы энергией Солнца, энергией химических соединений... Многие считают, что именно в способности живого создавать порядок из *теплового движения молекул* состоит наиболее глубокое, коренное отличие живого от неживого» (Аксенова /1998, с. 13–14/).

Попробуем скорректировать и уточнить этот ответ, исходя из изложенных в нашей книге новых знаний о важности солитонных форм энергии для живого. Прежде всего, подчеркнем то, что, по нашему мнению, порядок в живом создается не «из теплового движения молекул», а из накопления солитонных форм энергии живым веществом (которое в качестве биосолитонной среды наделено свойством быть ловушкой или «солитонным насосом» для приходящей энергии) и взаимодействия этих солитонных сгустков энергии между собой. И что благодаря солитонам, энергия в живом автолокализуется, а не рассеивается с понижением упорядоченности системы, как это обычно происходит в неживой природе. Кстати, в неживой природе при солитонных явлениях энергия также не рассеивается, а автолокализуется, что является одной из уникальных черт солитонов, рассмотренной в главе 1. Эта выдвигаемая нами концепция солитонного происхождения свойства живого создавать порядок обсуждается в данном параграфе.

Еще автор термина «термодинамика» В. Томпсон /1851/, писал о специфике динамических процессов в живом: «Невоз-

можно при помощи неодушевленного, материального агента получить механический эффект от какой-либо части вещества, охлаждая ее ниже температуры самого холодного из окружающих тел... Живое тело действует не так, как термодинамическая машина. Невозможно понять без специального экспериментирования и наблюдения тот способ, каким в живом теле производятся механические эффекты... Каждый индивид, независимо от природы этих способов, сознает, что он в известной мере подвержен усилиям своей воли. Следовательно, *живые существа способны непосредственно воздействовать на движущиеся внутри своих тел частицы материи таким образом, чтобы направлять движение этих частиц на то, чтобы произвести желаемый механический эффект*» (цитируется по Кузнецовой /1985, с. 159/).

Нами полагается, что представление о биосолитонах как частицеподобных энергетических объектах дает возможность принципиально нового подхода к этой классической проблематике о движущихся внутри живого «частицах материи» и воздействиях на них со стороны организма.

Томпсон в 1852 г. также отметил, что попытка применения принципа спонтанного выравнивания температур во всей Вселенной в целом приводит к необходимости принять предположение об «универсальной тенденции в природе к диссипации механической энергии»; это предположение, развитое впоследствии Гельмгольцем и Клаузиусом, привело к широко обсуждавшемуся представлению о тепловой смерти Вселенной (Кузнецова /1985/ и др.).

Продолжение этой темы имеется в известной книге Шредингера «Что такое жизнь? С точки зрения физики», сыгравшей большую роль в проникновении идей физики в биологию. В 1944 г., когда им писалась эта книга, еще не было понятия солитона, однако некоторые выводы из проведенного им анализа имеют отношение к этой теме.

«Что является характерной особенностью жизни? Когда мы считаем материю живой? Тогда, когда она продолжает «делать что-либо», двигаться, участвовать в обмене веществ с окружающей средой и т.д., — все это в течение более длительного времени, чем, по нашим ожиданиям, могла бы делать неодушевленная материя в подобных условиях. Если неживую материю изолировать или поместить в однородные условия, всякое движение обычно очень скоро прекращается в результате различного рода трения; разность электрических или химических потенциалов

выравнивается, вещества, которые имеют тенденцию образовывать химические соединения, образуют их, температура выравнивается вследствие теплопроводности. Затем система в целом угасает, превращается в мертвую инертную массу материи. Достигается состояние, при котором не происходит никаких заметных событий. Физик называет это состояние термодинамическим равновесием, или состоянием максимальной энтропии... Именно потому, что организм избегает быстрого перехода в инертное состояние «равновесия», он и кажется загадочным. Настолько загадочным, что с древнейших времен человеческая мысль допускала действие в организме особой, какой-то не физической, а сверхъестественной силы (Шредингер /1972, с. 72–73/).

Шредингер полагал, что разгадка этой способности живого противостоять беспорядку, росту энтропии «состоит в непрерывном извлечении упорядоченности из окружающей его среды» /там же, с. 76/. Соответственно, он писал: «Для организма следует ожидать *новых законов*. ...все известное нам о структуре живой материи заставляет ожидать, что деятельность живого организма нельзя свести к появлению обычных законов физики. И не потому, что имеется какая-нибудь «новая сила» или что-либо еще, управляющее поведением отдельных атомов внутри живого организма, а потому, что его структура отличается от всего изученного нами до сих пор в физической лаборатории... Развертывание событий в жизненном цикле организма обнаруживает удивительную регулярность и упорядоченность, не имеющих себе равных среди всего, с чем мы встречаемся в неодушевленных предметах... Короче говоря, мы видим, что существующая /в организме/ упорядоченность проявляет способность поддерживать саму себя и производить упорядоченные явления» /там же, с. 77–78/.

Для объяснения подобной специфики живого Шредингер обращался к квантовомеханическим представлениям о поведении систем любого сорта при абсолютном нуле температур, при котором энтропия любого вещества минимальна — равна нулю: «Для физика (и только для него) я надеюсь пояснить свою точку зрения такими словами: живой организм представляется макроскопической системой, частично приближающейся в своих проявлениях к чисто механическому (по контрасту с термодинамическим) поведению, к которому стремятся все системы, когда температура приближается к абсолютному нулю и молекулярная неупорядоченность снимается» /там же, с. 71/. И да-

лее: «Мы, кажется, приближаемся к смехотворному выводу, будто бы ключ к пониманию жизни заключается в том, что она имеет чисто механический характер» /там же, с. 82/. Вероятно, в этой связи можно говорить о том, что Шредингер предвидел механо-кооперативные свойства у живого вещества и вполне мог бы выдвинуть концепцию биосолитонов.

Однако, эксперименты Ферми–Паста–Улама, обратившие внимание на способность солитонных систем противостоять беспорядку, да и само появление понятия солитона состоялись лишь через десять с лишним лет после написания книги Шредингера. В главе 1 нами рассматривались эти замечательные эксперименты, неожиданно для Ферми и других физиков показавшие, что уже в простейшей чисто механической системе — цепи из грузиков, соединенных нелинейными пружинками — возможно выраженное противостояние тенденции к равновесному, «мертвому» состоянию максимальной энтропии у системы: вместо ожидавшегося от данной системы распределения колебательной энергии между всеми модами возбужденной системы и быстрого перехода к обычному равновесному состоянию с максимальной энтропией, она повела себя неожиданно, демонстрируя приверженность специфическому порядку.

Положения термодинамики развиты для больших ансамблей беспорядочно движущихся частиц. Как писал Ферми /1973, с. 7/: «Теперь мы знаем, что истинное обоснование эквивалентности теплоты и динамической энергии следует искать в кинетическом толковании, которое сводит все термические явления к беспорядочному движению атомов и молекул». Ансамбли солитонов представляют собой вовсе не беспорядочно движущееся множество частиц, т.е. принципиально отличаются от рассматриваемых в термодинамике. Частицеподобные элементы солитонных ансамблей способны взаимодействовать друг с другом много более сложным и специфическим образом, чем частицы, рассматриваемые в кинетическом толковании термодинамических явлений: солитоны способны притягиваться, отталкиваться, размножаться (т.е. порождать новые солитоны при определенных резонансных условиях) и гибнуть, образовывать устойчивые связки со сложными, например, пульсационными формами поведения, и т.п.

Соответственно термодинамика и ее законы не предназначены для описания солитонных ансамблей. Попытки понять с

позиций термодинамических законов многоуровневый ансамбль взаимодействующих солитонов, каковым является живой организм, исходно обречены на неудачу. Их можно сравнить с попытками на основе перечня правил бильярда понять смысл и ход футбольного матча. Для описания солитонных ансамблей должна быть развита некоторая новая наука с условным названием «солитодинамика», включающая специальную часть о биосолитонных ансамблях. В этой науке будут сформулированы и новые специфические законы, о появлении которых писал Шредингер и которые, конечно, будут отличаться от термодинамических. В частности, эти законы отразят то, что, если в ансамблях частиц, рассматриваемых в термодинамике, происходит выравнивание усредненных энергетических характеристик в различных частях единого объема, то в ансамблях солитонов могут наблюдаться явления концентрации солитонной энергии в образующихся гроздях солитонов. Другими словами, в отличие от термодинамики с ее проблемами «тепловой смерти», солитодинамика, которую предстоит развить, рассмотрит тенденцию к солитонной жизни в смысле самоорганизации упорядоченных биосолитонных форм энергии в биосолитонных средах. В свете задач развития такой «солитодинамики» может быть весьма полезен ряд уже имеющихся в современной физике наработок, например, по понятию «солитонного газа» или по солитонной теории доменообразования в ферромагнетиках. Полезные материалы о термодинамике и эволюции содержит статья Молчанова /1967/.

Вся биологическая эволюция сопровождается наращиванием массы живого вещества, а значит биосолитонных сред и солитонных форм энергии живого. В свете этого живое вещество предстает как «механизм» по переработке неживой материи в живую с соответствующим накапливанием саморазвивающихся солитонных масс вещества и энергии. И эта переработка неживой материи в живую идет все убыстряющимися темпами по мере развития суперколоний биосолитонов в организмах, обретающих все новые способности по самоорганизации, самовоспроизведению, взаимодействию с окружающим миром. Для желающих приписать биологической эволюции некоторую цель это дает возможность говорить о такой цели, например, в виде максимального ускорения процесса названной переработки.

6.2. Физические и химические аккумуляторы энергии

Солитонные среды имеют одну особенность, видимо, важную для саморазвития. Они способны быть ловушками для энергии, в которых поступающая энергия трансформируется и накапливается в солитонно-физических формах. Простейшим примером этого является образование отдельного солитона, поскольку поступившая в солитонную среду энергия автолокализуется средой в виде устойчивого, недиссипирующегося сгустка. Классические опыты Ферми–Паста–Улама на цепи с нелинейными пружинными связями между ее звеньями, описанные в главе 1, демонстрируют другой, более сложный пример солитонной энергетической самоорганизации. В этих опытах изучаемая нелинейная среда обнаруживает свою способность, совершенно неожиданную даже для этих выдающихся ученых, трансформировать энергию внешнего возбуждения в устойчивые энергосохраняющие процессы периодического перераспределения физической энергии в солитонной форме между несколькими членами энергетической группировки (первыми модами колебаний). Образование биологических доменов с аккумуляцией физической энергии в биосолитонных доменных стенках также является одним из важных механизмов создания энергофизических ресурсов. Поставщиками энергии, захватываемой биосолитонной средой, могут быть как внешние физические источники, так и внутренние ресурсы химической энергии организма.

Вопрос о специфике видов энергии и переходных энергетических процессов в биологии очень важен и рассматривается во множестве монографий. Центральное внимание при этом отводится химической энергии, запасаемой в особом веществе — аденозинтрифосфорной кислоте (АТФ). Она рассматривается как универсальный переносчик и основной аккумулятор химической энергии в клетках. Все процессы в организме, происходящие с аккумуляцией химической энергии, в конечном счете ведут к АТФ, часто уподобляемой валюте, которую можно потратить когда и как угодно.

Учитывая важность и разноплановость участия биосолитонов в самоорганизации и жизнедеятельности живого, нельзя не поставить вопроса о биосолитонах, как не химическом, а физическом виде энергии в организмах. Эта физическая — солитонная — энергия, видимо, также имеет характер валюты, то есть

используется организмом в самых разных его местах и целях самым широким образом, например, при всевозможных биологических движениях. Между этими двумя видами энергетических валют должна существовать тесная взаимосвязь по механизмам энергетического взаимопреобразования и содружественного обеспечения жизнедеятельности организма. Другими словами, энергии АТФ и биосолитонов работают в одной связке, образуя единый аккумуляционно-транспортно-реализующий физико-химический механизм энергетики организма. В частности, вероятно, что физиологическое использование универсальной химической энергии АТФ реализуется также унифицированным образом через ее трансформацию в солитонно-структурированную физическую энергию. Кстати, вариант такой трансформации энергии АТФ в энергию солитонного вибрационного возбуждения альфа-спирали белковой молекулы теоретически уже рассматривался Давыдовым (см. главу 9, посвященную его работам по солитонам в одномерных молекулярных цепях).

«Энергетическими станциями» клетки считаются митохондрии в связи с их способностью сжигать питательные вещества с высвобождением запасенной в них химической энергии. Митохондрии предстоит внимательно исследовать для выявления особенностей участия физических — солитонных — видов энергии в их морфо-функциональной организации. Можно обоснованно подозревать, что они представляют собой активный клубок биосолитонов. Недаром для митохондрий характерна очень высокая формообразовательная активность, указывающая на вероятную деятельность биосолитонов в них: как известно, они могут расти, сжиматься, ветвиться и делиться за считанные минуты. Они могут принимать форму гантели, трубки, шара, ветки и т.д. Кроме того, митохондрии умеют сами для себя синтезировать белки и потому являются наиболее независимыми от клетки органеллами.

6.3. Самоорганизация, самовоспроизведение и наследование информации

Заметим, что в солитонные уравнения не входят никакие собственно химические параметры и что солитоны, соответствующие тому или иному солитонному уравнению, могут реализовываться в самых разных по химическому составу и даже по фи-

зической консистенции средах — твердых жидких, желеобразных. Для солитонов важно лишь, чтобы среда их существования имела специфический тип нелинейности. Поэтому при анализе солитонов, их колоний и явлений солитонной самоорганизации — в частности, применительно к живому веществу — вопрос о химическом составе вещества является вовсе не главным и морфология оказывается во многом независимой от химического состава. Это аналогично ситуации в мире кристаллов, где зачастую совершенно разные по химическому составу кристаллы имеют подобные кристаллические решетки, ростовые особенности, дислокации, домены и пр., поскольку их морфология определяется во многом вовсе не химическими, а физическими правилами типа правила плотной упаковки субъединиц или энергетических правил доменообразования и т.п.).

При рассмотрении проблем самоорганизации в солитонных средах внимание исследователя сосредотачивается на устойчивых самоорганизующихся сгустках энергии, способных взаимодействовать друг с другом, в частности, притягиваться и отталкиваться, образовывать устойчивые связи и т.п. Солитоны напоминают заряженные частицы, также способные взаимодействовать, но несут не точечный, а распределенный в пространстве характер и могут, вообще говоря, иметь самые разные пространственные размеры. В математической физике сейчас наблюдается большой прогресс в изучении двух — и трехмерных солитонов, которые способны образовывать пульсирующие ансамбли — пульсоны, — нетривиальные конфигурации и пр. (см., например, Додд и др. /1988, раздел 10.6/), что представляется очень интересным для биологических приложений.

В свете сказанного понятно, что при анализе биосолитонных явлений самоорганизации главным являются именно энергетические объекты в живом веществе и физические правила их поведения, а не конкретный химический состав того или иного организма. У весьма разных по химическому составу организмов, принадлежащих к совершенно разным биологическим видам, могут быть похожие колонии биосолитонов, что приводит к широко известному в биологии явлению морфогенетических параллелизмов, отраженному в законе гомологических рядов Вавилова, дискуссиях по номогенезу и др. Это кардинально отличает биосолитонный, *энергетический* в своей основе, подход от распространенных в настоящее время диффузионно-химического или иных подходов, базирующихся на предположе-

нии о химической природе явлений биологической самоорганизации. В соответствии с этим химическим подходом непонятные биологические явления (например, наблюдаемые в эмбриологии волновые процессы активации клеточных сред) обычно объясняются на основе гипотезы о выделении каких-то неведомых химических агентов, диффузия которых и определяет данную активацию. Этот химический подход, полностью упускающий из вида практически неизвестные до 60-х годов XX века возможности энергетической самоорганизации в специальных нелинейных средах, естественно представлен также в работах классиков науки, имеющих значительное число последователей. Так, в истории науки известно (Данилов /1971, с. 34/), что скончавшийся в 1957 г. создатель теории самовоспроизводящихся автоматов «фон Нейман намеревался построить непрерывную модель самовоспроизведения, основанную на нелинейных дифференциальных уравнениях в частных производных, которые описывают систему химически реагирующих и диффундирующих веществ. В этой связи небезынтересно отметить, что в 1952 г независимо от фон Неймана аналогичную модель структурообразования предложил в работе «Химическая основа морфогенеза» английский математик А.Тьюринг».

Тем самым, вместо прежней ориентации исследователей на гипотезы о химической основе биологической самоорганизации нами предлагается иное направление мысли на раскрытие солитонно-энергетической природы биологической самоорганизации. Живой организм предстает как энергетически структурированный объект — устойчивый, многоуровневый, со своей закономерной энергетической морфологией, саморазвивающийся в русле солитонно-энергетических возможностей саморазвития. Это является ключевым моментом всей солитонной биологии.

На основе нового представления о солитонно-энергетической природе живого вещества можно переосмысливать многие биологические загадки. Так, с излагаемых позиций загадка происхождения жизни на земле оказывается связанной с проблемой возникновения биосолитонных сред и появления на земле первых биосолитонных доменных стенок, например, в результате двойникового подходящих мономеров (первичных нитевидных молекул белков?) при их нарастании до критических размеров, за которыми уже возможно полидоменное состояние.

Попадая с пищей в зону устойчивых энергетических объектов — биосолитонов, — подходящие химические молекулы и их

объединения оказываются в очень специфических условиях: они испытывают механические напряжения, конформации, взаимодействуют с ферментами (о работе которых с биосолитонной точки зрения можно многое сказать) и пр. и в результате каким-то образом становятся органичной частью биосолитонной среды. Можно полагать, что в биоэволюции при синтезе организмом нового материала для своего тела отбираются те атомно-молекулярные комбинации, которые согласуются с существующей колонией биосолитонов организма и могут стать полноценной составной частью его биосолитонной среды. Те организмы, которые способны эффективнее перерабатывать чужеродное вещество, в частности, неживое, в собственную материю, т.е. в их собственные биосолитонные среды, имеют жизненно важные преимущества. В этом заключается важный критерий естественного отбора в эволюции организмов. Весь ход биологической эволюции с ее ускоряющимся накоплением масс живого вещества можно связать с улавливанием энергии в ловушки биосолитонных сред и тенденцией («задачей») биосолитонных колоний как можно больше неживой материи переработать в живое вещество.

Обычно говорят о проблеме самозарождения и дальнейшей эволюции высокорганизованных систем в хаотической среде. Однако, живое вещество, видимо, только на начальном этапе возникновения своей зародышевой массы сильно зависело от хаотической окружающей среды. А затем уже его эволюция базировалась в основном на вышерассмотренных свойствах нехаотических биосолитонных систем по улавливанию энергии и саморазвитию солитонно-энергетических колоний и мало зависела от хаоса окружающего, уподобляясь солитонным решениям солитонных уравнений.

На основе свойств солитонов возможно и новое понимание известной биологической проблемы высокой надежности целого при низкой надежности составляющих его частей. Так, «фон Нейман обратил внимание на то, что живые автоматы, и, в частности, человеческий мозг работают с непостижимой надежностью, несмотря на сравнительно низкую надежность их деталей... Можно ли, и если можно, то как построить надежный автомат из ненадежных компонент?» (Данилов /1990, с. 35/). Имеется ряд данных в пользу того, что ансамбль солитонов способен функционировать более устойчиво и надежно, чем отдельный солитон или подсистема солитонов данного ансамбля. Например, для солитонов в

виде сферических кинков и пульсонов показано, что в результате столкновения двух неустойчивых пульсонов образуются устойчивые связанные состояния (Додд и др. /1988, с. 658/).

Полидоменные структуры с солитонными доменными стенками дают хорошую модель надежного построения целого из относительно ненадежных компонент. Для пояснения этого обратимся к рассмотренной в главе 3 доменообразующей пленочной структуре из феррит-гранатов. В этих пленках при наложении подмагничивающего поля по их оси легкого намагничивания образуются цилиндрические магнитные домены — ЦМД (см., например, Лисовский /1984/). Управляя характером прилагаемого поля, можно получить тот или иной рисунок на общей карте множества образуемых ЦМД, например, фигуру прямостоящего человека, составленную из большого числа ЦМД. Слегка изменив это поле, можно заставить данную фигуру трансформироваться, например, в фигуру согнувшегося человека. Повторно переключая управляющее поле из одного состояния в другое, можно получить повторяющийся в целом переход фигуры человека из прямостоящего в согнутое положение, поскольку множество ЦМД будет достаточно точно отслеживать изменения регулирующего поля. Но при этом всякий отдельный ЦМД может при каждом очередном цикле включения-выключения регулирующего поля двигаться весьма по разным траекториям и приходить в измененные конечные положения в силу местных причин, например, ввиду обычных для доменообразования явлений гистерезисного характера. Другими словами, реализуется модель относительно надежного целого из сравнительно ненадежных компонент.

О самовоспроизведении живого. Загадочная способность живых организмов к самовоспроизведению издавна являются вызовом для естествоиспытателей. Ей посвящена теория самовоспроизводящихся автоматов Неймана /1971/, книга Емельяновых /1992/ и множество других работ. При этом исследователи обычно сосредотачивались на том, по каким логическим правилам можно организовать процесс воспроизводства определенного набора компонентов, создать тот или иной аналог так называемого клеточного автомата или модульного конструктора. Предполагалось, что сборочные элементы или модули хаотично блуждали в среде и их стыковка происходила в результате случайных столкновений. Насколько мы можем судить, всегда прежде попытки решить задачу биологического самовоспроизведе-

ния строились на эвристическом придумывании автором правил взаимодействия двух или нескольких вещественных (или логически эквивалентных им абстрактных) объектов, как бы правил стыковки вещественных модулей.

Нам кажется, что понимание организмов как колоний биосолитонов кардинально меняет и облегчает сам подход к проблеме самовоспроизведения организмов, смещая существенную ее часть к задаче о самовоспроизведении устойчивых самоорганизующихся энергетических (а не вещественных) сгустков или объектов — биосолитонов — и их ансамблей. Взаимодействующие солитоны движутся друг относительно друга вовсе не хаотично. Для этих энергетических сгустков имеется математическая теория солитонов, которая и определяет правила взаимодействия между ними, открывая в том числе их способность к размножению, т.е. самовоспроизведению при определенных условиях. В частности, это снимает с естествоиспытателя задачу придумывания, изобретения правил взаимодействия между компонентами. И решение всей проблемы ищется имнно в кооперативных свойствах живого вещества.

Обратимся к примеру воспроизводства биологической клетки путем ее деления, при котором общая масса ее вещества не изменяется, а просто разделяется между двумя образующимися из нее клетками. Можно полагать, что колония биосолитонов этой клетки, достигнув некоторого состояния зрелости (например, по уровню энергии, накопившейся в ней в солитонном виде), оказывается вынужденным распасться на две части в виде двух солитонных ансамблей или образовать полидоменную структуру нового уровня. Солитонные особенности этих частей обуславливают их пространственное расхождение как энергетических объектов, приобретающих способность к относительно самостоятельному существованию. Это пространственное членение энергетической начинки клетки влечет за собой переагрегацию вещества клетки также на две части. Итогом этого прогрессирующего деления солитонно-энергетической структуры клетки и зависящего от него разделения клеточного вещества является образование двух новых клеток. Аналогичным образом можно представить себе многократное деление оплодотворенной яйцеклетки с образованием нового многоклеточного организма (вопрос об увеличении клеточной массы живого в ходе онтогенеза рассмотрим чуть позже).

Сложным и важным является вопрос о подстраивании биохимического субстрата (постоянно обновляемого при сохране-

нии формы биообъекта) под эти энергетические сгустки и их колонии. Ясно, что в зависимости от параметров локализованной солитонной энергии, например, в связи с локальными механическими деформациями субстрата характер последнего может существенно различаться из-за возможных фазовых переходов «золь-гель», переполимеризации и т.п. Соответственно, перемещения этих устойчивых энергетических сгустков могут в одних частях клетки (или биообъекта вообще) вызвать, например, «разжижение» и отток субстрата, а в других — приток и «отверждение» субстрата. Биосолитоны, создавая в среде локальные деформации и осуществляя массоперенос, могут сближать биохимические субстраты из разных участков до их взаимного контакта, создавая тем самым условия для протекания химических реакций между данными субстратами и образования новых биохимических соединений. Перемещения солитонов способны создавать напряжения в отдельных объемах, которые релаксируются путем доменообразования с появлением новых солитонных доменных стенок или передвижением уже существующих.

А как можно представить себе переработку организмом энергии и пищи, поступающих в него извне? Поскольку солитонные среды способны служить ловушками для поступающей в них энергии, переводя ее в устойчивые солитонные формы (включая энергию от перевариваемой пищи), то в этих средах может накапливаться энергия в солитонной форме. Эта наращиваемая солитонная энергия активно участвует в развитии организма и, в частности, в переработке пищи в новые массы его вещества. Конечно, мы далеки от того, чтобы на языке солитонных уравнений описать эти сложные многоступенчатые процессы самовоспроизведения организмов, но сам солитонно-энергетический подход к этой биологической проблеме представляется нам вполне уместным. Будучи энергетическими объектами, способными переносить информацию, энергию, заряды и массы, взаимодействующие солитоны с их способностью размножения видятся идеальными участниками и организаторами процессов биологического самовоспроизведения.

О наследственной информации. Если биосолитоны как кооперативные (или когерентные) состояния живого вещества столь важны для его самоорганизации и самовоспроизведения, то не следует ли предположить также их участия и важной роли в передаче биологической информации по наследству? Не передается ли, например, при оплодотворении яйцеклетки и зарож-

дении нового организма также некоторый солитонный зародыш будущей солитонной среды и колонии солитонов? Не базируется ли наследственная информация на кодировке солитонных сред и солитонных ансамблей на них? И как такие новые вопросы можно связать с известными положениями о генной информации? Попытаемся ответить на это.

Сегодня каждому образованному человеку известно, что генетическая информация записана последовательностью нуклеотидов четырех видов А, Т, Г, Ц в молекулах нуклеиновых кислот. Но почему именно нуклеиновые кислоты в ходе биологической эволюции стали носителями наследуемой информации? Не потому ли, что они относятся к наиболее гигантским молекулам? Высокополимерные цепи нуклеиновых кислот насчитывают до нескольких миллионов нуклеотидных остатков, их молекулярная масса равна 10^5 – 10^{10} . Гигантизм этих молекул делает их особо способными к кооперативным формам поведения типа фазовых переходов (для которых важна многочисленность элементов). В свете этого естественно предположить, что нуклеиновые кислоты, в том числе ДНК способны образовывать и нести солитоны (включая «сидячие» солитоны). Другими словами, эти гигантские молекулы в организме являются биосолитонной средой (частью его общей биосолитонной среды). А потому вместе с генетическим материалом ДНК от родительских организмов в оплодотворенную клетку попадают представительные части биосолитонных сред родительских организмов.

Возможно, уже этих зародышей биосолитонных сред достаточно для организации дочерних биосолитонных ансамблей и развития на их основе биосолитонной среды дочернего организма при условии подвода энергии и пищи. Но, вероятно, эти зародышевые среды дополнительно также несут на себе готовые энергетические биосолитонные микроансамбли от родительских организмов, и эти ансамбли сразу начинают взаимодействовать друг с другом в зародыше нового организма. Другими словами, роль нуклеиновых кислот и, прежде всего, ДНК вовсе не исчерпывается переносом в дочерний организм последовательности нуклеотидов, а включает в себя также перенос от родительских организмов специфической механики энергосолитонной самоорганизации живого. ДНК — это не длинная мертвая доска с записанной последовательностью символов А, Т, Г, Ц. ДНК с ее нуклеотидами является живой структурой, наделенной особыми физическими

свойствами, которые позволяют ей быть носителем специфических энергосолитонных ансамблей и определять самоорганизацию новых, т.е. быть активным участником процесса передачи и реализации наследственной информации. В частности, наблюдаемая локальная раскрутка суперспиралей хромосом с образованием на них так называемых пухов (см. параграф 5.5) является отражением этой активности и взаимодействий биосолитонов ДНК и игры их солитонных форм.

Подчеркнем, что именно последовательность нуклеотидов четырех видов в молекуле ДНК, которая считается записью генетической информации, может участвовать в определении нелинейно-физических особенностей молекулы ДНК как молекулярной биосолитонной среды, а значит также в специфике колоний биосолитонов на этой молекуле (конечно, речь идет о нормальных условиях ее существования в организме). И тогда генетическая информация, видимо, сводится к кодированию нелинейных особенностей звеньев цепи молекул ДНК.

Эту мысль можно пояснить сопоставлением цепи ДНК с цепью Ферми-Паста-Улама (ФПУ), классической для теории солитонов (см. главу 1). Последняя состоит из равных грузиков, соединенных одинаковыми нелинейными пружинками, и при возбуждении образует ансамбль солитонов со сложным поведением периодического характера. Модифицируем эту цепь ФПУ, отказавшись от условия точного видового равенства грузиков и пружин и составив ее из слегка неравных грузиков и пружин, имитирующих неравенство в цепи ДНК из-за наличия в ней нуклеотидов четырех разных видов. Такая модифицированная цепь ФПУ, видимо, будет при ее возбуждении генерировать видоизмененные ансамбли солитонов. И эти ансамбли будут зависеть от последовательности единиц из заданного набора различий в звеньях вдоль цепи. Данная модифицированная цепь ФПУ может рассматриваться как свехупрощенная солитонная модель цепи ДНК. Для приближения к реальности надо рассматривать ДНК вместе с окружающей ее биологической средой, используя понятие надмолекулярных биосолитонов. Кажется естественным то, что организм как суперколония солитонов кодируется такой наследственной информацией, которая сама имеет солитонную природу, обеспечивая тем самым «единство языка».

Многие конкретные вопросы работы ДНК могут интерпретироваться в рамках биосолитонного подхода. Обратимся, напри-

мер, к так называемым теломерам ДНК, с которыми связано прекращение деления клеток после определенного множества циклов ее деления из-за закономерного сокращения числа звеньев в цепи ДНК с каждым очередным циклом. Пионерская работа с гипотезой о значении теломеров и теломеразы для реализуемого числа клеточных делений принадлежит Оловникову /1973/. Она соотносит делительные потенции клетки с уменьшением числа звеньев ДНК. Нами отмечается, что это укорочение цепи ДНК должно сказываться на характеристиках всего биосолитонного ансамбля этой цепи (по аналогии с цепью ФПУ, где число звеньев существенно для специфики солитонного ансамбля). Именно возникающее при данном укорочении видоизменение ансамбля биосолитонов в системе «ДНК и ее окружение» может являться глубинной причиной феномена утраты клеткой способности к делению. Кроме того, в свете известных данных о проявлении необычной теломеразной активности большинством злокачественных опухолей в организме теломер-теломеразная гипотеза многими исследователями кладется в основу происхождения онкологических заболеваний. При данных заболеваниях деятельность раковой клетки существенно видоизменяется, включая характер ее движений и взаимодействия с соседними клетками. Это переключается с имеющимся у нас рядом данных об изменениях биосолитонных ансамблей в раковых клетках. Кратко говоря, теломер-теломеразная концепция Оловникова и его последователей связывается нами с биосолитонами как особыми устойчивыми энергетическими объектами, которые прежде в этой тематике не учитывались. На этом пути видимы дополнительные подходы к проблемам старения и онкологии клеток.

Касаясь генной инженерии, заметим, что солитоны представляют собой результат кооперативного поведения системы, а потому различные переделки ДНК в ходе операций генной инженерии видоизменяют зародышевую биосолитонную среду ДНК и ее биосолитонный микроансамбль. Это приводит к существенным последствиям для дочерних организмов — появлению новых свойств, видоизменению внешности и т.п.

Отметим, что многими авторами уже высказывались гипотезы о существовании молекулярных солитонов в ДНК как о возможных участниках механизмов экспрессии генов на отдельных этапах многоступенчатого процесса воплощения наследственной информации (Englander и др. /1989/, Полозов, Якушевич /

1985/ и др.). Данные работы лежат в русле представлений о возможном существовании биологических молекулярных солитонов, которые рассматриваются в главе 9 нашей книги. Отдавая должное этим интересным работам, попытаемся сформулировать отличия нашего подхода. Пожалуй, основное отличие заключается в том, что нами солитонные ансамбли ДНК, увязанные с последовательностями нуклеотидов А, Т, Г, Ц, понимаются как непосредственные компоненты носителей наследственной информации, необходимые для воспроизводства у дочернего организма определенных надмолекулярных биосолитонных ансамблей. Кроме того, нами вводится понятие надмолекулярных биосолитонов как участников всей системы наследственной информации, включающей ДНК вместе с окружающей ее биосолитонной средой, в которой ДНК и призвано функционировать.

Насколько нам известно, ранее солитоны не рассматривались как компоненты наследственной информации, а гипотезы о возможном существовании в цепевидных молекулах ДНК молекулярных солитонов интерпретировали последние как вспомогательные механизмы, существенные лишь на отдельных этапах экспрессии генов. Например, Полозов и Якушевич /1985, с. 15/ пишут: «Мы предполагаем, что возникновение и распространение солитонного возбуждения вдоль молекулы ДНК могут иметь функциональное значение на этапе процесса транскрипции, непосредственно предшествующем химической реакции синтеза мРНК». Кроме того, «с функциональной точки зрения, солитон можно рассматривать как сигнал, передающий сведения о событиях, происходящих в одной части генома, другой» /там же, с. 17/.

Кратко обратимся к общей ситуации в области генетики по вопросу о системе осуществления наследственной информации, претворения генетической информации в реальные организмы. Так, в обзоре Голубовского /1982, с. 56/ отмечается: «Многие крупные эмбриологии (Дриш, Конклин, Гурвич, Леб) и некоторые генетики (например, Филипченко) пришли так или иначе к признанию дуализма наследственной субстанции, т.е. к тому, что преэссенциальность признаков обеспечивается генами, а процесс индивидуального развития обусловлен факторами другой природы, связанными со свойствами ооплазмы. Вопрос этот вызывает споры до сих пор и остается нерешенным».

Изложенный нами биосолитонный подход к генетической информации, предполагающий связь молекул ДНК с самообразо-

ванием на ней наделенных формой солитонов, очевидно, согласуется с выводами Любищева по данному вопросу о том, что «нет основания принимать какие-либо иные наследственные факторы, кроме генов, и что проблема осуществления есть... проблема актуализации генов в ходе онтогенеза. Однако это «снятие» дуализма возможно, по Любищеву, при условии понимания гена как потенциальной формы. Он отталкивается здесь от представлений об эмбриональном поле, развитых Гурвичем... Знаменательно, что генетики, долгое время занимавшиеся проблемами морфогенеза, теперь приходят к принципиально сходным выводам. Так,

Синнот, обсуждая действие гормонов и других контролируемых генами веществ, пишет: «Эти образуемые генами вещества, по-видимому, скорее всего действуют как эвокаторы, пробуждая или изменяя формообразовательные возможности живого организма... По-видимому, способность к формообразованию присуща живой организованной системе, которую представляет собой организм» (Голубовский /1982, с. 57/).

О пространственно-временном характере ряда биологических явлений. В солитонных феноменах пространство и время взаимосвязаны, что уже рассматривалось нами в главах 1 и 3 на материалах релятивистского СГ-уравнения, механической линии передач Скотта и дислокаций Френкеля–Конторовой. В биологии известно много явлений, демонстрирующих тесную и нетривиальную связь пространства и времени. Одним из примеров этого является процесс линьки ракообразных, многократно повторяющийся на протяжении жизни организма и иллюстрируемый рис. 6.3.1 из работы Пассано /1960/. На данном рисунке длина витка спирали соответствует времени между двумя последовательными линьками. Видно, что это время монотонно

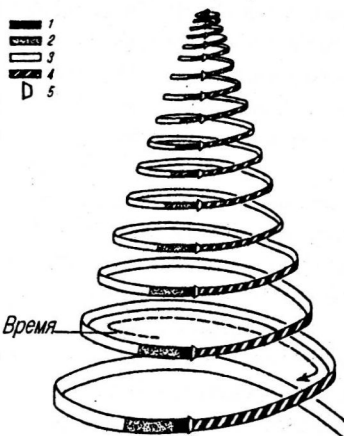


Рис. 6.3.1

Схема линьки ракообразных (по Пассано /1960/). Длина витка спирали соответствует времени между двумя последовательными линьками, а толщина линии пропорциональна увеличивающимся размерам организма. 1–5 — стадии процесса.

возрастает с постоянным масштабным коэффициентом на протяжении всей жизни с линьками, что отражается в коническом характере спирали. При этом масштабируется не только суммарное время между соседними линьками, но с тем же коэффициентом увеличивается время каждой стадии многостадийного процесса подготовки к очередной линьке. Кроме того, после каждой линьки пропорционально увеличиваются размеры и масса организма. Другими словами, данный пример биологической трансформации демонстрирует существование единой пространственно-временной структуризации сложнейших многоэтапных и многоуровневых биологических процессов, сходной с пространственно-временной организацией солитонных явлений и обусловленной спецификой биосолитонной среды.

О древних знаниях и символе инь-ян. Примером того, как интересно ученым обращаться к знаниям древних культур, является книга Князевой, Курдюмова /1994/. В ней рассмотрены параллели между современными ветвями науки о самоорганизации и древними философско-религиозными учениями Востока. Материалы этой книги и предпринятого авторами сравнительного анализа могут служить источником многих новых идей. И хотя в ней, как отмечают сами авторы на стр. 15, солитоны не рассматриваются вовсе, множество моментов делает ее интересной также с точки зрения концепции биосолитонов. В их числе — обращение внимания на то, что образные представления древних мыслителей должны найти отражение в теории самоорганизации.

В частности, обсуждается древний китайский символ инь-ян, представленный на рис. 6.3.2, который Нильс Бор сделал своим гербом (Князева, Курдюмов /1994, с. 58–60, 139, 186/). Символ инь-ян, как отмечают авторы книги, отражает «ритмы смены режимов существования». «В восточных учениях можно найти прямые свидетельства о том, что циклы переключения инь-ян уподобляются чередованию волн расхождения и схождения» /там же, с. 60/. «Одна эпоха проходит под знаком инь, а другая — под знаком ян... Их взаимопроникновение, взаимочередуемость позволяют сохранять целостность в большом и малом — сохранять то, что более всего стремились сохранять восточные мудрецы» /там же, с. 186/. Попробуем взглянуть на этот столь важный для древних восточных мудрецов символ с солитонной точки зрения.

Рассмотрим схемы рис. 6.3.2. Как известно, солитон (закрашенный на рисунке черным цветом) и антисолитон (не закрашен) СГ–

уравнения могут притягиваться и образовывать устойчивую пару — бризер, — являющуюся в то же время единым солитоном и одним из основных решений СГ-уравнения. Рис. 6.3.2 условно изображает этот процесс образования бризера посредством сближения солитона и антисолитона вплоть до их стыковки по боковому контуру. Поскольку изображенный здесь результирующий бризер представляет собой единое целое и действует в ограниченной части пространства, то это можно изобразить заключением данного бризера из солитона и антисолитона в единый круг. Другой смысл круга может заключаться в символизировании поворота на угол 2π , с которым связаны кинки СГ-уравнения (недаром эти кинки и антикинки называют 2π -импульсами (Буллаф и др. /1983, с. 22/)). В итоге, изображая бризер, получаем основное содержание символа инь-ян (его исходный вид для рис. 6.3.2 взят из книги Харгитаи /1991/).

Случайно ли такое совпадение или действительно в символе инь-ян представлен бризер СГ-уравнения, о важном значении которого (с его реальными проявлениями в живой и неживой природе) древние мыслители знали через свои «божественные откровения» или другим образом? Нам неизвестен ответ на этот вопрос, но мы не можем не отметить следующие четыре момента совпадения между бризером и этим двухсоставным символом:

— 1) ритмический, пульсационный характер существования бризера в высокой степени соответствует вышеназванному пониманию инь-ян как символа «ритмов смены режимов существования», «циклов переключения, уподобляемых чередованию волн расхождения и схождения» при «сохранении целостности в большом и малом»;

— 2) бризер состоит из связанной пары солитон-антисолитон, как аналогичных объектов противоположного знака, но и символ инь-ян состоит из связанной пары симметричных фигур, различающихся противоположным характером цвета — белого и черного;

— 3) изогнутый характер смежной границы инь и ян в этом символе соответствует изогнутому характеру формы солитонных горбов.

— 4) бризер как пара солитон-антисолитон является целостным солитонным образованием (решением СГ-уравнения) подобно тому, как инь и ян показаны объединенными в одно целое их замыканием в единый круг.

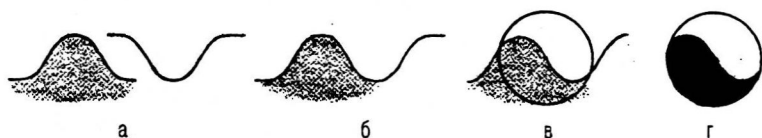


Рис. 6.3.2

Аналогия между китайским символом инь-ян и бризером, состоящим из пары «солитон—антисолитон» СГ-уравнения. *а* — расположенные вблизи друг друга кинк (зачерченный) и антикинк СГ-уравнения; *б* — те же кинк и антикинк приведены в соприкосновение; *в* — пара кинк—антикинк, условно образующая единый солитонный бризер в объединяющем круге; *г* — основа символа инь-ян

Добавим, что на полном изображении символа инь-ян присутствуют еще два его дополнительных элемента в виде маленьких кружков — один белый кружок на фоне черной половины и один черный на фоне белой половины. Эти дополнительные кружки могут интерпретироваться, например, как условное изображение иных уровней иерархии пульсирующего бытия, которые сходны по содержанию с изображаемым уровнем, охваченным большим кругом.

К теме пульсирующих бризеров напомним, что древние китайские медики были создателями эффективного метода диагностики по пульсу. «Тибетские медики в практике зачастую обходятся только им» (Цыдыпов /1988, с. 7/). «Восточный врач, образно говоря, «слушает» артерию, как струну и резонатор различных физиологических процессов в организме» /там же, с. 4/. Восточная медицина утверждает возможность не только диагностировать болезни, но «по пульсу здоровых людей предсказывать прошлое и будущее» /там же, с. 11/. Можно полагать, что в этой пульсовой диагностике врач прослушивает особенности биосолитонного ансамбля организма. Многие понятия этой древней медицины с ее представлениями об особой энергетике и энергетических каналах организма совершенно непонятны современной западной медицине. Хочется надеяться, что концепция биосолитонов позволит лучше понять идеологию восточной медицины с позиций западной науки.

Оставляя эту интересную тему о древних знаниях, обратимся теперь к современным моделям вещественно-модульных конструкций, ориентированным на биологические формы.

Об обобщенной кристаллографии. Для объяснения особенностей форм биологических тел со времен, по крайней мере, И.В. Ге-

те с его «конструкционной морфологией растений» предпринимались и предпринимаются многочисленные попытки описать эти формы как результат существования некоторого модульного конструктора, т.е. набора вещественных модулей, по определенным алгоритмическим правилам собираемых в более сложную форму (обзор имеется, например, у Короны /1987/, который также разрабатывает эту тему в морфологии растений на современном уровне знаний). Это традиционное направление исследований как бы стремится повторить для живых тел ситуацию в кристаллах, при которой целый кристалл состоит из закономерного повторения модульного блока или кристаллической ячейки. По существу речь идет о многочисленных попытках построения применимого для живых тел того или иного варианта обобщенной кристаллографии, зачастую в связи с развитием дополнительных математических теорий. Данное направление исследований дает много полезных результатов, помогающих, например, биологам-систематикам осмысливать проблемы, возникающие в ходе классификации организмов.

Оригинальный вариант обобщенной (нерешеточной) кристаллографии и соответствующую математику развивает Бульенков /1991; Bulienkov, 1998/, с работами которого автор познакомился в самом конце написания настоящей книги. Бульенков вводит понятие специального «кристаллического модуля» в виде трехмерной модульной петли. Этот модуль используется им при построении — в связи с факторами «золоточисленной метрики» — специфических каркасных иерархических конструкций. Данные конструкции, по мысли и аргументации их автора, представляют собой модульное обобщение кристаллографии связанной воды и показывают потенциальные возможности образования на их основе пространственных структур биополимеров и биосистем. Предполагается, что эта модель отражает важную роль набора детерминированных структур связанной воды в эволюции живой материи и ее морфологии, в том числе надмолекулярного уровня.

Всячески поддерживая развитие идей и методов обобщенной кристаллографии, нередко доставляющей даже чисто эстетическое удовольствие, зададимся следующим вопросом. Имеются ли существенные различия между концепцией биосолитонов и многообразными вариантами концепции обобщенной кристаллографии или эти концепции эквивалентны? Отвечая на этот вопрос, укажем, по крайней мере, шесть различий.

Во-первых, в тех вариантах обобщенной кристаллографии, которые ориентированы на биологию, делается попытка построить такую науку, которая повторила бы успех кристаллографии неживых кристаллов, но на материале живого. Однако, кристаллы имеют принципиальные «комплектационные» отличия от живого вещества, что не всегда принимается во внимание. Речь идет о том, что кристаллы отличаются постоянным составом: атомный состав кристаллической решетки практически не обновляется. Соответственно, модульные конструкции обобщенной кристаллографии также не рассматривают какого-либо систематического обновления своего состава. В то же время, говоря словами Гурвича /1983, с. 27/, «основная проблема биологии — поддержание формы при постоянном обновлении субстрата». Данная проблема обсуждалась нами в главе 5, где подчеркивалось, что в отличие от застывших кристаллографических конструкций солитоны, как устойчивые движущиеся (хотя зачастую и очень медленно) наделенные формой энергетические объекты, постоянно меняют свой субстрат подобно биологическим формам. В свете этого создателям вариантов обобщенной кристаллографии, ориентированной на биологию, необходимо специально заботиться о том, чтобы не попасть в ситуацию музея восковых фигур, где каждая фигура точно воспроизводит внешний вид знаменитого человека, но жизнь в этой копии отсутствует.

Во-вторых, многоклеточный организм, особенно на эмбриональной стадии, напоминает комок шевелящихся, перемещающихся друг относительно друга и трансформирующихся клеток, в которых шевелятся и перемещаются субклеточные компоненты. Это резко расходится с тем образом правильной каркасной конструкции, собранной по унифицированным правилам из вещественных модулей, который предлагается в обобщенной кристаллографии (иногда авторы обходят часть возникающих здесь трудностей, изначально предполагая, как это делал Гете, что уже сами модули являются биологическими и наделены всеми особенностями живого).

В-третьих, солитонные волны являются пространственно-временным объектом, а потому солитонная биология — в отличие от обобщенной кристаллографии пространственных упаковок — естественным образом охватывает в своем предмете единые пространственно-временные феномены, наблюдаемые при биологической структуризации.

В-четвертых, солитонная биология концентрирует свое внимание на жизни и возможностях колоний особых энергетических сгустков — солитонов, которые, вообще говоря, не входят в предмет обобщенной кристаллографии, рассматривающей упаковку вещественных модулей по геометрическим правилам. Конечно, солитоны могут существовать в том числе на каких-то вариантах сред, конструируемых в обобщенной кристаллографии (например, на модульных конструкциях Бульenkова с их оригинальными возможностями по обеспечению дальнего действия), но могут также обитать на иных средах, вовсе не имеющих отношения к идее регулярной упаковки модулей.

В-пятых, из существования некоторой пространственной конфигурации любого типа, образуемой в обобщенной кристаллографии по весьма специфическим и чисто геометрическим правилам уложения модулей, еще вовсе не следует, что данная конфигурация представляет из себя солитонную систему, т.е. что в ней будут рождаться и существовать солитоны. Для «солитонности» такой конструкции ее элементы должны быть не только сцеплены в единую геометрическую конструкцию, но и иметь между собой связи с определенными физическими параметрами с тем, чтобы совокупность таких элементов могла описываться одним из солитонных уравнений или демонстрировать существование в ней солитонов в ходе физических экспериментов и наблюдений.

В-шестых, даже если названная пространственная конфигурация является солитонной, она своим видом ничего не говорит о том, как будут вести себя на ней колонии из множества специфически взаимодействующих солитонов и как их существование скажется на ней самой.

Этот перечень различий полезен для дополнительного уточнения того, что же представляет собой предмет солитонной биологии, а не только для обозначения ее относительной независимости от обобщенной кристаллографии. По нашему мнению, на современном, весьма начальном этапе постижения живой материи все науки о ней представляют значительную ценность как центры кристаллизации в каждом случае определенной суммы биологических знаний. И через взаимодействие всех этих наук идет необходимое обогащение и развитие биологии. Например, каркасные конструкции Бульenkова /1991/ могут оказаться полезными при моделировании биосолитонных сред. Заложенное в этих конструкциях механическое напряжение может послужить луч-

шему пониманию возможностей образования «механических» надмолекулярных биосолитонов, т.е. биосолитонов, обусловленных механическими напряжениями в биологических средах (в отличие от «электрических» молекулярных солитонов Давыдова, которым посвящена глава 9 нашей книги и которые упоминает Бульенков). В свою очередь концепция биосолитонов может оказаться полезной для моделей обобщенной кристаллографии, позволив им за счет обращения к движущимся и наделенным формой солитонам пытаться воспроизводить феномены «поддержания формы при постоянном обновлении состава» или регулировать смену режимов укладки вещественных модулей.

6.4. О кооперативных формах поведения живой материи

Известные наблюдения солитонов и приложений их теории в различных науках связаны как с однородными средами, например, водой и плазмой, так и с относительно неоднородными конденсированными средами (см., например, книгу Абдуллаева, Хабибуллаева /1986/). Рассматриваемые в нашей книге биосолитоны реализуются на биологических макросредах, порой чрезвычайно неоднородных по своему химическому и конфигурационному составу, но всегда биологически отсепарированных: они выстроены самим организмом, защищающим их высокую специфичность, в частности, путем отторжения чужеродных биологических тканей, а также характеризуются эффективным и непонятным отбором левых или правых форм молекулярных и иных биоструктур, что будет обсуждаться в следующем параграфе. Именно эта чрезвычайная химическая неоднородность живого вещества являлась, насколько мы понимаем, основным фактором, во многом психологическим, который препятствовал охвату этого типа вещества теоретической физикой. Обнаружение биосолитонов, возможно, позволит преодолеть этот фактор.

Физики уже давно работают с упорядоченными согласованными и направленными движениями большого количества квазинезависимых частиц, называя такое поведение частиц «когерентным» или «кооперативным». «После открытия сверхтекучести жидкого гелия появилось понятие «когерентности», означающее, что макроскопическое количество атомов жидкого сверхтекучего гелия может быть описано единой волновой функцией, имею-

щей одно собственное значение, *как будто это одна частица, а не ансамбль огромного числа взаимодействующих частиц*» (Францессон /1983, с. 292/). Сходное свойство когерентности или кооперативности демонстрирует живое вещество в своих солитонных проявлениях, при которых огромное макроскопическое множество его частиц ведет себя «как будто это одна частица» — солитон. Именно эта обнаруживаемая способность живого вещества к таким солитонным когерентным формам поведения открывает новую возможность для теоретической физики вплотную заняться им. Не исключено, что эта способность живого вещества к солитонной когерентности связана со структурированной водой, составляющей ведущую часть его массы.

Сам термин «когерентность» не очень удачен из-за его многозначности, возникшей в силу долгой истории его существования (см, например, Францессон /1983/). Так, изначально понятие когерентности появилось в радиотехнике и линейной теории колебаний совсем в ином смысле: колебания называются когерентными, если разность их фаз остается постоянной. Поэтому в связи с биосолитонами нам придется или использовать другой термин, например, «кооперативность» или подчеркнуть, что «когерентность» в концепции биосолитонов будет всегда пониматься именно в смысле современной теоретической физики, а не радиотехники и пр.

В свете способности живого вещества к солитонной когерентности организм может не утруждать себя контролем за каждым элементом из множества молекул, клеток, тканей, а также решением задач, как каждым из этих элементов по отдельности управлять, а работает легко и весело, охватывая эти множества унифицированными кооперативными процессами. И он допускает в свой состав — при внутреннем синтезе нового вещества — только те компоненты, которые способны участвовать в этих кооперативных процессах.

Отметим, что реализация устойчивых солитонных состояний в возбужденной системе связана с достижением минимума ее энергии. Например, в молекулярных цепях и моделях их возбуждений (рассмотренных Давыдовым /1988/, работам которого посвящена глава 9 нашей книги), солитоны представляют собой связанные состояния электронных и деформационных возбуждений, локализованных в некоторой области цепочки и перемещающихся по ней с постоянной скоростью. При этом энергия связанного состояния меньше суммы энергий составляющих

его возбуждений, что является одной из основных причин большой устойчивости солитонов. В предыдущих главах на материалах образования доменов также подчеркивалось, что образование солитонных доменных стенок определено критерием минимизации энергии системы. С этой же минимизацией энергии связано проявление дислокаций в кристаллах и пр. Аналогично имеется возможность интерпретировать явления солитонной когерентности в живом веществе как определяемые минимизацией энергии его возбужденных состояний.

О кооперативной и элементной индивидуальности. Итак, у живого организма целые множества элементов тела могут вести себя когерентно, «как будто это одна частица». Подобно выше-названному случаю жидкого гелия, при процессе такой когерентности каждый отдельный элемент организма в составе данного процесса как бы утрачивает личную или элементную индивидуальность, становится принципиально неразличимым в рамках данного процесса, а вся совокупность элементов, охваченных этим единством, обретает новую, «кооперативную индивидуальность», становится новой «одной частицей». Эта способность организма образовывать солитонные «кооперативные индивидуальности», создавать из своих компонентов — произвольно или непроизвольно — новые частицеподобные сущности (или разрушать ранее созданные) представляется очень важной для понимания многих физиологических явлений вплоть до психофизиологических, связанных с болезненным «распадом личности» или, напротив, интеграцией возможностей организма в экстремальных условиях. Причем в рамках биосолитонной концепции эти физиологические явления можно рассматривать в связи с критерием минимума энергии возбужденного состояния системы.

С излагаемой точки зрения организм может работать и работает потому, что его части — различные виды органического матрикса, клетки и их связки, соединительные и другие ткани — способны в рамках подобных процессов когерентности утрачивать свою низшую, элементную индивидуальность и обретать более высокую кооперативную индивидуальность, выступая в составе биосолитонов и их многоуровневых ансамблей как единое целое. Теоретически предельным случаем является объединение всех элементов организма всего в одну кооперативную индивидуальность с поведением всего организма как одной частицы и утратой всеми компонентами организма какой-либо эле-

ментной индивидуальности в рамках этой когерентности. Данные представления прокладывают путь к пониманию того, как организм может с видимой легкостью и точностью управлять мириадами своих элементов.

В виде краткого отступления отметим, что смерть можно рассматривать как когерентный акт в живом веществе, приводящий к одновременной утрате множества подвижных биосолитонов во всем организме или, другими словами, к синхронному обездвиживанию в самых разных частях организма. При этом агонию, выражающуюся в кратковременных произвольных вибрациях тела умирающего, можно сопоставить с вибрациями в солитонных средах при соответствующих переходных процессах в них. Заметим также, что некоторые подсистемы организма продолжают функционировать и после его смерти, например, волосы и ногти у покойника продолжают расти, демонстрируя свою относительную автономность от когерентных актов «смерти» целого организма. Интересно, что при жизни организма волосы и ногти также наделены определенной автономией и находятся вне сферы волевых действий человека, не могут по его волевым приказам реализовывать собственные движения и пр. Видимо, при «смерти» утрачиваются именно биосолитоны, обеспечивающие выполнение «воли» организма, его волевых приказов. Здесь возможна попытка в рамках солитонного подхода понять, что же такое «воля».

При ближайшем рассмотрении можно увидеть, что едва ли не любая элементная индивидуальность в живом организме в связи с его непрерывной жизнедеятельностью представляет из себя в свою очередь тоже кооперативную индивидуальность по отношению к низшим элементам, охватываемым ею в когерентном процессе данного уровня. Тем самым, имеет место системная иерархичность, и понятия элементной и кооперативной индивидуальности могут считаться относительными и зависящими от уровня рассмотрения.

Отметим, что, насколько мы можем судить, сегодня бытует «докооперативная» физиологическая парадигма. Она представляет организм в его текущем статусе как *фиксированный* набор компонентов (рецепторов, нервов, мышечных структур и пр.), каждый из которых или управляется некоторыми компонентами данного набора, или сам управляет какими-то его компонентами. Соответственно, вне рамок этого обычного представления остаются солитонные и все иные возможные кооперативные про-

явления. Действительно, временное образование новых «кооперативных индивидуальностей» с утратой старых «элементных индивидуальностей» означает временное изменение — частичное или полное — исходного набора компонентов за счет появления новых компонентов и утраты старых именно благодаря кооперативным свойствам живого. А это не предусмотрено в названной «докооперативной» парадигме или, точнее, парадигме «фиксированного набора компонентов организма». Поскольку теоретический подход определяет постановку и смысл эксперимента, то понятно, что экспериментаторы, руководствуясь ею, многие десятилетия сосредоточены в основном на исследовании свойств отдельных компонентов организма — нервов, мышц и пр. И те трудности, с которыми они сталкиваются при попытках увязать физиологические проявления целостного организма с получаемыми ими данными в экспериментах на отдельных фиксированных компонентах обусловлены во многом неадекватностью исходной теоретической посылки.

Нами по существу предлагается новая физиологическая «парадигма солитонного организма» (или солитонно-кооперативного). Она рассматривает организм в его текущем статусе как физиологический набор компонентов нефиксированного числа и содержания, который в процессах жизнедеятельности способен преобразоваться, изменяя вид и число своих компонентов за счет временного образования или утраты кооперативных и элементных индивидуальностей (образования или распада групп объединения в единое целое). При этом данный физиологический набор уже исходно представляет собой совокупность кооперативных индивидуальностей различного уровня. Данные переходы к новым кооперативным индивидуальностям связываются с физическими причинами: энергетическими характеристиками возбуждаемой системы организма и положением «энергия объединения компонентов в единое целое меньше суммы энергий компонентов по отдельности».

Наши теоретические рассуждения о кооперативных явлениях в живом не оторваны от практики и даже повседневных проблем у людей. Здорового человека от больного мы зачастую отличаем по его способности организовывать кооперативное, взаимозависимое поведение своих подсистем, например, лица, тела, речи. Недаром говорят о распаде личности у больного, т.е. о неспособности такого человека быть «цельной личностью» и

вести себя как единое целое, проявлять нормальные «кооперативные индивидуальности» высокого уровня. И недаром у многих людей даже при обычных простудных заболеваниях или при сильном утомлении утрачивается координация движений и отдельные части тела как бы теряют связь с другими его частями на фоне общего энергетического «упадка сил». Восстановление и развитие такой функциональной целостности у человека является предметом забот и целью технологий многих медицинских, спортивно-оздоровительных, религиозных и других учений. С позиций концепции биосолитонов достижение высоких ступеней кооперативной индивидуальности соответствует более устойчивому, стабильному состоянию с пониженным уровнем энергии организма как возбужденной системы. Соответственно, частичная утрата высоких ступеней кооперативной индивидуальности у организма определяет его переход в менее устойчивые, метастабильные состояния.

Та или иная неспособность человека, например, неспособность нарисовать лошадь, видимо, связана с его ограниченным умением создать кооперативную индивидуальность с образом лошади. Каждому человеку можно рекомендовать при творческой работе любого типа — рисовании, пении, решении математической задачи и т.п. — осознанно искать состояния коллективной индивидуальности с предметом его работы, устраняя личную, элементную индивидуальность. Сознательно овладевая понятием кооперативной индивидуальности и психологической техникой целенаправленного использования более стабильных по энергетике состояний кооперативной индивидуальности, человек может развить свои способности. И это обретение новых способностей происходит и будет происходить по типу озарений, скачкообразным образом как при фазовом переходе. Жить и развиваться людям будет легче и проще при знании кооперативных свойств живого вещества. Эти вопросы, затрагивающие связи математического естествознания и высших человеческих проявлений, конечно, заслуживают более детального рассмотрения в будущем.

Подобные вопросы тесно связаны не только с проблемами здоровья и развития способностей у человека, но и многими другими, например, проблемами объективной эстетики, в том числе красоты и искусства, любви и моды, что будет обсуждено дополнительно в главе 8.

6.5. Лево-правая диссимметрия в живом веществе

Этот параграф посвящен одному из загадочных свойств живого — избирательному существованию в нем правых и левых форм диссимметричных молекулярных и иных структур (проблема неравноправия левого и правого в живом). С этим свойством связана оптическая активность веществ, из которых состоит живая материя, т.е. их способность вращать плоскость поляризации проходящего света, и многое другое. Ему посвящена обширная литература, обзор которой имеется, например, в книге Кизеля /1985/.

Подчеркнем, что будучи чрезвычайно неоднородным по своему химическому составу, хотя и состоящим во многом из структурированной воды, живое вещество как бы компенсирует это необыкновенной однородностью в отношении выбора правой или левой формы своих молекул и структур более высокого уровня. И этот тип однородности, видимо, важен для обеспечения тех когерентных (кооперативных) свойств живого вещества, которые были обсуждены в предыдущем параграфе и которые предполагают какой-то вид унифицированности элементов среды. Поэтому на вопрос о том, может ли концепция биосолитонов иметь отношение к неравноправности левого и правого у живого вещества, видимо, следует дать положительный ответ. А потому следует с позиций концепции биосолитонов искать новые подходы к нерешенной биологической проблеме диссимметризации. Этот поиск может быть тем более оправдан и результативен, что солитонное СГ-уравнение, особенно интересное с точки зрения биосолитонных феноменов, используется в физике в звуковых областях: в киральной теории поля, для описания волн поляризации и явления коллективного спонтанного излучения или «сверхизлучения» (Железняков /1989/), и пр.

Напомним, что диссимметричным называется объект, не имеющий центра и плоскостей симметрии; такие объекты могут существовать в двух формах — правой и левой («правый и левый изомеры», обозначаемые символами D и L), которые могут быть совмещены операцией зеркального отражения. Примером таких структур являются спирали, столь распространенные в живом на всех уровнях организации. Все наиболее важные вещества, из которых построены живые организмы, состоят из диссимметричных, или, как принято говорить, хиральных молекул, могу-

щих существовать в двух зеркально-симметричных формах. При этом вещества, составляющие конституциональную основу структуры и несущие основные жизненные функции, во всей биосфере встречаются в организмах только в одной (определенной) из этих двух форм, и поддержание «оптической чистоты», т.е. недопущение или устранение другой, является важной составляющей жизненных процессов. Следствием неравного количества молекул двух указанных форм в веществе является вращение этим веществом плоскости поляризации света.

Диссимметрия прослеживается во всех живых системах от бактерий до высших организмов и в самых разнообразных жизненных функциях, вплоть до сферы психики. Так, сладкие D-лейцин и D-тирозин отличаются от горьких L-изомеров. Многие изомеры различаются по запаху. L-хлоромидетин (левомицетин) — активный антибиотик, а его правый изомер вообще не антибиотик. Препарат L-фенилаланина вызывает тяжелые психические заболевания в отличие от безвредного D-изомера. Высказывались догадки, что «ненужные» изомеры стимулируют злокачественные опухоли и пр.

Многие существующие гипотезы о причинах диссимметрии живого вещества строятся на обращении к существованию некоторого постоянно действующего *внешнего* фактора. Но, как справедливо отмечает Кизель /1985, с. 102/, «постоянно действующий фактор — различное воздействие некоторого физического агента на правые и левые хиральные объекты — должен, вообще говоря, оказывать влияние на все такие объекты — от простейших хиральных молекул до хиральных полимеров и кристаллов как в неорганическом мире, так и в области органических веществ, для биологии не существенных, и на живые системы. Между тем проявления право-левой асимметрии наблюдаются — в том плане, как это рассматривалось в данной книге — лишь в биосфере (что, как известно, давало даже повод для некоторых виталистических высказываний)».

Не углубляясь в анализ этих и других известных гипотез, попробуем подтвердить то, что биосолитонная концепция может быть полезной в выработке новых подходов к тем или иным аспектам проблемы диссимметризации. И попробуем предложить первый вариант такого биосолитонного подхода, вовсе не будучи уверенными, что он представляет собой лучшее из того, что способна дать теория солитонов для данной темы.

Речь идет о выдвижении гипотезы, основанной на существовании внутреннего фактора в живом — биосолитонов. Она обращает внимание на новую функциональную оправданность диссимметрии, связывая ее с обеспечением направленности биосолитонных потоков информации, энергии и масс в организме как суперколонии биосолитонов. Она дополнительно опирается на тот факт, что «характернейшим элементом биологических (биополимерных) структур являются спиралеобразные образования... Можно с уверенностью сказать, что спиральные структуры — самый распространенный «архитектурный элемент», характерный для биологических молекул и живых структур» (Кизель /1985, с. 52–53/). Попробуем обыграть тот факт, что спираль вносит асимметрию для условий движения кинков и антикинков (спиральных волн) солитонного СГ-уравнения, столь часто фигурирующего в нашей книге.

Обратимся к уже рассмотренной в разделе 5.5 и представленной на рис. 5.5.1 узкой упругой ленте Додда и др. /1988, с. 426/, моделирующей солитонные решения СГ-уравнения. Кинк (антикинк) соответствует на ней скрутке одного (противоположного) направления, получаемой при проворачивании свободного конца ленты, затем закрепляемого. Для нашего пояснения достаточно взять узкую бумажную ленту, например, шириной в 1 см и длиной в 150 см и вслед за Доддом осуществить операции по скрутке.

Если у данной распрямленной, неперекрученной ленты, свободно лежащей на столе, закрепить концы и затем посередине длины ленты пальцами скрутить ее на 360° , то образуется сразу двойная скрутка, состоящая из двух вышеназванных противоположных скруток — кинка и антикинка. Это моделирует характерное для СГ-уравнения одновременное рождение пары кинк-антикинк, которое в квантовой механике интерпретируется как рождение частицы и античастицы. В силу симметричности ленты данная двойная скрутка не будет иметь причин для своего сдвига вправо или влево вдоль ленты.

Существенно иная ситуация возникает, если эта лента имеет изначальную асимметрию в виде ее спирализации, т.е. если перед закреплением ее концов на ней создано, например, десять витков спирали за счет того, что один из ее концов провернут на десять полных оборотов. Если на середине длины такой асимметризованной ленты с закрепленными концами и равномерным распределением витков спирали по ее длине вновь пальцами

сделать скрутку (неизбежно двойную), не отпуская пальцев и не освобождая ленту, то число витков спирали с одной стороны от места приложения пальцев будет увеличиваться из-за дополнительного закручивания этой половины ленты, а с другой стороны — уменьшаться из-за ее раскручивания. Например, при скрутке в пять полных оборотов образуется ситуация, при которой с одной стороны от середины ленты, удерживаемой пальцами, лента оказывается полностью распрямленной, а с другой стороны на ленте представлены все десять витков спирали. Если теперь разжать пальцы и освободить скрутку, то вся скрутка будет силами механического напряжения деформированной ленты приведена в движение и переместится в сторону распрямленной, ненапряженной половины ленты. Это моделирует направленное движение пары кинк-антикинк на спирализованной биологической или иной структуре.

В свете этого нами полагается, что диссиметрия биологических спиралей обеспечивает направленность биосолитонных потоков информации, энергии и масс относительно спиральных биоструктур в организме как суперколонии биосолитонов. Упрощенно говоря, при образовании на биологической спирали солитона, например, в виде такой двойной скрутки определенной ориентации, для него возникает предпочтительное направление движения. Если бы для одной и той же спиральной биоструктуры в организме существовали одновременно и левая и правая формы, то один и тот же солитон двигался бы, например, по спиральной молекуле одного и того же белка в ту или обратную сторону в зависимости от изомерного типа ее формы.

Интересно, что в суперспиралях хромосом однонаправленные движения солитоноподобных образований наблюдаются в явном виде и давно описаны. Как было рассмотрено нами в параграфе 5.5, «с одной стороны хромомера происходит раскручивание хромонемы, а с другой стороны он вновь закручивается так, что в области собственно боковой петли хромонема как бы все время «течет»» (Кикнадзе /1972, с. 14/). Конечно, многоуровневая спиральность хромосомы дает более богатые возможности для направленного движения солитонов по ней, которые еще только предстоит осмыслить. Изложенная гипотеза скорее иллюстрирует способность концепции биосолитонов предложить новые подходы к проблеме биологической диссиметрии, чем ее решение.

В отношении неспиральных биологических молекул, которые

также представлены в организме лишь одной из своих диссимметричных форм, можно предположить, что их жесткий отбор идет именно через механизмы, включающие спиральные биоструктуры с их избранным изомерным типом, которые являются как бы основным вещественным объектом, функционально оправдывающим диссимметрию. Напомним, что селекция простейших диссимметричных молекул в живом вообще идет очень строго и непонятно. Так, «стероид холестерин имеет 8 асимметричных атомов и может представлять 256 изомеров, однако в живых организмах встречается только один из них. Холевая кислота (11 хромофоров) может иметь 2000 изомерных форм; в живых системах присутствует лишь одна» (Кизель /1985, с. 46/).

Добавим, что на самом деле в живом веществе ситуация, видимо, обстоит более интересным образом, чем это представлено нами в упрощенной картине направленного движения солитона по спиральной структуре как устойчивому каркасу. В связи с отмечавшейся нами в параграфе 5.2 «основной проблемой биологии — поддержанием формы при постоянном обновлении субстрата» (Гурвич /1983, с. 27/), видимо, правильнее говорить: а) о направленном движении самих отдельных вещественных спиральных биоструктур относительно устойчивых и наделенных формой энергетических сгустков в виде ансамблей биосолитонов, кооперативным образом существующих сразу на множественном субстрате живого вещества и объединяющем его; б) о способности вещественной спиральной структуры в зависимости от ее левой или правой формы при встрече вписаться в это кооперативное по своей природе энергетическое образование — биосолитон или, точнее, ансамбль биосолитонов.

6.6. Солитонные среды как новая модель биологических сред

Биосолитонные феномены предполагают наличие у живого вещества свойств солитонной среды. Под солитонными средами понимаются такие нелинейные среды или системы, в которых могут реализоваться солитонные явления. Многочисленные приложения теории солитонов в физике стали возможны потому, что многие физические системы допускают свое модельное представление в виде солитонных сред. Моделью живого вещества может

служить солитонная среда особого, биосолитонного вида, допускающего реализацию на ней искомым биосолитонных явлений. В модели биосолитонной среды должны отражаться разноплановые особенности этих явлений и базовые свойства солитонов, определяемые их математической теорией. В том числе, должны быть представлены подвижные биосолитоны и способность солитонов к неразрушающему взаимодействию; многоуровневость солитонных доменных стенок и роль интегральных энергетических критериев в биологическом доменообразовании и взаимосогласованном поведении частей организма; способность биосолитонных ансамблей участвовать в процессах наращивания массы живого вещества и образовании новых организмов; способность биосолитонов быть составными частями биосолитонной среды и переносчиками информации, энергии и масс. Эту модель еще только предстоит детально развить. Сейчас можно говорить лишь о самых общих ее чертах и проводить сравнение с другими модельными подходами, что мы попытаемся здесь сделать.

На разных этапах развития науки стремление людей понять специфику живого вещества приводило к разным представлениям о нем. В настоящее время наиболее распространенное модельное представление о биологических макросредах базируется на понятии «активной кинетической среды», которому посвящено большое число работ многих исследователей. Нами никоим образом не отвергается большая ценность идей активных кинетических сред и связанных с ними диссипативных образований для развития представлений о самоорганизующихся структурах в науке вообще — в теории турбулентности, теории диффузии химических компонентов и пр. Но применительно именно к биологии, к коллективным формам поведения живого вещества предлагается альтернативный подход.

Первостепенным признаком названных активных кинетических сред является существование в них распределенных источников энергии или веществ, богатых энергией, за счет систематического потребления которой в них возможны особые волновые процессы. Волны, распространяющиеся в таких активных средах называются автоволнами. «Если энергия обычных — механических или электромагнитных — волн сосредоточена в источнике начального возмущения (например, во внешней механической силе или в источнике излучения), то автоволны черпают энергию из той среды, в которой они распространяются: началь-

ное возмущение играет для них лишь роль триггера, спускового механизма» (Белоусов /1987, с. 38/). Известным примером автоволны является горение шнура, распространяющееся вдоль него за счет систематической подпитки энергией от экзотермической реакции окисления вещества на горящем конце. Теория автоволн связана с диссипативными структурами: «так называют структуры, возникающие и существующие исключительно в термодинамически неравновесных условиях, т.е. при постоянном рассеянии энергии во внешнюю среду» /там же, с. 41/. В своей монографии по биологическому морфогенезу Белоусов /1987, с. 52/, говоря об автоволнах и стационарных диссипативных структурах, отмечает, что «прямые экспериментальные данные об их наличии в живых клетках пока отсутствуют».

В отличие от автоволны, требующей для своего существования энергоподпитывающей *активной* среды, солитон способен распространяться в *пассивной* солитонной среде, не имеющей никаких энергетических ресурсов, высвобождаемых при его прохождении. Однажды возникнув, солитон распространяется без получения энергии от среды и, в идеальном случае, без диссипации своей энергии (и, соответственно, без разогрева среды). Локальные активные свойства, в плане выделения дополнительной энергии для волнового процесса, эти солитонные среды проявляют только в момент генерации новых солитонов (и, может быть, разрушения существующих).

Заметим, что солитонные доменные стенки в доменных структурах никак не относятся к классу диссипативных структур, поскольку могут существовать без постоянного рассеяния энергии в окружающую среду. Теория доменных структур существует в науке независимо от теории автоволн, а сами доменные структуры являются собой давно известный в физике пример самоорганизации, который до сих пор явно недостаточно учитывался (или вовсе не учитывался) при осмыслении биологической самоорганизации.

Для пояснения общей ситуации процитируем статью по теоретической физике: «Одно из наиболее интересных нелинейных явлений в физике — спонтанное образование упорядоченных структур. Структуры возникают в двух, на первый взгляд, существенно различных типах систем. Это, во-первых, диссипативные структуры в далеких от равновесия динамических системах (ячейки Бенара в турбулентности, автоволновые процессы в химических... системах типа реакции Белоусова-Жаботинского, не-

стационарный эффект Джозефсона в сверхпроводимости, когерентная оптическая генерация в лазерах и т.д.). Во-вторых, это когерентные состояния в системах, находящихся в равновесии (упорядочение атомов в кристаллах, магнитных моментов в ферро — и антиферромагнетиках, дипольных моментов в сегнетоэлектриках, молекулярных осей в жидких кристаллах, образование сверхпроводящего состояния в металлах и сверхтекучего состояния в жидких изотопах гелия и в нейтронных звездах и т.д.). Не исключено, что и физический вакуум представляет собой спонтанно образовавшуюся упорядоченную структуру. Свойства упорядоченных структур во многом сходны, поскольку имеют общее происхождение — спонтанное нарушение симметрии. Последнее означает, что в первоначально однородной и изотропной системе спонтанно проявляются выделенные направления или положения либо в обычном пространстве-времени, либо в изотопическом пространстве. Каждая структура характеризуется своим типом нарушения симметрии, и структуры, обладающие одинаковым нарушением симметрии, имеют одинаковые свойства, описываются одинаковым параметром порядка. Это позволяет предсказывать поведение одной системы путем изучения более доступного для наблюдения поведения другой системы» (Воловик /1989/).

Тем самым, с точки зрения теории диссипативных структур и автоволн вне внимания оказываются все основные богатства знаний о кристаллографических явлениях структуризации, включая учения о жидких кристаллах, твердых растворах, дислокациях, доменах и их границах, обобщенной кристаллографии и пр., поскольку все эти морфологические структуры не относятся к классу диссипативных, для своего поддержания они вовсе не требуют постоянной диссипации энергии. Иногда встречающееся предположение о ведущем значении для биологической структуризации именно диссипативных структур исходно приписывает организму расточительный характер использования энергии, непрерывные затраты которой требуются на поддержание любой диссипативной структуры. Однако, ниоткуда не следует, что организмы не могут обойтись без такого расточительства и структурироваться на более экономичных принципах. Тем более, что именно свойствами энергоэкономичности и эффективности многих биологических процессов живые организмы всегда поражали своих исследователей, не способных воспроизвести данные свойства даже в самых современных технических системах.

Представляется, что реализация и регуляция биоструктур обеспечиваются проще и надежнее на основе солитонных сред по сравнению с активными средами и диссипативными образованиями. Организм освобождается от необходимости расставлять энергетические кормушки вдоль пути следования каждого волнового импульса, которых в организме мириады. Образно говоря, Бог, создавая живую материю, имел весомые основания предпочесть базисное использование в ней солитонных свойств.

Биосолитоны могут выступать и часто выступают как интегрирующий фактор для жизнедеятельности всего организма. Решая параллельно множество частных задач — роста, локомоции, кровоснабжения органов, и пр., — организм в то же время ведет себя как единое целое. Это ассоциируется со следующими двумя обстоятельствами. Во-первых, с известными свойствами солитонных уравнений: солитонные уравнения имеют многосолитонные решения и они должны допускать решение, представляющее собой нелинейную суперпозицию N уединенных волн при произвольном N . При этом интересен вопрос о биологической интерпретации бесконечного числа законов сохранения солитонных уравнений. И, во-вторых, с доменизацией тел, осуществляемой по интегральным критериям минимизации энергетических параметров всего тела. В подобных случаях биосолитоны в роли биодоменных стенок выступают как участники интеграционных процессов в организме.

Но биосолитоны могут также уникальным образом обеспечивать функцию переноса информации и энергии в организме с минимальным нарушением тех систем, которые лежат по ходу их движения. Речь идет о свойствах солитонов двигаться по среде без диссипации своей энергии и проходить через другие солитоны с итоговым сохранением своих скоростей и форм, т.е. не оставляя нарушений (если не считать таковыми фазовые сдвиги). Например, прохождение локомоторного биосолитона по телу змеи не мешает одновременному существованию ее ростовых биосолитонов, биосолитонов деления клеток, метаболическим биосолитонам, проходящим по каждому ее нейрону (см. параграф о нейронах), и т.д. По существу в этом случае можно говорить о солитонном обеспечении принципа невмешательства в дела соседей. Это обеспечение важно потому, что внутри организма одновременно и параллельно реализуется великое множество процессов. Если бы каждый из них всегда сильно влиял

на соседние процессы, то никакой целенаправленной и устойчивой деятельности в этой архисложной системе видимо, нельзя было бы себе представить.

Отметим, что для автоволн такую развязку процессов в организме представить себе много сложнее, если вообще возможно. Особенно, если учесть универсальный для биологических организмов характер энергообеспечения процессов с помощью выделения энергии из АТФ. Поясним эту мысль. Пусть в некоторой телесной зоне организма имеется распределенный по ней склад АТФ и через данную зону проходит одновременно много автоволновых процессов — локомоторных, метаболических, информационных и пр. Каждый из этих автоволновых процессов постоянно требует энергоподпитки из данного склада АТФ. Поэтому возникают конфликт одновременных запросов и проблема: кому, каким образом и сколько энергии в один и тот же момент надо отпустить.

Важным (если не важнейшим) компонентом биосолитонной среды являются биосолитонные доменные стенки. Из физики доменов известно о существовании многих типов доменных стенок. Например, в материалах для цилиндрических магнитных доменов реализуются блоховские (с вертикальными блоховскими линиями и без них), неелевские и другие доменные стенки. Аналогичное представление о существовании различных типов биосолитонных доменных стенок можно использовать при разработке моделей иерархических биосолитонных сред, имеющих выделенные по свойствам участки.

Биологическая эволюция предстает как эволюция биосолитонных сред и самоорганизующихся энергетических ансамблей в них. Конечно, различными химическими и физическими воздействиями биосолитонную среду можно «отравить», «раздавить» и сделать вообще несолитонной.

Глава 7

СЕНСОМОТОРНЫЕ СИСТЕМЫ И ВЫСШИЕ ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ

Сенсомоторные системы строятся на тех же основных принципах морфогенеза и роста, что и другие системы организма, но

имеют ряд функциональных особенностей. Живой организм производит свои локомоторные и другие моторные действия с учетом приходящих из внешнего мира раздражителей, наделяя в результате эти действия качествами целесообразности, полезности и т.п.

Согласно дарвиновским принципам естественного отбора, те организмы, которые способны более адекватно и быстро согласовывать свое поведение с особенностями окружающей среды, получают лучшие шансы на выживание и продолжение своего рода. Соответственно, в ходе биологической эволюции наблюдается возникновение биологических структур и решений, способных обеспечить организму более оперативное реагирование и более гибкую интеграцию увеличивающегося числа его подсистем. В частности, как это подчеркивается в физиологии движений, моторные системы организма функционируют в теснейшей связи с его сенсорными системами, образуя единую сенсо-моторную систему.

Если в морфофункциональной организации локомоций реализуются биосолитоны, как это было показано в главе 2, то естественно предполагать, что сенсорные системы также используют их, способствуя тем самым не только морфофункциональному единству моторики и сенсорики, но и работе всей биосолитонной организации живого тела на сходных принципах и «одном языке». Наши исследования, первичным результатам которых посвящена настоящая глава, подтверждают это. Судя по всему, организм умело распоряжается рецепторными биосолитонами, обеспечивая оперативность и энергоэкономичность информации от рецепторов. Речь идет о следующем.

Использование солитонов в работе рецепторной системы теоретически возможно в двух крайних вариантах. В первом нелинейная рецепторная среда при поступлении очередного внешнего раздражения всякий раз заново порождает солитон, который в своем движении переносит энергию и информацию от рецептора в последующие звенья организма. Этот вариант не экономичен по времени, поскольку солитон в нелинейной среде образуется не мгновенно, а с заметной задержкой, и только после своего образования начинает свое характерное движение.

Вспомним приведенное в первой главе описание Расселом впервые наблюдавшегося им солитона на поверхности воды с

указанием на заметное время, которое потребовалось от момента остановки баржи до образования солитона как холма устойчивой формы: «...масса воды, которую баржа привела в движение, не остановилась. Вместо этого она собралась около носа судна в состоянии бешеного движения, затем неожиданно оставила его позади, катясь вперед с огромной скоростью и принимая форму большого одиночного возвышения».

Кроме того, данный вариант относительно не экономичен по энергии. В разделе 3.1 о солитонах Френкеля-Конторовой уже было отмечено, что в энергии движущегося солитона (дислокации) при скорости, малой относительно скорости звука, основная часть энергии приходится на энергию покоящегося солитона. Другими словами, при использовании всякий раз заново создаваемого солитона сенсорная система должна была бы затратить на его создание значительную энергию, в которой собственно на движение солитона приходилась бы лишь небольшая часть.

Во втором мыслимом варианте нелинейная среда в рецепторной зоне организма имеет в своем строении уже готовые, но до поры обездвиженные (сидячие) биосолитоны, которые сразу приводятся в движение при поступлении к ним небольшой энергии (подобно тому, как сидячие дислокации в кристалле могут приводиться в движение при внешнем воздействии на кристалл). При этом по сравнению с первым вариантом экономятся время и энергия. Данная картина с запуском до поры обездвиженных солитонов напоминает ситуацию с охотничьим псом, готовым броситься за добычей, но ожидающим команды охотника.

По нашему мнению, именно по второму варианту идут живые организмы, создавая свои рецепторные системы. При этом варианте возможно характерное для рецепторных систем организма явление, при котором малый внешний раздражитель генерирует относительно большое возбуждение (так, зрению оказывается достаточным одного фотона для возбуждения). В этой же связи, видимо, характерной чертой самых разных рецепторных клеток является обилие в них митохондрий, которые являются «энергетическими станциями» клетки.

Настоящая глава посвящена изложению первичного свода полученных нами данных об участии биосолитонов в сенсорных системах.

7.1. Рецепторные клетки и биосолитоны

Первичными звеньями сенсорных биосистем являются рецепторные клетки. Рецепторные клетки делятся на экстерорецепторы и интерорецепторы в зависимости от того, откуда поступает энергия раздражителей, которую они преобразуют и кодируют, — из внешней или из внутренней среды соответственно. К экстерорецепторам относятся, например, механорецепторные волосковые клетки (входящие в состав органа слуха, вестибулярного аппарата, органов боковой линии у рыб и пр.); фоторецепторные клетки органов зрения; хеморецепторные клетки органов вкуса и обоняния. Среди интерорецепторов, которые располагаются в тканях, различают главным образом механорецепторы и хеморецепторы.

Как известно в биологии, все рецепторные клетки экстерорецепторов, а также некоторых интерорецепторов представляют собой аналоги жгутиковых или ресничных (мерцательных) клеток, которые уже рассматривались выше в параграфе 2.4 о немых мышечных двигательных системах. «Бросается в глаза, что потенциалы функционально-структурной организации рецепторов в достаточной степени ограничены. Они жестко определяются их происхождением из жгутиковой клетки. Каждый этап их эволюции, каким бы путем он не совершился, строго определяется предшествующей онтофилогенетической стадией. Однако независимо от того, совершалась ли эволюция путем отбора или была самонаправляющейся, во всех случаях перед нами биофизические преобразователи энергии — датчики информации, организация которых в одном случае соответствует физической оптике, в другом — химии растворов, в третьем — механике и акустике» (Винников /1979, с. 118/).

Названные рецепторные клетки несут на своей вершине жгутики и реснички, организованные по уже знакомой схеме «9+2» и называемые киноцилиями. Рецепторная функция осуществляется киноцилиями за счет конформационных изменений, происходящих в них при действии раздражителя (см., например, Винников /1979, с. 9/).

Морфологическое сходство между жгутиковыми и мерцательными клетками, с одной стороны, и рецепторными клетками, с другой, в биологии объясняют предполагаемым происхождением многоклеточных организмов на основе эволюционного

объединения древних одноклеточных жгутиконосцев в единые колоннальные организмы. Так, Винников /1979, с. 9/ пишет: «В настоящее время все больше доказательств приобретает теория происхождения современных многоклеточных от древних колониальных жгутиконосцев. Невольно напрашивается мысль о том, что отдельные представители колонии могли осуществлять рецепторную функцию. В самом деле, только при помощи жгутиков, выполняющих локомоторную функцию, колония жгутиконосцев, вероятно, могла одновременно узнавать о механических, химических или других свойствах окружающей среды. Более того,... даже восприятие света специальными органеллами современных *Diflagella* осуществляется при участии жгутика». Именно с эволюцией рецепторных клеток органов чувств биологи в настоящее время связывают генез и дальнейшую эволюцию центральной нервной системы, говоря словами Hanstrom: «органы чувств создали нервную систему» (Винников /1979, с. 10/. Но сами рецепторные клетки произошли от двигательных клеток жгутикового и мерцательного типа.

Данные факты дополнительно интересны тем, что «в процессе эволюции реснички могут сохранять типичное строение, теряя двигательную функцию. Это заставляет думать, что стандартный набор фибрилл, столь характерный для всех подвижных ундулоподий (9+2), не есть непосредственное приспособление для совершения двигательного акта, но является приспособлением для какой-то другой функции, которая может играть важную роль при работе ундулоподии (регуляторная, чувствительная и т.п. функции), однако может использоваться и для других целей. Облучая ультрафиолетовыми лучами жгутиконосцев *Chlamydomonas moewusii*, Левин получил несколько мутантных штаммов этого простейшего, у которых жгуты оказались совершенно неподвижными (так называемые «парализованные» мутанты). Был выполнен целый ряд экспериментальных работ, чтобы выяснить, чем отличается неподвижный жгутик «парализованных» мутантов от нормального жгутика хламидомонаса. Электронномикроскопические исследования не обнаружили никаких структурных изменений в неподвижных жгутах... Дыхание мутантов оказалось пониженным, но очень незначительно, что вполне можно объяснить отсутствием у них подвижности. Биохимические исследования показали, что у «парализованных» мутантов АТФ-азная активность жгутиков в три раза ниже, чем у исходных простейших»

(Серавин /1967, с. 19/). Именно изменения в энергоснабжении от АТФ оказываются наиболее характерными для обездвиживания жгутиков с их солитонным характером движения, то есть базирующимся на самолокализации устойчивых сгустков энергии.

В локомоторном и рецепторном использовании жгутиков основное видимое отличие заключается в противоположном направлении энергопотоков. В случае использования жгутика по локомоторному назначению он возбуждается энергией из внутренних АТФ-резервов клетки и должен выполнять работу во внешней среде, например, по массопереносу тела клетки в ней. При выполнении рецепторной функции жгутик, наоборот, возбуждается энергией раздражителя из внешней среды и должен передать информационный энергетический сигнал об этом раздражителе во внутреннюю среду.

7.2. Сенсорные системы

В наших прежних работах обосновывалось существование и общебиологическое значение некоторой прасистемы биологической регуляции, ответственной за согласованное поведение отдельных частей тела в ходе роста и развития организма. Эта прасистема (называвшаяся нами «морфогенетической») интегрирующей регуляции, видимо, существует наряду с нервной и гуморальной системами регуляции, также выполняющими определенные функции объединения частей организма в единое целое. По отношению к ним она является древнейшей в эволюции (ведь способность к росту — древнейшее свойство живого вещества; морфогенез и рост геометрически правильных и нетривиальных форм наблюдается у простейших, в том числе одноклеточных организмов, лишенных нервной системы). Другие системы регуляции не только погружены в нее своими структурными образованиями, но и возникают в фило- и онтогенезе на ее фоне. Даже у высокоразвитых организмов можно проследить на отдельных фактах вторичность включения нервной системы в регуляцию поведения органов и тканей в ходе индивидуального развития: еще до появления необходимых элементов нервной системы отдельные части организма демонстрируют согласованное активное поведение, подобное морфогенетическим движениям. В качестве примеров приведем два известных факта. Так, первое, что

приходит в движение у четырехмиллиметрового трехнедельного плода человека, — это сердце. Начало сердечной деятельности обусловлено внутренними причинами, так как в это время у сердца еще нет нервных связей, оно начинает сокращаться, когда еще нет крови, которую надо перекачивать.

Другой пример касается личинок рыб *Tantogolabrus*, которые в первый день своего свободного плавания в водоеме еще не реагируют на внешние раздражения, т.е. передвигаются без какой-либо эффективной рецепторной системы. Сенсорная система развивается у них постепенно и лишь позже стыкуется с первичной системой движения для биологически целесообразного согласования ее врожденной активности с характером внешних раздражений.

Концепция биосолитонов и уже полученные в связи с ней данные о биосолитонах позволяют считать, что названная прасистема регуляции как раз и представляет собой суперколонию биосолитонов организма, то есть носит энергетический характер, обусловленный особыми нелинейно-физическими свойствами живого вещества. Соответственно в организме, наряду с ранее известными системами передачи информации — гуморальной и нервной — существует третья система передачи информации — биосолитонная.

Имеется много причин полагать, что деятельность различных сенсорных систем организма — вестибулярного аппарата, зрения, слуха и пр. — строится на использовании биосолитонов. Перечислим некоторые первичные данные по различным сенсорным системам о присутствии в их морфо-функциональной организации биосолитонов. При этом необходимо учесть, что в рассматриваемых сенсорных системах исходно участвуют те самые рецепторные клетки, связям которых с биосолитонами был посвящен предыдущий параграф и которые только из-за экономии места опускаются в приводимом ниже перечне.

Вестибулярный аппарат. Вестибулярный аппарат является активным участником организации локомоций и моторных движений организма. Его происхождение ведут от боковой линии тела рыб, демонстрирующих способности к биосолитонным локомоциям (см. главу 2). Это свидетельствует в пользу того, что вестибулярный аппарат изначально был связан с локомоторными биосолитонами и сохранил данную связь.

В четвертой главе в связи с рис. 4.1.3 нами уже довольно подробно рассматривалась отолитовая макула вестибулярного

аппарата как многоуровневая биодоменная структура с биосолитонными доменными стенками. В частности, было отмечено, что на рис. 4.1.3 *в* все множество стрелок, соответствующих пучкам с ориентированным расположением киноцилий, разделено на два биодомена с биосолитонной стенкой между ними.

Направление стрелок соответствует не только морфологии, но и функционированию пучка волосков как рецепторного образования. В покое от него по отходящему нерву отводится стабильная частота нервной импульсации с частотой около 100 Гц. При отклонении этого пучка под действием внешней силы раздражителя в сторону киноцилии частота импульсации увеличивается примерно пропорционально отклонению, а при отклонении пучка в сторону от киноцилии — уменьшается. В связи с этим говорят о морфофункциональной поляризации данных (и многих других) рецепторных образований в смысле наличия в них двух выделенных противоположных направлений с противоположными знаками реагирования. При естественной стимуляции отолитовой макулы в силу сдвига целостного отолита вдоль оси стрелок частота импульсации от чувствительных пучков, имеющих противоположную ориентацию стрелок, изменяется противоположным образом. Соответственно уменьшенная или увеличенная частота импульсации от каждого пучка используется организмом адресным образом для управления опорно-двигательным аппаратом, в котором также различаются противоположно действующие мышечные комплексы.

Форма другого рецепторного образования вестибулярного аппарата — ампулярного гребня (крысты) полукружного канала воспроизводит колоколообразную, одногорбую форму солитонной волны, как это отмечалось в параграфе 5.4. При этом группа чувствительных волосков, объединенных в так называемую купулу, размещена в покое прямо на гребне этой обездвиженной «волны» и при стимуляции полукружных каналов смещается по гребню в ту или иную сторону, как бы пропуская под собой эту вдруг побежавшую солитонную волну. Создающееся при этом сенсорное возбуждение используется для инициации процессов моторного и иного реагирования организма на данный вестибулярный стимул. Система из шести таких полукружных каналов (по три канала в каждой половине головы, расположенных зеркально симметрично) служит в организме инер-

циальным датчиком поворотов головы, вызывающих относительное движение купул и ампулярных гребней.

Обратимся еще к так называемому вестибулярному нистагму глаз. Речь идет о специфических «пилообразных» движениях глаз, возникающем при стимуляции полукружных каналов, например, термической: глазные яблоки медленно с постоянной скоростью смещаются к краю глазницы, а затем скачком возвращаются к ее противоположному краю и снова с постоянной скоростью дрейфуют к первому краю. Этот процесс периодического характера может повторяться очень долго без видимого утомления глазных мышц (у вестибулярных больных такой глазной нистагм идет практически постоянно, что свидетельствует в пользу его энергоэкономичности). После своего запуска этот дрейф идет непрерываемым, как бы самоподдерживающимся образом до тех пор, пока не будет достигнуто характерное для данного вида нистагма предельное положение глазного яблока в глазнице. Этот энергоэкономичный, непрерываемый после его запуска дрейф с постоянной скоростью глазных яблок при нистагме может трактоваться как биосолитонное движение с его постоянством скорости, устойчивостью и высшей энергоэкономичностью.

Зрение. В устройстве зрительных аппаратов также имеется много примеров доменного типа строения с участием солитонных доменных стенок, сходного, например, с картинками множества цилиндрических магнитных доменов на рис. 4.1.3 а. Здесь можно назвать, например, устройство фасеточных глаз членистоногих или сетчатку глаза человека.

К теме зрительного восприятия дополнительно напомним, что нормальное зрительное восприятие невозможно без микродвижений глазного яблока. На рис. 7.2.1 из работы Притчарда /1974/ представлена траектория смещения по сетчатке глаза изображения точечного объекта, обусловленная соответствующим микротремором глазного яблока относительно рецепторов сетчатки.

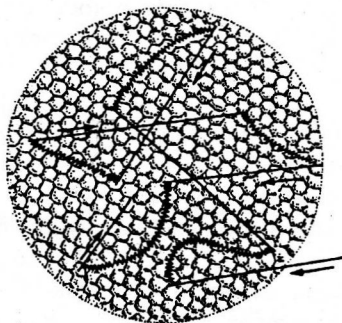


Рис. 7.2.1
Микродвижения глазного яблока (по Притчарду /1974/).

Диаметр изображенного участка центральной ямки сетчатки составляет 0,05 мм. Частота тремора — до 150 циклов в секунду, амплитуда равна примерно половине диаметра отдельной колбочки сетчатки. Обращает на себя внимание закономерный характер высокочастотного тремора изображения, проявляющийся в следующем. Прежде всего, все зубцы в любой из серии практически одинаковы по длительности и амплитуде (их число на каждой из пяти изображенных волнообразных линий равно 27 или 42). С позиций биосолитонной концепции эта одинаковость дает основание полагать, что в данном случае работает бризер, характерное для которого пульсирующее поведение и обеспечивает данный микротремор. Дополнительно наши исследования показали, что эти волнообразные линии хорошо описываются в виде конформногеометрических (или, что то же самое, мебиусовых) цикломерий (Петухов /1988, с. 43/).

Напомним также, что происхождение фоторецепторов связывается в биологии с рассмотренными в предыдущем параграфе рецепторными и жгутиковыми клетками (см., например, Серавин /1967, с. 18/), то есть с клетками, демонстрирующими биосолитонные формы поведения.

Слух. Уже по своему строению улитка уха воспроизводит раковину садовой улитки, с описания локомоторных биосолитонов которой началась фактологическая часть нашей книги. Спиральные формы живого, как уже не раз отмечалось по ходу книги, напоминают о спиральных волнах солитонного СГ-уравнения. Многие особенности строения органа слуха, например, укладки его волосковых клеток на слуховой мембране носят явно доменный характер.

В современной литературе имеются данные о двигательной активности наружных волосковых клеток в улитке уха, которые прежде считались лишь рецепторными клетками. Это дает дополнительную возможность моторным биосолитонам участвовать в обеспечении слуховой функции.

Может ли одnogорбая солитонная волна двигаться вдоль чувствительной перегородки улитки уха? Прямое свидетельство в пользу этого имеется в экспериментальных наблюдениях Бекеши по последствиям от ступенчатого смещения слухового стремечка: «Когда стремечко внезапно смещается, вдоль перегородки по направлению к геликотреме путешествует горб волны»

(Бекеши, Розенблит /1963, фиг. 38, 39/). Амплитуда и скорость движения этого характерного волнового горба практически не изменяются, и только в конце пути вблизи геликотремы скорость несколько уменьшается.

Кожная чувствительность. В коже находится огромное количество нервных окончаний многих сортов. «Исследователи очень давно установили, что кожа обладает способностью воспринимать три основных вида воздействий: механические (давление, прикосновение, вибрацию и др.), температурные (тепловые и холодовые) и болевые. Однако вплоть до сегодняшнего дня нет ни одной теории, удовлетворительно объясняющей восприятие кожей этих раздражителей» (Ильинский /1972, с. 32/).

Для тела человека и животных кожа служит границей, отделяющей его от внешней среды. Она является участником трансформаций тела при биосолитонных локомоциях и потому, конечно, способна к кооперативным (когерентным) формам поведения или реагирования, к участию в явлениях образования «кооперативной индивидуальности» (см. параграф 6.5). Кожа имеет также свои специфические виды когерентных феноменов. Примером этого является спонтанное возникновение в некоторых условиях — страха, холода и пр. — так называемой «гусиной кожи», при проявлении которой на больших площадях поверхности тела вся кожа оказывается внезапно и спонтанно усыпанной множеством пупырышков, расположенных относительно регулярным образом. Возникающая картина напоминает кожу ошипанного гуся или курицы, откуда и произошло ее название. Выступая в биологии частным примером к проблеме морфогенетических параллелизмов, она также напоминает размещение зернышек на поверхности ягод клубники, земляники и ряд других биологических поверхностей. И эта же картина очень сходна с видом множества цилиндрических магнитных доменов на феррит-гранатовой пленке (рис. 4.1.3), описанной в главе 3.

Обратимся к кончикам пальцев рук у человека, наделенных повышенной тактильной чувствительностью, с помощью которых человек ощупывает предметы и может с закрытыми глазами относительно легко составить адекватное представление о характере поверхности и форме ощупываемого. На кончиках пальцев расположены выраженные папиллярные линии, в картине которых гребни чередуются с желобами и которые напо-

минают гофрированную поверхность. Но гофрированная поверхность уже фигурировала в тексте нашей книги при иллюстрации специфических свойств солитонов СГ-уравнения на рис. 3.3.2 и 3.3.3. Нельзя ли в свете этого связать папиллярные линии рук с гофрированными энергетическими поверхностями, на которых возникают солитоны СГ-уравнения, как это рассмотрено в параграфе 3.3 по статье Ребби? Полагаем, что это можно и нужно сделать.

В этом случае гребни папиллярных линий оказываются гребнями энергетических поверхностей Ребби (то есть являются зонами максимума внутренней энергии в смысле Ребби), а дно желобов на карте папиллярных линий — днищем желобов энергетических поверхностей (зонами минимума внутренней энергии). Соответственно, на этой гофрированной поверхности при различных энергетических воздействиях на нее могут возникать и существовать топологические солитоны СГ-уравнения. Карта солитонов на папиллярных линиях (и лежащих под ними структурах) и сопутствующая карта механических напряжений на этих поверхностях, прежде всего, на высокочувствительных подушечках пальцев, вероятно, является важным участником явлений кожной чувствительности, в частности, связанного с нею тактильного распознавания образов. Названные энергетические воздействия, вообще говоря, могут быть внутреннего и внешнего происхождения, а потому у организма имеется, например, возможность сопоставлять солитонные карты механических напряжений в зонах папиллярных линий, создаваемые по его внутренним энергопосылам, с теми солитонными картами, которые создаются на тех же зонах внешними механическими воздействиями от осязаемых предметов (то есть осуществлять распознавание осязаемого предмета методом сравнения). Подобный биосолитонный подход — с энергетической интерпретацией локальных различий в «гофрированной» или иной неоднородной структуре биологической поверхности как различий в локальном уровне внутренней энергии в смысле Ребби — возможен также во многих других случаях биологических структур.

В целом концепция биосолитонов обращает внимание на кооперативные особенности морфо-функциональной организации сенсорных систем и предоставляет новые подходы для их осмысления.

7.3. Мышцы

До 40% массы тела млекопитающего составляет мышечная ткань. Она состоит из клеток, главная задача которых сокращаться. Одно из основных свойств всех животных клеток — сократимость — достигла у них наивысшего развития. Все мышечные клетки длинные и узкие, а потому их называют мышечными волокнами. Благодаря мышечным сокращениям происходят разнообразные движения тела самого животного и его внутренних органов. В мышцах широко представлены явления спирализации: от спиральности актиновых и миозиновых нитей до спирального характера сердечной мышцы и спиральной укладки в стенках кровеносных сосудов мышц, регулирующих тонус и просвет этих сосудов (Куприянов и др. /1975/).

Мышечные ткани бывают трех типов: гладкая, сердечная и поперечно-полосатая. Гладкие мышцы являются эволюционно наиболее древними и медленными, а также наименее упорядоченными из трех названных типов. Они сокращаются произвольно и залегают обычно слоями в стенках полых структур, например, кровеносных сосудов, воздухоносных путей, мочевого пузыря и пр. Главная задача этих мышц — регулировать величину просвета полых органов, проталкивать содержимое вдоль трубок с помощью сократительных волн. Сердечная мышечная ткань составляет большую часть массы сердца и отсюда получила свое название. Волокна этой ткани, в отличие от гладких мышц, имеют поперечную исчерченность, но также сокращаются независимо от воли их обладателя.

Поперечно-полосатые мышцы являются наиболее эволюционно поздними, упорядоченными и скоростными. Материал об эволюционном упорядочивании строения мышц сам по себе очень интересен для осмысления того, как солитоны могут вносить упорядочивание в солитонные среды. В плане эволюционных усовершенствований здесь имеются аналогии с рассмотренными в четвертой главе упругими доменами и постепенным образованием в гетерофазных твердых растворах периодически модулированных структур (Хачатурян /1974/), которые формируются из слабо упорядоченных включений новой фазы (эта начальная стадия напоминает эволюционную стадию гладких мышц), достигая в итоге строгой структурированности, зачастую сходной с видом поперечно-полосатых мышц.

Именно с помощью последних осуществляются волевые движения животных. Своими концами эти мышцы связаны с костями, поэтому при их сокращении происходит движение скелета тела, отчего они еще называются скелетными. Поперечно-полосатые мышцы являются одним из наиболее изучаемых биологических объектов, число исследовательских публикаций по ним достигает многих тысяч. Они имеют во многом кристаллоподобное строение, например, строго регулярную гексагональную укладку актиновых и миозиновых нитей, строго периодический строй саркомеров и пр. Другими словами, они располагают каркасом, на котором, видимо, вполне могут существовать упругие домены.

Как уже отмечалось в четвертой главе, мышцы имеют доменообразное строение и могут рассматриваться как биологические супердоменные образования. В частности, отмечалось совпадение между, с одной стороны, картинами косых упругих доменов и периодически модулированных структур, наблюдаемых в гетерофазных твердых растворах (Хачатурян /1974/), и, с другой стороны, картинами перистых мышц (рис. 4.1.2) и поперечно-полосатых мышц соответственно. Доменообразное строение имеют также линейные связи миозиновых нитей с противоположно ориентированными пучками головок на концах связок; конструкции в виде двойной спирали у каждой миозиновой и каждой актиновой нити, и пр. В свете этого, имея примеры локомоторных и других биосолитонов в физиологических явлениях, связанных с работой мышц, естественно предполагать, что мышцы работают на солитонной основе в согласии с понятиями физики доменов и солитонных доменных стенок. В данном параграфе нами отмечается первоначальный ряд фактов, свидетельствующих в пользу этого положения.

В работе Coleman и др. /1972/ описан феномен возникновения и движения по мышечной ткани на большие расстояния локализованных и неумещающихся волн, особенно длительных и регулярных в условиях добавления в раствор химического агента из группы Methylxanthines. Эти волны, по всей видимости, являются биосолитонами. Речь идет о физиологических исследованиях на зрелой культуре мышечной ткани, приготовленной из ножной мышцы куриного эмбриона. Эта мышечная ткань в изотоническом растворе демонстрировала редкие спонтанные сокращения. Добавление названного агента в раствор не только усилило эти спонтанные сокращения, но и в выраженном виде про-

демонстрировало возникновение в ткани устойчивых волн, бегущих по ней на большие расстояния без своего уменьшения. Регулярная последовательность этих бегущих волн, наблюдаемых в фазово-контрастный микроскоп, напоминает движущуюся лестницу, а потому данный феномен назван его исследователями «скользящей шкалой» («escalation»). Движение таких волн по мышечном волокну могло продолжаться часами со случайными перерывами.

Авторы описываемого исследования выделяют следующие главные черты данного волнового феномена. Волны возникают в одной или сразу нескольких точках их инициации, лежащих на мышечном волокне, и распространяются по нему в обе стороны. В каждой такой точке инициации волны возникают на стандартной частоте в диапазоне частот от 5 до 20 волн в секунду. Неизвестно, являются ли эти точки инициации структурно выделенными зонами на волокне или они представляют собой локальное проявление каких-то случайных событий вдоль однородного волокна. «Однажды возникнув, волны движутся со скоростью из диапазона значений в 50–200 мкм/сек, иногда быстрее. Они могут пройти сотни микрон, не уменьшаясь в силе и оканчиваясь на конце волокна или при столкновении со встречной волной» /там же, с. 615/. Это столкновение встречных волн с их аннигиляцией можно считать аналогичным аннигиляционному столкновению встречных кинка и антикинка на модели Додда в виде упругой ленты (рис. 5.5.1 *a*), рассмотренной в параграфе 5.3.

В зоне инициации волны часто можно наблюдать локальные подергивания, причем каждое маленькое подергивание порождает волну с указанными свойствами. «Представляется, однако, что эти волны движутся без сопровождения в виде сокращения саркомеров» /там же, с. 615/, т.е. их прохождение через саркомеры не вызывает видимого сокращения последних. Прохождение данных волн по волокну осуществляется также без их сопровождения в виде потенциала действия и никак не сказывается на его трансмембранном электрическом потенциале. Отмечается, что наиболее необходимым из химических компонентов для существования данных волн являются ионы Ca^{++} . Здесь следует подчеркнуть, что далеко не во всяких нелинейных средах могут рождаться и двигаться солитоны, т.е. не всякая нелинейная среда является солитонной; в частности, химическим или иным воздействием можно солитонную среду преобразовать в несолитонную («отравить», «сжечь» и

т.п.). Авторы также приводят данные о том, что этот волновой феномен имеет место и в отсутствии стимулирующего химического агента, но в необработанных мышечных волокнах он просто заторможен, находится в дремотном состоянии.

Обращаясь к параллелям между мышечными сокращениями и поведением твердотельных упорядоченных сред типа кристаллических, отметим, что уже давно многими учеными высказывались суждения о связи этих сокращений с фазовыми переходами. Так, в 1946 г. Энгельгардт высказал идею о «кристаллографической» природе сокращения. Речь шла о том, что в покоящейся мышце белок находится в упорядоченном кристаллическом состоянии. Сокращение мышцы происходит в результате плавления белковых кристаллов, т.е. фазового перехода. Сходные идеи были сформулированы Prior в 1950 г. Flori в 1957 г. также исследовал мышечное сокращение, исходя из идеи фазового превращения. Hill в 1968 г., исходя из ранее развитой им теории фазовых переходов в линейных регуляторных системах, предложил рассматривать сокращение саркомера как фазовый переход первого рода между двумя состояниями белковых нитей — без мостиков и с мостиками. Эти работы рассматриваются в обзоре Волькенштейна /1978, с. 241–246/, который подчеркивает, что конформационные явления в мышце и мышечных белках изучены недостаточно и что они могут быть связаны с фазовыми превращениями. Говоря о работе мышц, Волькенштейн также отмечает: «можно думать, что изложенные выше идеи Энгельгарда, Флори и др. имеют прямое отношение к делу. Выше уже говорилось о жидко-кристаллических свойствах сократительных белков. Жидко-кристаллическое состояние сократительных фибрилл устойчиво в широком диапазоне условий. В этом диапазоне реализуется полиморфный фазовый переход типа порядок-беспорядок... Результаты, полученные на модельных жидко-кристаллических системах, согласуются с результатами структурных исследований мышц. В процессе укорочения мышцы меняется период решетки, построенной из протофибрилл. При движении решетки тонких нитей в решетку толстых нитей тетрагональная симметрия заменяется гексагональной, т.е. решетка тонких нитей претерпевает полиморфный переход. Дальнейшее изучение этих явлений весьма актуально. Мы еще не располагаем убедительной молекулярной картиной мышечного сокращения».

Эти работы по фазовым переходам очень близки нам по направлению мысли, хотя в них говорится о вероятной важности фа-

зовых переходов и упорядоченности типа *жидко-кристаллической* вообще, но не рассматривается роль доменов, а также ничего не говорится о солитонах, в частности, о солитонных доменных стенках. Кстати, для мышц особенно интересными кажутся упругие домены, сходные с доменами гетерофазных *твердых* растворов, поскольку именно в классе твердых растворов в отличие от жидких сред возможно развитие значительных тянущих сил типа мышечных.

Имеются разные возможности построения функциональных моделей мышц на солитонной основе. Может быть, наиболее простой и естественный подход при этом связан с продолжением — на новом уровне знания — названного направления интерпретации морфофункциональных особенностей мышц в связи с фазовыми переходами и кристаллофизическими понятиями. Речь идет о рассмотрении строения и функционирования мышц как супердоменных систем с солитонными доменными стенками, перестройка суперсети которых при возникновении напряжений в мышцах и их окружении обуславливает явления мышечного сокращения и расслабления. В связи с этой перестройкой реализуется рассмотренный нами в главе 4 принцип регуляции, который можно кратко называть «регуляцией по интегральному уровню энергии среды».

Действительно, работу мышцы можно представить себе следующим образом. В состоянии покоя мышца представляет собой супердомен, который выстроен под обычное для образования доменов требование минимизации некоторой ее суммарной энергии (типа абсолютного минимума суммы химической свободной энергии и энергии внутренних напряжений как у упругих доменов в гетерофазных твердых растворах). При необходимости сокращения мышцы в нее — по сигналам от нервной или иных систем организма — поступает дополнительная энергия от АТФ (можно также рассматривать обратный вариант отбора из мышцы в АТФ части уже имеющийся энергии), изменяющая картину внутренних напряжений в мышце. Данные внутренние напряжения могут быть вызваны деформациями органического каркаса мышцы, например, в связи с рождением или приходом новых биосолитонов (подобно возникновению напряжений в кристаллах из-за дислокационной деформации их решетки). Для релаксации данных напряжений и минимизации нового энергетического расклада происходит спонтанная перестройка супердоменной конструкции мышцы, включая суперсеть ее биосолитонных доменных стенок, которые представ-

ляют собой зоны повышенной концентрации энергии. Это во многом подобно, например, перестройке картины доменов у ферромагнетиков при изменении соответствующей величины поля подмагничивания. Тем самым, имеется возможность через задание — локальное или даже точечное — тех или иных исходных напряжений в среде вызывать процессы перестройки мышечных супердоменов. Супердоменное строение мышцы позволяет, видимо, регулировать изменение напряжения даже всего на одном каком-то уровне ее доменизации с учетом того, что данные изменения, вообще говоря, способны вызвать взаимозависимые процессы релаксационной перестройки также на других взаимосвязанных уровнях всей мышцы.

При этом варианте регуляции по интегральному уровню энергии среды нет необходимости заботиться об управлении каждой субъединицей мышцы, вся их совокупность перестраивается согласованным, коллективным образом, как всегда при явлениях доменизации. И, если какие-то субъединицы из-за местных затруднений располагаются не лучшим образом, то это компенсируется соответственно скорректированным расположением других субъединиц. В итоге вся система с повышенной надежностью решает свою задачу доменной перестройки по интегральному энергетическому критерию, несмотря на ненадежное поведение ее отдельных элементов.

Возвращение к первоначальным исходным напряжениям в рассматриваемой биосолитонной мышечной среде вызывает обратную перестройку с возвращением первоначальной картины биологических доменов в ней. При этом могут проявляться гистерезисные явления и так называемые скачки Баркгаузена, обычные для процессов доменизации.

Можем ли мы указать конкретные примеры доменообразных перестроек при работе мышц? Да, можем. На рис. 7.3.1 представлена общепризнанная схема поперечно-полосатой мышцы в состо-

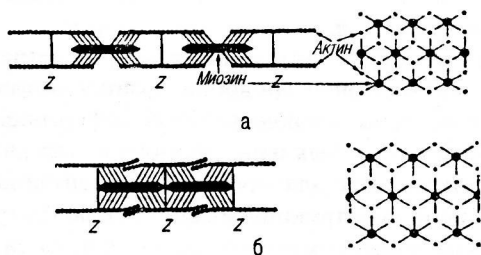


Рис. 7.3.1

Схема тонкой структуры саркомера мышцы в продольном и поперечном сечении (по Волькенштейну /1978/). а — саркомеры в покое; б — саркомеры в состоянии сокращения. Буквами обозначены участки саркомеров.

янии покоя и состоянии напряжения, взятая из книги Волькенштейна /1978/. На этом рисунке, показывающем расположение элементов внутри мышечных саркомеров, воспроизведено расположение миозиновых мостиков в виде косых и параллельных друг другу черт на концевых однородных участках миозиновой нити. Другими словами, эти мостики в каждой такой зоне агрегированы высокооднородным образом, а сами концевые зоны с их однородно уложенным содержимым и взаимной симметричностью, различаются друг от друга ориентацией данных мостиков. Эти концевые области выступают в роли доменов, разделенных доменными стенками. Одна доменная стенка приходится на середину миозиновой нити, существенно отличающуюся по своему строению от концевых участков отсутствием на ней миозиновых мостиков (головок миозиновых молекул). Другая доменная стенка приходится на зону Z, разделяющую две соседние миозиновые нити.

При переходе из состояния покоя в состояние напряжения происходит перестройка биодоменной картины, которая на представленной схеме включает в себя резкое сокращение названных доменных стенок (сближение концевых зон миозиновых нитей) и изменение расстояний между параллельными актиновыми и миозиновыми нитями, уложенными в гексагональные связи. При расслаблении мышцы ширина солитонной стенки и вся биодоменная картина восстанавливается (с точностью до явлений гистерезиса). Подобное изменение размеров солитонных доменных стенок на разных уровнях супердоменного строения живого наблюдается не только при мышечном сокращении, но и при многих других физиологических процессах.

Отметим также следующее. По свойствам мышц, в частности известно, что очень низкой концентрации ионов кальция достаточно для перевода мышечной системы из состояния покоя в состояние мышечного сокращения (Бендолл /1970, с. 91/). Но в четвертой главе нами уже отмечалось наличие аналогичного свойства у структурированных гетерофазных твердых растворов внедрения: в них экспериментально обнаруживаются упорядоченные структуры при чрезвычайно малых концентрациях примеси внедрения (порядка атомных процентов), что связывается с упругими искажениями кристаллической решетки (Хачатурян /1974, с. 323/).

Другая интересная аналогия связана со скачкообразностью движений. Давно известно, что мышцы сокращаются скачкообразно: «укорочение всей мышцы при постепенном увеличении

силы нарастает всегда ступенчато, а не непрерывно» (Гурвич /1977, с. 131/). Нами усматривается в этом одно из свидетельств в пользу представления о работающих мышцах как о перестраиваемых доменных структурах с движущимися солитонными доменными стенками, и соответственно трактовки скачков, наблюдаемых при сокращении мышц, как скачков Бракгаузена (см. ниже). С этих позиций данные скачки должны быть тесно связаны с петлей мышечного гистерезиса подобно тому, как это имеет место в известных физике случаях доменной перестройки.

Напомним в этой связи данные физики о движении доменных стенок вообще, преимущественно на примере доменов у ферромагнетиков, которые, как уже отмечалось в главе 4, очень похожи на упругие домены.

Как известно для различных видов реальных нелинейных кристаллов, демонстрирующих способность к доменизации, при плавном изменении величины внешнего поля, управляющего доменизацией, наряду с плавными обратимыми процессами изменениями магнитного, электрического или упругого состояния реального кристалла наблюдаются и играют важную роль процессы скачкообразного изменения его состояния, например, намагниченности ферромагнетиков и поляризованности сегнетоэлектриков. Эти скачкообразные изменения принято называть скачками Бракгаузена, который первым описал их в 1919 г. на примере ферромагнетиков. В современной физике твердого тела этим скачкам уделяется значительное внимание, поскольку изучение эффекта Бракгаузена вносит существенный вклад в понимание физических процессов при движении доменных стенок, перемагничивании, реполяризации и т.п. Важно, что в отличие от других методов изучения динамики доменной структуры, скачки Бракгаузена дают сведения о процессах, происходящих не только на поверхности образца, но и во всем его объеме, а также позволяют судить о некоторых сторонах перестройки доменной структуры в целом (Рудяк /1986, с. 6/). Основными механизмами скачков Бракгаузена считаются скачкообразное движение доменной границы на дефектах и включениях, а также образование зародышей доменов, их рост и слияние доменных границ.

Между эффектом Бракгаузена и явлением гистерезиса (точнее основными элементами его петли) в нелинейных кристаллах имеется глубокая связь. Наличие петель гистерезиса определено

необратимыми процессами перестройки доменной структуры а этих кристаллах. «Одна и та же причина, а именно необходимость перестройки доменной структуры в нелинейных кристаллах, порождает два следствия — петли гистерезиса и эффект Бракгаузена. При этом каждый скачок Бракгаузена представляет собой элементарный акт необратимого процесса переключения, а петля гистерезиса — интегральную характеристику этого процесса. Поэтому естественно ожидать наличия связи эффекта Бракгаузена с динамикой доменной структуры и основными элементами петли гистерезиса» (Рудяк /1986, с. 80/). Изменению формы и размеров петель гистерезиса соответствуют как изменение общего числа скачков Бракгаузена, так и их распределение по полю.

В свете сказанного представляется, что перенос из физики в солитонную биологию богатых наработок по методам изучения и интерпретации скачков Бракгаузена может быть весьма полезным при анализе мышечной деятельности и других сходных физиологических процессов.

В работе мышц, как и других возбудимых биоструктур, многое определяется функционированием ионных насосов, в том числе кальциевых. Очень вероятно, что эти ионные биологические насосы во многих случаях построены на солитонных механизмах (биосолитоны могут активно переносить ионы) по аналогии с транспортными биосолитонами метаболического назначения в аксонах нейронов, рассматриваемыми в следующем параграфе.

7.4. Нейроны

Нервная ткань состоит из нервных клеток — нейронов. Эти клетки имеют тела с ядрами и отходящие от тел отростки, представляющие собой длинные нити цитоплазмы, длина которых может быть соизмерима, например, с длиной руки или ноги у человека. Один из таких отростков у нервной клетки, называемый аксоном, предназначен для передачи нервного импульса от тела клетки к месту назначения (аксон седалищного нерва жирафа имеет длину в несколько метров), а другие отростки, называемые дендритами и зачастую имеющие ветвящийся характер, — для передачи импульсов в противоположном направлении, т.е. к телу клетки. Большая часть поверхности нейрона покрыта прилегающими к нему глиальными, или шванновскими,

клетками, роль которых пока не выяснена (см., например, Волькенштейн /1978, с. 161/). Скопление тел и отростков нейронов образует нервные узлы — ганглии. В центральной нервной системе из тел нейронов образуется серое вещество мозга, а из их отростков (нервных волокон) — белое вещество мозга. Особенностью нейронов является то, что они никогда не делятся во взрослом организме, их образование заканчивается вскоре после рождения. Зачаток нервной системы у высокоорганизованных видов представляет собой пласт, который затем скручивается в трубку.

Сравнительно позднее в ходе биологической эволюции возникновение нервных клеток и нервной системы предполагает, что в них воспроизведены ранние основополагающие механизмы биологической самоорганизации, к которым добавлены какие-то более поздние структурно-функциональные усовершенствования, не мешающие нервным клеткам взаимодействовать со множеством других, более древних видов клеток, и являться частью единого развивающегося организма. В свете вышеизложенных данных о биосолитонной организации локомоторных и других древних физиологических систем естественно предполагать, что деятельность нервных клеток также использует биосолитонные механизмы. В настоящем параграфе нами излагаются первичные материалы в пользу этого.

Начнем с вопроса, встречаются ли у нейронов солитоноподобные одnogорбые волны деформации, движущиеся с сохранением формы и скорости без видимой диссипации энергии по ходу их следования? Оказывается, для нейронов они давно описаны. Речь идет о перистальтической деформации поверхности аксонов, обнаруженной и детально изучавшейся Weiss /1969, 1972/ и его последователями (см., например, обзор в сборнике под редакцией Франка /1971/). Это движение имеет вид одnogорбой волны вдавливания поверхности аксона, распространяющейся по поверхности аксона с сохранением формы и скорости, величина которой составляет примерно 1 мм/сутки. Данная волна способствует продвижению внутреннего содержимого аксона, но существует независимо от движения этого внутреннего содержимого: если последнее механическим образом задержать, то это никак не сказывается на самой поверхностной волне. Она также не зависима от неоднородностей русла аксона. Как подчеркивает в этой связи Weiss /1972, с. 1312/, «скорость

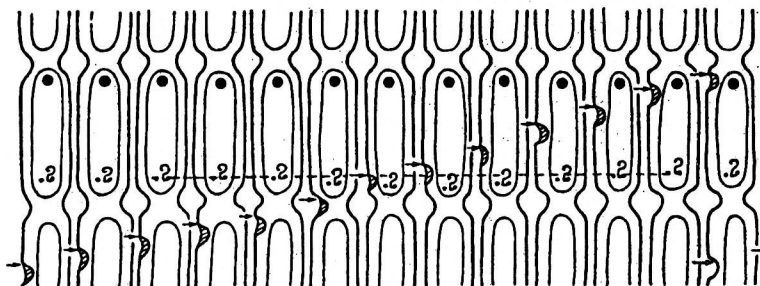


Рис. 7.4.1

Одногорбая волна локальной деформации, движущаяся по поверхности нейрона с постоянной скоростью и отмеченная на каждом кадре стрелкой (по Weiss /1972/). Представлена последовательность кинокадров, разделенных интервалом в 10 сек. Пояснения в тексте.

движения волны имела показательное постоянство (significant constancy)». Данная волна в виде отмеченного стрелкой заштрихованного и обращенного внутрь «горба» на поверхности аксона представлена на рис. 7.4.1 (Шунгская, Ененко /1977, с. 168/), схематично воспроизводящем последовательность кинокадров, снятых Weiss с помощью фазово-контрастного микроскопа (рекомендуем познакомиться с оригинальными кинокадрами в работе Weiss /1972/). На рисунке представлен каждый десятый кадр, т.е. временной интервал между соседними кадрами составляет 10 сек. Стрелка под рисунком показывает направление движения кадров. Такие одногорбые волны биосолиitonного типа образуют регулярную последовательность, следуя одна за другой с интервалом в 30 минут. Эти поверхностные перистальтические движения способствуют переносу синтезируемых в нейроне веществ вдоль волокна, т.е. имеют транспортно-метаболическое назначение.

Наряду с указанными аксональными токами, скорость которых примерно одинакова у самых различных видов организмов, известны также более быстрые аксональные токи со скоростями от 40 до 500 мм/сутки в зависимости от вида организма. Кроме того, описаны также обратные («ретроградные») аксональные токи. Токи, сходные с аксональными, присущи не только аксонам, но и дендритам. Аксональный, ретроградный и дендритный токи образуют общую систему оттока и притока веществ между нейроном и нервными окончаниями. Отметим, что внутренняя среда аксона имеет да-

леко не хаотичный, а регулярно структурированный вид, схематично представленный на рис. 7.4.2 (по Weiss /1969/).

При росте нейронов наблюдаются также локомоторные биосолитоны. Действительно, как известно, ростовые движения аксонов локализованы в движущейся зоне так называемого конуса роста на конце аксона, при этом тело нейрона и основная часть аксона остаются стационарными. Как указано в том же сборнике Франка /1977, с. 169–172/), «для удлинения аксона требуется система микротрубочек и микроотростков (microspikes), образующих в конусе роста ундулирующую мембрану — основную локомоторную органеллу, осуществляющую функцию вытягивания и удлинения аксона. Таким образом, при росте аксона ведущий конец конуса роста действует как ундулирующая мембрана... При локомоторной активности конуса роста именно перестройка мембран является важным ингредиентом при удлинении аксона нервной клетки. Этот же фактор играет существенную роль в подвижности культивируемых глиальных клеток и клеток сердца. Все мигрирующие клетки, в том числе глиальные и фибробласты, имеют ундулирующую мембрану, которая является основным тянущим механизмом при клеточных движениях».

Но во второй главе (рис. 2.1.5 и 2.4.6) нами уже рассматривались исследования Gray /1968/ и Ambrose /1961/ о локомоциях фибробластов с ундулирующими мембранами, по которым бегут характерные одnogорбые волны с сохранением формы и скорости без видимой диссипации энергии — биосолитоны. Поскольку аналогичные ундулирующие мембраны имеют место в ростовых движениях нейронов, то можно полагать, что здесь в нейронах также реализуются именно биосолитоны, а не что-то принципиально отличающееся.

Сходные движения зарегистрированы исследователями для глиальных клеток, покрывающих нейроны. «По сравнению с

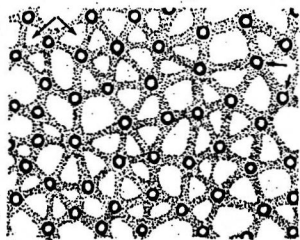


Рис. 7.4.2

Схематическое изображение регулярной решетчатой структуры аксона на его поперечном срезе, составленной из нейротрубочек и канальцев между ними (по Weiss /1969/)

нейронами глияльные клетки чрезвычайно подвижны, способны к амебоидному движению» /там же, с. 166/. Но амебоидные движения, как уже рассматривалось в главе 2 (в частности, на рис. 2.1.4), строятся на биосолитонах.

Также известно, что «в условиях культуры ткани нервные клетки и их отростки обладают в различной степени выраженным амебоидным движением»; при этом «в субкультурах нейроны могут мигрировать из эксплантата в среду даже при отсутствии в ней других типов клеток. Скорость перемещения нейрона, например, клеток Пуркинье, достигает 30–40 мк в сутки» (Шунгская, Вепринцев /1965/).

Итак, эти и другие примеры локомоторных и ростовых движений нервных клеток свидетельствуют о том, что они, подобно другим клеткам организма, используют биосолитоны. А что можно сказать о таком сравнительно позднем эволюционном приобретении живого вещества как скоростная передача информации по нервам? Участвуют ли в ней солитонные механизмы или эта часть деятельности организма, связанная со специальными процессами генерации и проведения электрических потенциалов, стоит особняком, не попадая в область солитонной биологии? Ведь нервное возбуждение проводится именно по поверхностной мембране отростков нейрона, поверхность которых способна проводить биосолитоны, как это уже рассмотрено в данном параграфе по работам Weiss. На сегодня данный вопрос является открытым (хотя ряд фактов говорит в пользу этого участия) и требует специальных исследований. Скажем к нему лишь следующее.

Исторически сложилось так, что из-за опережающего развития техники регистрации электрических характеристик понятие нервного импульса, начиная с середины XIX века (еще в 1850 г. Гельмгольц измерил скорость проведения электрического компонента этого импульса), оказалось связанным почти целиком с его относительно легко измеряемым электрическим компонентом. Последний, вероятно, является не единственным компонентом этого возбуждения. Соответственно, современные исследования нервного импульса сосредоточены на движении заряженных ионов через нервную мембрану с изменяющейся проницаемостью.

Вместе с тем, как отмечается в учебниках биофизики, «природа изменений проницаемости мембраны при возбуждении в настоящее время исследована слабо. Вопрос о природе изменений ионной проницаемости возбудимой мембраны при генериро-

вании потенциалов является одним из центральных в современной биофизике клетки. В настоящее время нет методов прямого наблюдения тех молекулярных перестроек, которые происходят в мембране при действии раздражителей. И всю информацию о механизмах изменения ионной проницаемости приходится извлекать из косвенных данных, полученных в опытах с воздействием на клетки различных физических и химических факторов» (Губанов, Утепбергенов /1978, с. 193/).

Большое значение исследователи отводят вероятному участию в нервном возбуждении конформационных изменений в нерве и окружающей среде (Волькенштейн /1978, с. 147, 206/). В статье Fergason и Brown /1968/ была выдвинута модель клетки с жидко-кристаллической мембраной (без каких-либо каркасов из микротрубочек и других характерных для клетки структур), по которой может распространяться механическая волна (см. главу 9 книги). По мысли этих авторов, такая механическая волна локальных деформаций способна вызывать перепад электропотенциалов на мембране и передавать информацию по нервным волокнам. В работе Wang /1985/ отмечена формальная аналогия между уравнением Ходжкина-Хаксли, моделирующим форму и скорость нервного импульса, и уравнением, полученном этим автором при дополнительных предположениях для случая известных в технике планарных ячеек нематического жидкого кристалла. В такой ячейке под действием специально ориентированного внешнего магнитного или электрического поля может образовываться и перемещаться доменная стенка. При этом Wang акцентирует внимание на то, что миелиновая оболочка нервных волокон по некоторым литературным данным имеет жидкокристаллический характер. Но по миелиновой оболочке нервное возбуждение не распространяется, многие нервы вообще не имеют такой оболочки, а сам нерв не является жидким кристаллом. Каких-либо других биологических данных, а также соображений о биологическом аналоге магнитного или электрического поля, управляющего поведением рассматриваемого жидкого кристалла в технической планарной ячейке, Wang не приводит. В серии экспериментальных исследований других авторов зарегистрированы структурные изменения, происходящие на мембране при изменении ее проводимости в месте прохождения нервного импульса: изменения рассеяния света, флуоресценции, двулучепреломления (см., например, обзор у Волькенштейна /1978, с. 204/).

По нашему мнению, полезной может быть солитонно-доменная модель распространения нервного импульса в виде локального доменообразовательного процесса, включающего образование и движение по нервному волокну (не жидко-кристаллическому) упругих доменов с солитонными доменными стенками. Простейший вариант движущейся зоны возбуждения включает набор «стенка-домен-стенка». Такая доменная модель способна объяснить целый ряд известных экспериментальных фактов. Например, первоначальное специфическое изменение проницаемости мембраны, позволяющее ионам натрия диффундировать снаружи внутрь нервной клетки и создавать электрический потенциал действия, может связываться с первым элементом названного доменного комплекса. А приходящее ему на смену, сдвинутое по времени другое изменение проницаемости мембраны, позволяющее ионам калия диффундировать в обратном направлении изнутри клетки наружу и восстанавливать потенциал покоя, может объясняться действием заключительной части движущегося по нерву доменного комплекса. При этом движущаяся солитонная доменная стенка, как место концентрации деформаций и энергии, может способствовать перестройке мембраны в тот или иной режим проницаемости, а также может вызывать пьезоэлектрические биоэффекты. В рамках такой модели соответствующую интерпретацию получают многие другие явления, например:

1. явление пороговости раздражения (доменообразование возможно только при достижении определенного уровня напряженности в среде);
2. рефрактерность нерва (пока по участку нерва не пройдет весь доменный комплекс, данный участок абсолютно или относительно не возбуждим);
3. зависимость скорости проведения возбуждения от электрического сопротивления окружающей среды и цитоплазмы (перестройка или смещение всего доменного комплекса на очередной участок нерва может существенно зависеть от условий среды).

Предполагается, что в миелинизированных нервных волокнах это доменообразование совершается скачкообразным образом от одного перехвата Ранвье к другому. И сама миелинизация возникла в эволюции как способ ускоренного продвижения процесса локальной доменизации по нерву.

Следует также отметить принципиальную возможность передачи по нерву информации в иной, неэлектрической форме, на-

пример, в виде волн, наблюдаемых в фазово-контрастный микроскоп и не сопровождающихся выраженными перепадами электрических потенциалов. Действительно, как известно, по свойствам возбудимости нервные и мышечные клетки весьма сходны. Но в мышечных клетках сравнительно недавно открыты неизвестные ранее волны солитонного типа, рассмотренные нами выше в параграфе о мышцах по работе Coleman и др. /1972/. В данной работе отмечается, что эти устойчивые волны проходят по мышечному волокну без их сопровождения в виде потенциала действия и никак не влияют на трансмембранный электрический потенциал волокна. Не исключено, что биосолитоны подобного типа, способные переносить информацию без затрагивания трансмембранных электрических потенциалов, будут обнаружены также для нервной клетки.

7.5. Координация движений и вопросы психофизики

Уже давно различными исследователями выдвигались идеи о важном значении моторных движений тела и его кинематической организации в генезисе пространственных представлений у индивидуума. В частности, эти идеи разрабатывались Гельмгольцем и Сеченовым. Они же положены Пуанкаре в фундамент его учения о происхождении у индивидуума пространственных представлений. В настоящем параграфе эти воззрения вспоминаются в связи с концепцией биосолитонов и дополнительными солитонно-доменными моделями организации моторных движений, а также психофизиологическими надстройками над этими движениями.

По мнению Пуанкаре, движения нашего тела играют первенствующую роль в генезисе понятия пространства. Для существа вполне неподвижного не было бы ни пространства, ни геометрии (Пуанкаре /1906, с. 57/). «Локализовать предмет, — писал он, — значит просто представить себе те движения, которые нужно было бы сделать, чтобы достигнуть его», т.е. представить себе «те мускульные ощущения, которыми сопровождаются эти движения и которые не предполагают предсуществование понятия пространства» /там же, с. 58/. «Если бы у нас не было орудия для измерения, мы совершенно не могли бы построить пространство; но орудие у нас есть, и к нему мы относим все и пользуемся им инстинктивно; это наше собственное тело» (Пуанкаре

/1923, с. 80/). При этом особенности всего аппарата кинематической деятельности организма приведены эволюционным развитием жизни в соответствие с реалиями окружающего физического мира. Благодаря этому каждый новорожденный организм овладевает адекватными пространственными представлениями не только за счет персонального контакта в ходе онтогенеза с предметами окружающего мира, но и за счет благоприобретений предыдущих поколений, закрепленных в ходе филогенеза в аппарате движений тела /там же, с. 82–92/.

Знанием о положении и движении звеньев тела организм человека обеспечивают так называемые механизмы кинестезии. Эти механизмы оказываются тесно связанными с расчленяющими границами между звеньями (доменами) кинематической схемы тела (в которой нами обнаружены конформно-симметричные закономерности (Петухов /1981/). Пуанкаре умозрительно полагал, что представления о положении и движении звеньев тела покоятся на мышечном чувстве. А вот что утверждает современный справочник по физиологии: «В отношении кинестетических ощущений в последние годы был достигнут существенный прогресс. Прежде всего, теперь очевидно, что чувство позиции и движений суставов зависит только от соответствующих рецепторов в самих суставах. Нет никакой необходимости призывать таинственное «мышечное» чувство для объяснения кинестетических ощущений» (Rose, Mountcastle /1959, с. 426/). Это свидетельствует в пользу того, что биосолитонные доменные стенки, расположенные в суставах как зонах разграничения звеньев кинематической схемы тела, являются источниками основной кинестетической информации и играют определяющую роль в кинестетическом чувстве.

Другое дополнение современная физиология вносит в учение Пуанкаре о взаимосвязи тела и пространственных представлений, утверждая априорность представлений индивидуума о своем теле. Данное утверждение связано с изучением так называемых фантомных ощущений у инвалидов: специфического чувства присутствия реально утраченной части тела. Сравнительно недавно установлено, что фантомные ощущения имеют место не только у людей с ампутированными конечностями, но и у людей с врожденным отсутствием конечностей (ссылки на литературу см. в книге Петухова /1981, с. 80/). Значит, представление индивидуума о схеме своего тела вовсе не обусловлено его жизненным опытом, а носит врожденный характер.

Пуанкаре мог строить эти представления о движениях тела и их связи с пространственным восприятием лишь очень умозрительно. У нас уже несколько лучшее положение: мы имеем фактические данные и концепцию о биосолитонах и биодоменах, которые участвуют в морфо-функциональной организации движений тела.

Для рассмотрения задач о построении организмом координированных движений, их устойчивости при ростовых изменениях пропорций тела, формировании наследственных представлений о схеме тела, а также о приобретении организмом новых пространственных представлений об окружающем мире перспективна уже отмечавшаяся в книге модель организма как ансамбля супердоменов с солитонными доменными стенками. Обратимся к ее простейшему варианту, который отвлекается от многоуровневости биодоменов, а рассматривает просто некоторую двумерную среду с множеством доменов, регулируемых некоторым физическим полем, например, полем механических напряжений у упругих доменов или полем намагничивания у ферромагнетиков. Этот вариант уже обсуждался в предыдущих главах, в частности в параграфе 5.1 о биологическом росте в связи с наиболее изученным в технике видом доменообразующих структур — пленками или пластинами ферритмагнетиков (магнитные домены, как отмечалось, очень сходны с упругими доменами). Данная модель оказалась полезной для вопросов объемного биологического роста, предоставляя модельное объяснение того, как изменения размера и расположения множества одновременно растущих внутренних зон тела может происходить взаимосогласованно: причиной этого выступает диктат интегрального критерия энергетической минимизации, которому подчинено все множество доменов. Продолжим обсуждение данной модели организма, известной в роли «ростовой», в связи с новым классом задач о моторных движениях тела, то есть уже в качестве «модели моторных движений и связанных с этим явлений».

Обратимся вновь к феррит-гранатовой пленке, предполагая ее достаточно протяженной для образования на ней модельного множества большого числа доменов. Регулируя поле подмагничивания на участке этой пленки, можно управлять образованием на общем фоне исходной картины неупорядоченных лабиринтообразных доменов на пленке нового зонального объекта — ансамбля цилиндрических магнитных доменов (ЦМД). При этом такому управлению одновременно доступны следующие характе-

ристики возникающего ансамбля ЦМД: его общая конфигурация, его величина и движение по пластине, размеры и перемещения отдельных ЦМД и пр. В принципе, регулирующим полем можно образовать объединение некоторого подмножества ЦМД в группу, имеющую конфигурацию, например, руки с ложкой, а другая группа ЦМД на той же пластинке может при этом имитировать форму тарелки. Изменяя параметры регулирующего поля, можно вызвать движение этой «руки с ложкой» к «тарелке». Или воспроизвести на той же пленке сходным образом полидоменную «руку с молотком», забивающую полидоменный «гвоздь». Конечно, аналогично может быть воспроизведена также вся фигура человека в движении и работе с различными предметами. Уточним, что говоря о полидоменных фигурах, моделирующих биологические формы и их движения, мы будем считать, что каждую такую фигуру образуют не два-три ЦМД, а большое их число, подобно тому, как в организме предполагается огромное множество взаимосогласованных биодоменов (в рассматриваемом случае мы уже достаточно упростили модельную ситуацию, абстрагировавшись от многоуровневости биологических супердоменов и обратившись только к одноуровневым доменам).

Эта простейшая полидоменная модель интересна далеко не только возможным сходством внешних очертаний и движений образуемых фигур с реальными прототипами. Важно то, что все множество задействованных в ней доменов работает взаимосогласованно, как одно целое, управляемое обычным для доменообразования единым критерием энергетической минимизации у возбужденной системы. Данный принцип согласования частей и их поведения по единому энергетическому критерию представляется имеющим прямое отношение к проблеме координации многих участников единого движения у любого организма, независимо от его положения на эволюционной лестнице. Этот принцип работает независимо от конкретного вида доменов: вместо ЦМД организм использует другие домены, прежде всего, упругие домены. Наглядность многоблочного строения тел живых организмов облегчает исследование вопроса о доменах в них. Многоуровневость биологических доменов (супердоменность), конечно, вносит множество дополнительных возможностей для эффективного использования данного принципа в интересах живого, в том числе, для построения его координированных движений и связанных с ними пространственных представлений.

Рассматриваемая модель воспроизводит также известную в биомеханике особенность биологических моторных движений: движение, будучи по итоговому результату весьма точным, оказывается состоящим из относительно неточных, то есть варьирующих от раза к разу, двигательных компонентов. Например, человек, забивающий гвоздь, точно от раза к разу бьет молотком по шляпке гвоздя, но при этом, например, траектории движений его локтя, плеча, запястья и пр. могут весьма варьировать.

На полидоменной пленке при моделировании моторных биологических движений, например, «руки, забивающей молотком гвоздь» реализуется сходная ситуация. В силу локальных причин, например, из-за обычных для доменообразования явлений гистерезисного характера (состояние пленки может не полностью восстановиться после предыдущего действия регулирующего поля) при очередном приложении того же самого регулирующего поля с целью повторной имитации прежнего движения «руки и молотка» отдельные ЦМД в ходе общей доменоперестройки могут двигаться по относительно измененным траекториям и занимать измененные конечные позиции. Но итоговая картина большого множества ЦМД будет при этом в целом соответствовать характеру регулирующего поля и от раза к разу с относительно высокой точностью воспроизводить «удар молотка по гвоздю».

Итак, координированные движения звеньев тела, например, человека можно сопоставить с перестройками ансамбля доменов и сети солитонных доменных стенок. Данная модель позволяет также рассматривать инвариантность навыков движений, приобретенных в детстве, при ростовых нелинейных трансформациях тела с возрастом. В рамках солитонно-доменного подхода могут рассматриваться многие смежные вопросы: об устойчивости стереотипов движений (устойчивая индивидуальность почерка у человека и пр.); вписывании привычных рабочих инструментов в схему тела (например, теннисной ракетки у теннисиста); о восприятии и распознавании пространственных образов; об особенностях пространств восприятия и т.п. Некоторые дополнительные материалы к данным вопросам имеются в наших предыдущих публикациях (Петухов /1981, 1988/, Petukhov /1989/).

В них, в частности, изложено понятие морфопозы как некоторой исходной и врожденной конфигурации тела организма. Она выступает в роли отсчетной системы, относительно которой выстраиваются координированные моторные движения и форми-

руется система мышечных приводов, нарабатываются двигательные рефлексы, взаимосогласовывается деятельность анализаторов и пр. Отмечается внезапное и скачкообразное возникновение в эволюции принципиально нового — неокинетического — аппарата движения тела человека и высших животных, отличающегося наличием поперечно-полосатых мышц, суставчатым кинематическим скелетом и новой проприоцептивной системой. При этом, как указывал Бернштейн /1966, с. 79/, строение мышечных массивов и их членений имеет по большей части «чисто морфологическое основание», а не выводится из особенностей биодинамики конкретного тела.

При рассмотрении работы неокинетического и более древних аппаратов движения, по нашему мнению, перспективно применение понятия бризера как пульсирующего солитонного объекта для моделирования, например, локомоторных явлений — ходьбы, бега и т.п. — с периодической сменой позиций конечностей тела. Кроме того, в качестве бризерных феноменов может трактоваться ряд явлений вхождения организма в автоматический энергоэкономичный режим деятельности ритмического характера, например, обретения бегуном второго дыхания, при котором он, «не чувствуя усталости», совершает с особой четкостью и автоматизмом попеременную смену положений двух половин бегущего тела. Нельзя не отметить, что многие физиологи — Ухтомский, Введенский, и др. — полагали, что для раскрытия секретов физиологической активности необходимо применять теорию нелинейных колебаний (обзор этого дан в работе Охнянской и др. /1990/).

Передаваемые по наследству специфические биологические движения уже давно связываются многими исследователями не только с генезисом пространственных представлений у организмов, но и с врожденными инстинктами, например, строительства животными организмами гнезд и других жилищ, плетения паутины и т.п., а также с психофизической и интеллектуальной деятельностью вообще. Последние рассматриваются не как нечто оторванное от специфики биологических движений и морфогенетических процессов живого, а как их структурное продолжение на новом уровне реализации базовых потенциалов живой материи. Иными словами, все создаваемое организмом вне его тела, а также все его ощущения и представления являются — по крайней мере, в момент их сотворения — как бы частью единого организ-

ма с его формообразовательной спецификой (охвачены «кооперативной индивидуальностью»). Примером может являться работа «Организм как творчество» Шульца /1916/ с богатым обзорным материалом. Она рассматривает многочисленные аналогии между морфогенезом и биологическими движениями, с одной стороны, и психофизикой, художественным творчеством и инстинктами (строительными и пр.), с другой. Так, в психофизике известен закон Вебера-Фехнера, считающийся основным законом ощущений и имеющий математическое выражение: отношение различаемой величины прироста раздражения к величине раздражения есть величина постоянная. Но этот же «закон применим для хемотропических, гелиотропических и геотропических движений бактерий и грибов и антерозоидов папоротников, мхов и явнотропических... Закон Вебера-Фехнера, следовательно, — не закон нервной системы и центров, но закон протоплазмы вообще и ее способности отвечать на раздражения» /там же, с. 126/.

Поскольку движения организмов связаны с биосолитонами, то и производимое автоматизированными движениями человека может нести черты солитонных конструкций. Это дает целый ряд новых подходов, например, к вопросу о природе и специфике когда-то родившихся и утвердившихся символов цифр и букв. Известно, что многие цифры и буквы морфогенетически реализуются в красочных узорах на крыльях бабочек. Ближайшее рассмотрение этих символов, показывает, что цифры и буквы, зачастую состоящие, например, из симметричных частей (как цифра 8) или имеющие симметричных двойников (как цифры 6 и 9), допускают выдвигаемую нами версию их происхождения в связи с солитонными доменными стенками и полидоменными конструкциями. По нашему мнению, распознавание образов организмами также строится на солитонно-доменной основе.

Лишь кратко отметим, что в области психофизики восприятия давно ведутся работы по выявлению геометрических особенностей пространств восприятия (см. обзор у Петухова /1981, с. 80–85, 124–135/). Так, работы ряда авторов, прежде всего, Kienle /1964/, Luneburg /1948/, Schelling /1964/ перекидывают мостик между геометрией пространств восприятия и геометрией Лобачевского с элементами специальной теории относительности. Например, согласно обстоятельным экспериментальным исследованиям Kienle /1964/ с участием двухсот испытуемых пространство зрительного восприятия характеризу-

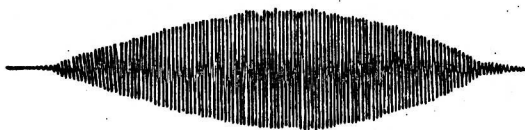


Рис. 7.5.1

Коммуникационный акустический одиночный сигнал сверчка (по Попову /1985/).

ется геометрией Лобачевского. Это представляется дополнительно интересным в связи с релятивистской инвариантностью солитонного СГ-уравнения, которое через подобные работы может оказаться связанным с феноменами психофизической структуризации. При этом будет получено еще одно подтверждение, что зрительное и другие виды восприятия по своим особенностям структуризации являются не чем-то оторванным от базовых механизмов структуризации тела и движений организмов, а их продолжением.

Представление о развитии интеллектуальных функций как надстройке над механизмами построения движений разделяется многими авторами и освещено, например, в сборнике Велихова и Чернавского /1987/.

Говоря о восприятии, коснемся вопроса о коммуникации между организмами, который еще только подлежит внимательному изучению с биосолитонной точки зрения. На рис. 7.5.1 из книги Попова /1985/ изображен звуковой коммуникационный сигнал, издаваемый сверчком. Аппараты звукоизлучения насекомых представляют собой устройства, преобразующие энергию сокращения мышц в акустическую энергию. Данный акустический сигнал представляет собой волновой пакет и состоит из высокочастотной составляющей с частотой около 4,7 кГц и амплитудой, модулированной плавной огибающей линией. Для его генерации у сверчка имеется сложная биомеханическая система, включающая напильничек, кантик для трения по напильничку и др. Каждая волна пульса возникает при прохождении кантика через одно ребрышко напильничка. «Период повторения волн поразительно стабилен, несмотря на то, что расстояние между ребрышками уменьшается к концам напильничка» (Попов /1985, с. 30/). Высокая добротность резонирующей части («арфы») этого механизма приводит к тому, что «элитры» молчащего самца начинают колебаться при призывном пении дру-

гого самца, находящегося на расстоянии до 1,5 м. Эти колебания, как подчеркивает Попов, могут восприниматься проприоцепторами в основании крыльев, и, таким образом, по крайней мере теоретически, самцы могут обнаруживать друг друга на расстоянии без помощи основных слуховых органов.

В современной теории солитонов большое внимание уделяется так называемым «солитонам огибающей» (см., например, сборник «Солитоны в действии» под редакцией Лонгрена и Скотта /1981/). Солитоны огибающей представляют собой локализованные волновые пакеты со стационарно движущейся огибающей, которые обнаруживают частицеподобное поведение при взаимодействии (Островский /1984/). Интересно, что конфигурация солитонов огибающих зачастую имеет тот же тип, что конфигурация коммуникационного сигнала на рис. 7.5.1. Этот коммуникационный акустический сигнал, генерируемый сверчком с помощью столь специального биомеханического аппарата, попадая на приемную среду другого сверчка (например, на проприоцепторы в основании крыльев, названные Поповым), может по своему типу выступать в роли имитатора солитона огибающей. Другими словами, коммуникационный сигнал в этом случае оканчивается как бы приуроченным к солитонным свойствам принимающей биологической среды, а сверчок, передающий сигнал, наследственным образом обучен разговаривать с принимающей биосолитонной средой на ее солитонном языке.

В заключение параграфа коснемся еще одной темы. Как уже не раз отмечалось по ходу книги, образование солитонных доменных стенок и их движение происходят в результате процесса релаксации возникшего в системе напряжения и направлены на энергетическую минимизацию возбуждения в системе. Памятуя о единой природе биологических механизмов структуризации на самых разных уровнях живого, можно с позиций солитонной биологии заметить некоторую аналогию между данными особенностями солитонных доменных стенок и известными психофизиологическими технологиями борьбы с психологическим стрессом у людей. Такой стресс, возникающий у человека при самых разных экстремальных ситуациях, можно рассматривать как возбуждение организма, требующее релаксации.

Эффективная и запатентованная технология саморегуляции для борьбы со стрессом под названием «Ключ» создана Алиевым /1996/ и принята к применению в силовых ведомствах

России и множестве других организаций. Она строится на самостоятельном поиске и выполнении человеком, находящимся в стрессовом состоянии, специальных (идеомоторных) движений. Эти движения подбираются им под некоторый умоглядный образ и отличаются автоматическим, самопроизвольным характером их осуществления и минимумом энергетических мышечных затрат. С позиций солитонной биологии можно обоснованно полагать, что данная эффективная технология Алиева использует поиск человеком таких самопроизвольных движений биосолитонных доменных стенок в его организме, которые ведут к искомой релаксации напряжения в его возбужденном организме.

Технология саморегуляции, основанная на вызове этих спонтанных релаксирующих движений, используется не только для снятия вдруг возникших стрессовых состояний. Она оказывается полезной для лечения многих застарелых заболеваний, образовавшихся предположительно в силу неспособности организма на соответствующем этапе его жизни нормальным образом отрелаксировать возникшее состояние энергетического возбуждения, что и привело к аномалии. Опыт применения этой технологии Алиева свидетельствует в пользу того, что многие болезни имеют природу энергетических зажимов, связанных с аномальным распределением физической энергии в сети биосолитонных доменных стенок организма. С этими же энергетическими причинами зачастую связано понижение способностей у человека, что может интерпретироваться как вариант его нездорового состояния. Овладение данной технологией саморегуляции позволяет человеку снимать эти энергетические зажимы и нормализовывать свое энергетическое состояние, а через это возвращать себе здоровье и таланты.

Глава 8 БИОСОЛИТОНЫ В ОТДЕЛЬНЫХ МОДЕЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ

В этой краткой главе представлены материалы, которые по тем или иным причинам не вошли в другие части книги.

8.1. Об основах моделирования локомоций

Изучение локомоций и попытки моделирования различных их видов предпринимались с давних времен как в связи с любознательностью естествоиспытателей, так и для нужд техники, изыскивающей в патентах живой природы эффективные решения. Исторические материалы на эту тему имеются в книгах Александра /1970/, Кокшайского /1974/, Шулейкина /1968/ и др. Особенно богатые материалы обзорного и оригинального характера содержатся в классической монографии Грау /1968/, в которой рассмотрены как особенности локомоторных волн у множества видов организмов, включая их эстафетный характер и простейшие расчетные формулы, так и описание моделей «отталкивания» организмов от внешней среды — земли, воды, воздуха. В отличие от многих авторов Грау подчеркивал значительную общность внутренних волновых механизмов локомоций у разных биологических видов.

Зачастую исследователи изучали локомоции отдельных видов организмов, например, плавание рыб, не обращая внимание на черты общности локомоций у самых разных видов. Так, Шулейкин /1968, с. 893/ начинает изложение своего специализированного исследования о локомоции рыб словами: «Из всех представителей животного мира рыбы и водяные змеи являются наиболее интересными для исследователя внешней и внутренней механики движения. Лишь их движения, вызываемые деформациями всего тела, могут быть полностью освещены математическим анализом и описаны с количественной стороны».

Природа локомоторной волны (во многих случаях называемая метахрональной, то есть идущей с задержкой от элемента к элементу тела) рассматривалась обычно на уровне представлений о некотором эстафетном процессе, идущем с постоянной затратой энергии на его поддержание.

Имитация кинематики локомоторных волн за счет постоянного действия внешней управляющей силы. Очевидно, что кинематика (конфигурация и ее перемещение) самых разных видов волн — солитонных и несолитонных — может быть имитирована многими способами на упругих моделях, подвергаемых действию управляющей внешней силы (с постоянной затратой энергии). Например, если надавливать твердым валиком на поверхность упругой полосы, то эта волна будет под валиком деформи-

роваться. А если валик еще и движется вдоль полосы, то вызываемая им деформация также будет двигаться вместе с ним вдоль упругой полосы. Очевидно, что форма этой деформации и характер ее движения по полосе (в том числе постоянство или непостоянство скорости данного движения) будут зависеть от формы давящего валика и характера его движения. Подбирая форму и специфику движения валика или целой группы валиков, то есть подбирая характер внешней силы и условия непрерывных энергетических затрат, можно воспроизвести кинематику как солитонной волны (с ее одnogорбой формой и постоянством скорости), так и множества других волн. Эта управляющая внешняя сила может быть сосредоточенной или распределенной и двигаться по заранее запрограммированному закону. Такие волны деформации, вызываемые постоянным действием внешней силы, условно назовем «ведомыми» волновыми деформациями.

В физике и технике известно много других способов вызова подобных ведомых волновых деформаций. Например, поверхность магнитной жидкости может деформироваться под действием поднесенного магнита, а сама так возникшая деформация может бежать за движущимся магнитом. Такие ведомые волны деформации в связи с их способностью к массопереносу и другим особенностям составляют целую ветвь техники, в которой на их основе создаются волновые шаговые механизмы на гибких связях, волновые электродвигатели и многое другое.

Эти ведомые волны могут с равным успехом создаваться в линейных и нелинейных средах, в том числе в газообразных, в которых солитоны, как известно, не существуют, причем скорость ведомых волн, вообще говоря, не зависит от их формы или амплитуды. Многие сведения о ведомых волнах, в том числе перечисленные, можно найти в книге автора целого цикла исследований по ним Добролюбова /1989, с. 31, 66/. Очевидно, что такими ведомыми волнами, послушными внешнему управлению, можно моделировать кинематику весьма разных природных процессов — от локомоций гусениц и червей до твердых приливных волн в земной коре, обусловленных взаимным притяжением земли с луной и солнцем. На это указывает Добролюбов, разрабатывая общую тему полезности эстафетного — передаваемого от звена к звену — типа движения. В частности, он отмечает /1989, с. 43/, что «таким дискретно-волновым способом («по частям») передвигаются, например, гусеница, дождевой червь, улитка,

змея». Здесь Добролюбов, по существу, повторяет сходные утверждения многих классиков в области биомеханики локомоций, прежде всего, Gray /1968/ и Lissmann /1945/, работы которых представлены нами в главе 2 и которые подробно описывали, в том числе с применением математических формул, эстафетный характер локомоций червей, многоножек и других организмов, движущихся с участием метакрональной волны. Поясняя особенности подобной имитации локомоторных и других волн, Добролюбов заканчивает свою книгу описанием десяти созданных им демонстрационных приборов, в каждом из которых обязательным элементом является внешняя сила, управляющая движением ведомой волны и создаваемая то давящим роликом, то магнитом, то рукой оператора и пр.

Необходимо подчеркнуть, что эти ведомые волны, даже если конструктор придаст им внешнюю конфигурацию солитонов, вовсе не являются солитонами, поскольку в них отсутствуют важнейшие черты солитонов: автолокализуемость; самоорганизация определенной формы и амплитуды в зависимости от скорости; образование волны не за счет действия внешней управляющей силы, а за счет особых нелинейных свойств среды; способность после начала движения двигаться без подпитки энергией и без диссипации энергии (в идеальном случае).

О биосолитонном модельном подходе. Биосолитонная волна после своего создания может двигаться без подпитки энергией, осуществляя массоперенос тела. Рассмотрим подробнее, как может осуществляться такой массоперенос при нахождении источника энергии внутри движущегося тела.

Согласно закону сохранения количества движения у замкнутой, не испытывающей внешних воздействий системы ее отдельные части могут изменять свои количества движения (могут двигаться относительно друг друга), но общее количество движения системы должно оставаться неизменным. В частности, ее центр масс должен оставаться неподвижным, если он был неподвижен изначально. Примером такой системы является сжатая пружинка, лежащая на очень скользкой поверхности. Если внезапно снять ее запор и позволить пружинке разжаться, то ее концы придут в движение, но центр тяжести останется на месте. В данной ситуации внутренняя энергия пружинки не способна вызвать движение ее центра тяжести. Совсем иная картина наблюдается, если та же самая сжатая пружина

жинка одним торцом исходно упирается в вертикальную опорную стенку и может при распрямлении взаимодействовать с внешней средой за счет опоры о стенку. В этом случае при снятии запора и распрямлении пружинки ее центр масс придет в движение в сторону от стенки, пружинка «выстрелит» себя в направлении ее свободного торца. Опорная стенка играет роль гасителя движений одного направления.

Аналогичная ситуация имеет место при создании локомоторных биосолитонов внутри организма. Локомоции строятся на реактивном принципе движения за счет расхода внутренней энергии. В наиболее явном виде это наблюдается у кальмара, который движется за счет выбрасывания реактивной струи воды, исходно находившейся в нем в неподвижном состоянии. Другие организмы, не выбрасывая наружу никаких масс из исходного состава своего тела, обеспечивают специальное, откатно-гасящее взаимодействие с окружающей средой, которое позволяет — как в рассмотренном случае пружинки — погасить откатное движение и обеспечить движение центра масс организма при внутренней генерации локомоторных биосолитонов. Например, у дождевого червя этот механизм гашения (торможения) откатного движения обеспечивается специальными щетинками, упирающимися в субстрат и не позволяющими частям его тела двигаться назад относительно опоры при пробегании локомоторных биосолитонов по телу. У рыб откатное гашение обеспечивается их «опорой» о воду в ходе ундуляций их тела, и т.д. В зависимости от вида организма и типа внешней среды — земли, воды, воздуха — механизмы откатного гашения могут быть различными, их развитие входит важным компонентом эволюционного развития каждого вида организмов.

Отметим, что генерация биосолитонов в теле может носить точечный характер, то есть достаточно в точечной зоне перевести химическую энергию АТФ в физическую энергию локомоторного биосолитона, и далее этот биосолитон будет сам устойчиво двигаться от зоны к зоне. Это согласуется с точечным, локальным характером иннервации скелета человека и двигательного аппарата животных, у которых нервная система может запускать локомоторные биосолитоны или при необходимости вшиваться в их ход.

По нашему мнению, уникальные свойства солитонов еще во многом только ждут своего широкого воплощения в мире машин, и это воплощение будет развиваться быстро.

8.2. Медицина и биосолитоны

Значительные перспективы видятся по приложениям концепции биосолитонов и солитонно-энергетического подхода в области медицины. Понятие солитона может быть использовано для улучшенного понимания возникновения болезней у человека и других живых организмов, а также для развития методов и средств их диагностики и лечения. Вирусы и другие болезнетворные агенты могут вселять в организм паразитные, то есть не унаследованные от предков биосолитоны и их колонии, вызывая нарушения нормальной жизнедеятельности собственных биосолитонных колоний организма, что и проявляется в виде определенных болезней. Диагностика заболеваний по сердечно-сосудистому пульсу, практикуемая в восточной медицине, ассоциируется с пульсационными свойствами и интегрально-физиологической функцией ансамблей солитонов. Многие болезни проявляются как явные нарушения в биосолитонной организации движений, например, болезнь Паркинсона с ее тремором частей тела.

В солитонной медицине могут использоваться знания из других областей приложения теории солитонов. Так, в кристаллографическом учении о солитонных дислокациях Френкеля-Конторовой известно, что подведение дополнительной тепловой энергии к кристаллам составляет основу способа устранения дислокаций. Это ассоциируется со свойством высших организмов реагировать повышением температуры тела на различные заболевания — от простуды до ран и вирусных инфекций и пр. Методы искусственного разогрева тела части являются одними из основных в физиотерапии и находят все новые применения, например, при борьбе с раком, привязанностью к наркотикам, токсикозными заболеваниями и пр. Аналогии между последствиями от разогрева тел для солитонных колоний в кристаллографии и биологии могут помочь усовершенствовать методики термической физиотерапии.

Иные многообразные виды физиотерапии — электротерапия, магнитотерапия и т.п., а также медикаментозные, акупунктурные (использующие акупунктурные меридианы тела и акупунктурные биосолитоны) и даже психотерапевтические способы лечения, вероятно, имеют ту общую основу, что позволяют разрушить или ослабить названные колонии паразитных биосо-

литонов, вселившихся в организм. Конечно, известны и медицинские методы, заодно лишаящие организм части его унаследованных биосолиитонов, например, хирургическое удаление тканей типа ампутации ноги.

При злокачественных заболеваниях клетки опухолей существенно меняют характер своих биосолиитонных движений и взаимодействий с соседними клетками. Здесь намечается ряд новых солитонно-энергетических подходов к диагностике и лечению онкологических заболеваний.

Учет солитонно-когерентных свойств организма позволяет по-новому подходить ко многим необычным биологическим явлениям. Например, способность человека при соответствующей психологической подготовке ходить босиком по раскаленным углям может находить свое объяснение через существование у человека когерентных форм реагирования, обеспечивающих быстрый отвод тепловой энергии из телесных зон контакта с огнем за счет ее превращения в солитонную энергию и когерентного удаления последней. При этом живая ткань не страдает потому, что остается холодной.

8.3. Энергетический подход к любви, красоте и искусству

Начало этого раздела по существу дано в параграфе 6.5 о кооперативных формах поведения у живой материи. Продолжим начатый там разговор.

Известно направление «объективной эстетики», изучающей объективные основания чувства красоты и гармонии. «По объективной эстетике существует достаточно обширная литература... С объективной эстетикой связан ряд имен, включая первоклассные, назову: Пифагор (учение о гармонии), Фехнер (закон Вебера-Фехнера), основатель экспериментальной психологии, минералог Виктор Гольдшмидт (приложил ряды Фурье к истолкованию мелодии)» (Любищев /1982, с. 237/). Сюда же можно отнести множество художников и мыслителей прошлого, пытавшихся познать унифицирующий принцип пропорционирования человеческого тела или «канон», познав который можно раскрыть тайну прекрасного тела (обзор см. у Петухова /1981, с. 51–56/). Синергетике в искусстве посвящена книга Евина /1993/.

Чувство красоты и гармонии заложено в самом человеке. Построить работающую теорию или концепцию красоты далеко не просто. Один и тот же предмет искусства одним зрителем признается прекрасным, другим — отвратительным, а третьего оставляет равнодушным. Видимо, построению работающей теории красоты должно предшествовать создание общей концепции чувств или эмоций у человека, учитывающей способность организма к кооперативным формам поведения. Кстати, давно известны взгляды о том, что присущие человеку чувства, в том числе красоты, имеют общебиологическую природу и их аналоги представлены у самых разных организмов, в том числе самых примитивных. Например, Шульц /1916, с. 186/, рассматривая вопросы искусства и творчества в свете общебиологических свойств живого, выражает эту точку зрения крайним образом: «Я убежден, что чувство любви, ненависти, материнское чувство, боязнь, боль, память, ощущение, ассоциация, воля, присущи всякой живой протоплазме».

Концепция биосолитонов предоставляет важный свод материалов об общебиологической способности живого вещества к солитонно-кооперативным формам поведения, то есть к способности множества компонентов живого тела себя «как одна частица», как одно целое. При этом явления кооперативного поведения предстают связанными с физическими причинами — энергетическими характеристиками возбуждаемой системы организма и положением «энергия объединения компонентов в единое целое меньше суммы энергий компонентов по отдельности». На этой основе в параграфе 6.5 нами определено вспомогательное понятие коллективной индивидуальности, которое позволило там же рассмотреть ряд вопросов о чувствах и способностях в связи с явлениями кооперативного поведения в живом не только телесного, но и духовного характера.

Человеку, например, знакомо чувство любви к другому человеку, при котором он уже не мыслит себя без любимого, теряет в этом чувстве любви ощущение себя как отдельного целого и обретает взамен ощущение единства с любимым человеком (т.е. кооперативную индивидуальность нового, более высокого уровня). С энергетической точки зрения это стремление человека к любви как ощущению кооперативной индивидуальности более высокого уровня означает стремление к более устойчивому, стабильному состоянию с меньшим уровнем энергии организма как возбужденной системы. Данное стремление считается особенно

выраженным у женщин, многие из которых не только тонко чувствуют отсутствие или присутствие любви, но и заявляют, что «не могут жить без любви». Религии всего мира, призывая любить все сущее на свете, оказывается заботятся о переходе организма верующего в более стабильное по энергетике состояние через обретение им с помощью чувства любви более высоких «кооперативных индивидуальностей».

Антиподом чувства любви является неприязнь. Она отражает нежелание человека обретать кооперативную индивидуальность с неприятным ему человеком, выражаемое общепринятыми в этом случае словами: «я не хочу иметь с ним ничего общего». Неприятному человеку не хочется уделять никакого внимания. Кстати, само внимание (на овладении которым строится гипноз, при котором гипнотизер получает возможность управлять организмом загипнотизированного) можно интерпретировать как переход организма или каких-то его систем к коллективной индивидуальности с тем, что охвачено в данный момент вниманием.

Для человека значения слов «любимый» и «красивый» обычно очень близки. Так, в красивого человека легко влюбиться, а любимый человек неожиданно становится в глазах любящего необыкновенно красивым. Выражения «для меня нет прекрасней моего любимого» или «ее красота породила его любовь» общепотребительны. Поэтому подойдем к пониманию красоты так же, как сделали это только что в отношении понимания любви.

Если человек хочет и может создать кооперативную индивидуальность с произведением искусства, то это произведение следует признать красивым. С данной точки зрения, красота — это то, с чем человек хотел бы образовать кооперативную индивидуальность, в единении с чем желал бы раствориться, потеряв себя, но обретя нечто лучшее. Это в равной мере относится к прекрасной музыке, игре великого артиста и пр.

Все эти духовные стремления к прекрасному, позволяющие человеку реализовать кооперативные состояния и объединиться в единое целое с прекрасным, имеют в организме энергетическую основу. Они отражают стремление к более устойчивым состояниям возбужденного организма, в который непрерывно поступают извне различные энергетические возбудители. Одним из них является пища, несущая много энергии, возбуждающей организм и переводящей его в относительно неустойчивое состояние. Конкурентами этому естественному для организма духовному способу

и каналу разрядки энергетического возбуждения являются недуховные средства минимизации энергии возбужденного состояния, включающие в том числе прием алкоголя, наркотиков и т.п.

Действие настоящего произведения искусства на человека носит не одноразовый характер. Зритель, которому довелось создать кооперативную индивидуальность или единое целое с великим произведением искусства, получает нечто большее, чем одноразовую разрядку или «ублажение». Его организм в результате обретает не только повышенную энергетическую устойчивость, но и возможность в будущем одним только воспоминанием об этом произведении (а такое воспоминание — это восстановление данного кооперативного состояния) обеспечивать энергетическую нормализацию возбужденного состояния своего организма. Недаром восточные мудрецы советуют человеку в трудные минуты жизни вспоминать о том прекрасном, что встречалось на его жизненном пути. Кроме того, индивидуум, однажды вкусивший силы этого объединения с прекрасным, облегчает себе возникновение подобных состояний в будущем при знакомстве с новыми явлениями красоты. Культурный человек, привыкший объединяться в одно целое с произведениями культуры и искусства и «не могущий без них жить», имеет через это устойчивый и эффективный канал энергетической нормализации возбуждений своего организма. Достижение энергетически устойчивого, равновесного состояния организма является также целью многих восточных школ оздоровления, технологии которых, при ближайшем рассмотрении, опираются на те же способности живого вещества к кооперативным формам поведения.

Антиподом красивому является некрасивое, от создания с которым единого целого человек либо активно отказывается или которое оставляет его равнодушным. Само слово «равнодушие» означает, что от встречи с объектом, оставившим его равнодушным, в личностном состоянии человека ничего не изменилось, осталось равным прежнему.

8.4. О биосолитонах и дистанционных воздействиях

Исследование кооперативных явлений в физике выявляет все новые и новые важные феномены когерентности, которые раньше или позже находят себе практические приложения. К их

числу относятся, например, «сверхизлучение» как коллективное спонтанное излучение (Железняков и др. /1989/) или явление самоиндуцированной прозрачности, заключающееся в пропуске коротких мощных когерентных импульсов света резонансно поглощающими средами. В описании ряда таких явлений участвуют солитонные уравнения. Можно полагать, что живое вещество из своей способности к солитонно-кооперативному поведению научилось извлекать максимум возможного, включая также то, что современная физика только нащупывает в области когерентных процессов.

В этой книге мы рассматривали участие биосолитонов во внутренней самоорганизации живого вещества. Данный параграф посвящен особняком стоящему и дискуссионному вопросу о возможном участии биосолитонов и солитонов в малопонятных, а иногда и недостаточно подтвержденных явлениях, происходящих вне тела организма и носящих название экстрасенсорных.

Многие люди верят в существование экстрасенсорных биологических воздействий, при которых обычные сенсорные каналы связи не используются, и тем не менее один человек может передавать другому информацию или вмешиваться в координацию его движений и другие физиологические функции, а также диагностировать без приборов состояние его внутренних органов и пр. Неоднократно предпринимавшиеся попытки с помощью обычных физических приборов зарегистрировать те физические носители, апелляция к которым могла бы объяснить подобные явления, насколько нам известно, не привели к установлению искомой физической основы.

Приведем один из примеров таких экстрасенсорных влияний из классической литературы — повести «Олеся» Куприна /1979/, известной также по французскому фильму «Колдунья», снятому на ее основе. Героиня повести Олеся, демонстрируя герою свои колдовские способности, просит его спокойно идти вперед, а сама смотрит ему вслед и каким-то психофизическим воздействием вызывает у героя состояние, при котором он «споткнулся на совсем ровном месте и упал ничком». Герой расспрашивает Олесю о технике этого дистанционного воздействия и узнает приблизительно следующее.

«Этот своеобразный фокус состоит в том, что она, идя за мною следом шаг за шагом, нога в ногу, и неотступно глядя на меня, в то же время старается подражать каждому, самому малейшему

моему движению, так сказать, отождествляет себя со мною. Пройдя таким образом несколько шагов, она начинает мысленно вообразать на некотором расстоянии впереди меня веревку, протянутую поперек дороги на аршин от земли. В ту минуту, когда я должен прикоснуться ногой к этой воображаемой веревке, Олеся вдруг делает падающее движение, и тогда, по ее словам, самый крепкий человек должен непременно упасть... Только много времени спустя я вспомнил сбивчивое объяснение Олеси, когда читал отчет доктора Шарко об опытах, проведенных им над двумя... профессиональными колдуньями... И я был очень удивлен, узнав, что французские колдуньи из простонародья прибегали в подобных случаях совершенно к той же сноровке, какую пускала в ход хорошенькая полесская ведьма».

В приведенном отрывке отмечен характерный момент таких «технологий» воздействия — сознательное достижение у воздействующего человека слияния с желаемым образом другого человека, и имитация искомого поведения после такого «отождествления» (т.е. создания как бы единого целого). Другими словами, здесь существенно достижение — за счет полного сосредоточения внимания — нужного кооперирования, образования нужной «кооперативной индивидуальности», вероятно, аналогичной той, которая была рассмотрена нами в параграфе 6.6 и при которой множество вовлеченных в когерентный процесс элементов ведет себя «как одна частица». В описанном Куприным случае инициированная желанием героини «кооперативная индивидуальность», соответствующая поставленной ею задаче, каким-то непонятным образом охватила также дистанционно удаленного героя, вызвав у него дискоординацию движений искомого типа и падение на ровном месте. По приведенному и другим подобным описаниям создается впечатление, что люди, разделенные дистанцией, в принципе могут при определенных условиях образовывать общую «кооперативную индивидуальность», вести себя как единое целое.

Можно обоснованно полагать, что биомеханизмы солитонной когерентности, связанные со способностью множества элементов организма вести себя «как одна частица», т.е. образовывать «кооперативные индивидуальности», являются участниками подобных экстрасенсорных явлений. Подчеркнем, что нами не утверждается существование самих экстрасенсорных явлений, которыми автор никогда прежде вообще не занимался. Но при уважительном отношении к мнению многих людей об их действительном существова-

нии делается попытка представить возможную физическую специфику феноменов такого сорта с биосолитонной точки зрения.

Речь идет о том, что специфические свойства солитонов, как принципиально нового объекта математического естествознания, могут определять весьма необычные свойства солитонных ансамблей. Не исключено, что биосолитонные ансамбли организма могут когерентным образом генерировать сверхкороткие по длительности излучения (в физике известны явления коллективного спонтанного излучения (сверхизлучения) /Железняков и др., 1989/). Или что некоторые солитонные ансамбли электромагнитной или иной известной физической природы могут образовывать некоторый устойчивый каркас вокруг тела человека, распространяющийся на значительные расстояния и способный многое объяснить, например, известный кирлиан-эффект. При этом взаимодействие подобных солитонных каркасов может определять экстрасенсорные и им подобные дистанционные феномены, если они вообще существуют.

Подчеркнем, что здесь нами говорится не об излучениях неведомой природы или о полях с какими-то неизвестными науке силами, а о возможном варианте специфической деятельности ансамблей солитонов, например, о солитонной структуризации хорошо известных физических полей типа электромагнитных. Гипотетическая реализация солитонной структуризации физических полей, генерируемых организмом и окружающих его, очевидно, связана с вопросом: может ли вокруг организма существовать соответствующая нелинейная среда солитонного типа, на которой могут пребывать солитоны? Ведь, например, в технике для обеспечения электромагнитных солитонов, в силу своих уникальных свойств устойчиво передающих информацию по оптоволоконному кабелю на огромные расстояния, модифицируется химический состав кабеля с целью придания ему нелинейных свойств солитонной среды. Этот вопрос о существовании вокруг организма (и, дополнительно, вокруг Земли) каких-то вариантов солитонных сред и солитонных каркасов и сигналов остается открытым. Один из вариантов его решения может быть связан с известным у физиков-теоретиков мнением о возможной упорядоченной структурированности (например, солитонной — С. П.) самого физического энергетического вакуума: «Не исключено, что и физический вакуум представляет собой спонтанно образовавшуюся упорядоченную структуру. Свойства упорядоченных структур

во многом сходны, поскольку имеют общее происхождение — спонтанное нарушение симметрии» (Воловик /1989/). К этим же вопросам примыкает возможное участие солитонных механизмов в навигационной ориентации перелетных птиц и других мигрирующих животных.

Отличие нашего спекулятивного подхода от множества других известных спекуляций на тему биофизических полей и излучений для экстрасенсорики заключается в предположении об их солитонном характере. Соответственно нами обращается внимание исследователей экстрасенсорных явлений на целесообразность использовать специальную физическую технику для возможной регистрации вне живого организма связанных с ним солитонов. Из-за специфики солитонов многие физические агенты могут проходить сквозь солитоны, не изменяясь и как бы не замечая их.

В виде краткого отступления автор позволит себе вспомнить о прочитанной им много лет назад смелой дискуссионной гипотезе одного из основоположников голографии Денисюка о том, что свет может быть активным участником структуризации живого и что организмы могут быть в некотором смысле как бы сотканы из света по образу голографических картин. Не развивая эту гипотезу далее, заметим только, что свет, попадая в биосолитонные среды, может расщепляться на отдельные лучи и порождать биосолитоны. Другими словами, свет может быть одним из факторов организации и эволюции биосолитонных ансамблей.

Добавим еще, что интересными для осмысления представляются вопросы о связи солитонно-когерентных свойств живого вещества с положениями квантовой механики, в которой набирают силу идеи квантовой информатики и квантовой телепортации.

Глава 9

О МОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЛИТОНАХ ДАВИДОВА

Эта глава посвящена пионерским работам А.С. Давыдова по моделированию явлений переноса вибрационной энергии и электронов вдоль квазиодномерных молекулярных цепей в важном

классе биологических молекул — альфа-спиралях белков — на базе идеи и гипотезы об участии в этих молекулярных явлениях солитонов нелинейного уравнения Шредингера (Давыдов /1988, с. 31/). Эти работы, начатые в 1973 г., видимо, можно считать первым в истории науки серьезным обращением к уникальным свойствам солитонов для объяснения конкретного биологического явления. Его исследования и яркие публикации вызвали значительный научный резонанс, а сами солитоны нелинейного уравнения Шредингера (НУШ), которые легли в основу развитой Давыдовым теории переноса указанных частиц и возбуждений в альфа-спиральных молекулах белков, получили название «молекулярных давыдовских солитонов» (так называется и одна из статей самого Давыдова /1990/, об этом же сказано в его книге /1988, с. 25/). Данное название предложил Э. Скотт, руководитель Центра нелинейных исследований Лос-Аламосской лаборатории США, и оно со временем вполне утвердилось (Давыдов /1984/).

В литературе по истории применения солитонов в различных науках упоминается также более ранняя статья Ferguson, Brown (1968). Она посвящена гипотезе о механических волнах, способных переносить энергию и заряженные частицы и распространяющихся по однородным жидкокристаллическим слоям, в том числе липидным мембранам биологических клеток. В тексте этой статьи приведено не солитонное, а обычное линейное волновое уравнение, и не содержится термина «солитон», однако, на одном из рисунков представлена схема солитоноподобных волн, что, видимо, дает основание ссылаться на нее в летописи приложений солитонной теории. Данная статья, насколько мы можем судить, не имела заметного отклика в биологических научных кругах, возможно, из-за недостаточной развитости экспериментальной техники для проверки ее гипотезы о характере волн в липидных мембранах. Соответственно в биологической литературе ссылки на нее практически отсутствуют. Отметим, что и у Ferguson, Brown (1968), и у Давыдова речь шла именно о гипотезах возможного существования солитонных волн в названных микроструктурах без демонстрации их действительного существования.

Современная теория солитонов с самого начала была в немалой степени связана с изучением солитонов в цепевидных структурах. Примерами являются работы Ферми-Паста-Улама, Крускала и Забруски, Тода, Скотта, Хирота и др., проведенные в пе-

риод 1955–1970 гг. Их ярким продолжением явились работы Давыдова по солитонам в молекулярных цепях.

Будучи одним из крупных физиков-теоретиков современности, работавшим, прежде всего, в области физики твердого тела, теории ядра и квантовой биофизики, Давыдов использовал идею солитонов для моделирования многих небιологических явлений: высокотемпературной сверхпроводимости в неметаллических соединениях, автолокализации электронов в кристаллах, переноса протонов в одномерных цепочках молекул воды и др. В связи со своими широкими интересами он провел целый ряд «теоретических исследований возбужденных состояний в квазиодномерных периодических структурах на основе нелинейных уравнений, учитывающих взаимодействие внутримолекулярных возбуждений или избыточных электронов с локальными нарушениями трансляционной симметрии, вызванными смещениями равновесных положений молекул. В частности, такие структуры реализуются в альфа-спиральных белковых молекулах» (Давыдов /1988, с. 22/). Тем самым, Давыдов шел во-многом от общей теории определенного вида возбуждений в квазиодномерных трансляционно-симметричных структурах к ее возможным приложениям в реальных небιологических и биологических структурах в связи с интересовавшей его проблемой недиссипативного переноса энергии и информации. При этом он использовал «понятие солитона в ... широком смысле при описании любых автолокализованных возбуждений, распространяющихся без существенного изменения своей формы и скорости вследствие динамического баланса между нелинейностью и дисперсией» (Давыдов /1988, с. 15/).

Данным исследованиям посвящена его книга «Солитоны в молекулярных системах», вышедшая в свет в 1984 г. и переизданная в 1988 г., а также целый ряд других публикаций, основные из которых, касающиеся, прежде всего, транспортных солитонов в альфа-спиралях белковых молекул, приведены в нашей библиографии. Рекомендуем читателю познакомиться с этими публикациями, ярко излагающими идеи их автора, его учеников и соавторов, а также позволяющими приобщиться к необычному миру солитонов. Приведем краткие сведения из научной биографии этого замечательного ученого из книг и статей о нем.

Академик АН УССР Александр Сергеевич Давыдов родился 26 декабря 1912 г. в Евпатории. Его первые научные иссле-

дования были посвящены разработке статистической теории рассеяния электромагнитных волн в конденсированных средах. Большой вклад Давыдов внес в теорию элементарных возбуждений твердых тел. Он создал теорию молекулярных экситонов, за работы по которым Давыдов был награжден в 1966 г. Ленинской премией, высшей в СССР. Его научная школа представлена именами многих известных физиков, под его руководством защищены десятки диссертаций.

В 1973 г. Давыдов становится директором Института теоретической физики АН УССР в Киеве, и публикует первую работу о возможном солитонном механизме переноса электронов вдоль молекулярной цепи белковых альфа-спиралей в связи с так называемым «кризисом в биоэнергетике». Под «кризисом в биоэнергетике» понимались существенные трудности объяснения факта переноса энергии гидролиза АТФ на расстояния, значительно превышающие межагомные. Синтез и гидролиз молекул АТФ являются универсальными промежуточными этапами огромного количества энергетических преобразований в клетках бактерий, растений и животных. А потому важно разобраться с тем, как ничтожная энергия порядка 0,5 эВ, выделяемая в одном акте этого гидролиза и достаточная только для возбуждения внутримолекулярных колебаний, может переноситься на значительные расстояния, несмотря на ее диссипацию при транспортировке. Передачу этой энергии можно связать с транспортировкой вдоль молекулярной цепи того внутримолекулярного вибрационного возбуждения, которое она способна вызвать. Подходящими колебаниями являются ранее хорошо изученные колебания группы атомов $C=O$, входящие в состав пептидных групп (ПГ) белковых молекул. Эти колебания получили название амид I, и ряд ученых считал, что энергия гидролиза молекул АТФ переносится вдоль белковых молекул в виде этих колебаний амид I. Но их оппоненты опровергали это ссылкой на то, что в конденсированной среде время жизни вибрационных возбуждений отдельных ПГ составляет только 10^{-12} сек. Из-за малого времени жизни такие колебания не могли бы участвовать в названном переносе. «На это возражение сторонники переноса энергии вибрационными возбуждениями отвечали, что, по-видимому, особая структура белковых молекул может играть ключевую роль в стабилизации и увеличении времени жизни колебаний амид I в таких макромолеку-

лах. Однако они не могли убедительно обосновать это утверждение» (Давыдов /1988, с. 25/).

Давыдовым и его соавтором Кислухой было показано, что строение альфа-спиральных белковых молекул, содержащих трансляционно-симметричные последовательности пептидных групп, позволяет предположить распространение вдоль таких цепей — без потери энергии (!) — колебательного возбуждения в форме солитонов НУШ. Как отмечает Давыдов, именно солитоны являются идеальными переносчиками энергии и заряда. Колебания амид I имеют энергию около 0,21 эВ и сравнительно большой электрический дипольный момент, который обеспечивает резонансное взаимодействие между соседними ПГ, приводящее к коллективизации возбуждения. Таким образом, речь в данном, рассматриваемом Давыдовым случае идет о вибрационных возбуждениях, обеспечиваемых именно электрическими силами взаимодействия между элементами цепи. Применяя к этому частному случаю свою теорию солитонных возбуждений в трансляционно-симметричных цепях, Давыдов получает в итоге для «простейшей модели белковой молекулы, учитывающей только периодическое расположение ПГ вдоль одной цепи водородных связей» (Давыдов /1988, с. 27/), следующее: передача названной вибрационной энергии для стационарных коллективных возбуждений, перемещающихся с постоянной скоростью и энергией, описывается солитонным нелинейным уравнением Шредингера. В рамках этой модели им рассмотрены различные варианты солитонных и несолитонных возбуждений, связанных с НУШ, их рождение и распад, а также вопросы ветвления решений НУШ, результаты компьютерного анализа ситуации и пр.

Давыдов не ограничился созданием данной модели солитонов в молекулярных альфа-спиралях, а продолжил творческий поиск новых и новых возможностей ее применения к интерпретации биологических явлений в связи с многообразным участием в них этих спирализованных белковых молекул. Так он отмечал, что по тем альфа-спиралям белковых молекул, которые пронизывают клеточные мембраны, указанный им солитонный механизм может переносить информацию снаружи внутрь клетки и обратно.

В частности, около 20 лет назад им была выдвинута гипотеза о молекулярном механизме сокращения поперечно-полосатых мышц, связанном с деформацией миофиламентов при пробега-

нии давидовских солитонов по альфа-спиральной части миозиновых молекул. «Согласно этой гипотезе ионы кальция, достигая... голов миозиновых молекул..., вызывают гидролиз присоединенных к ним молекул АТФ. Выделяющаяся энергия порождает в длинных спиральных участках миозиновых молекул несимметричные солитоны, которые перемещаются от голов миозиновых молекул к их концам, расположенным в области центра саркомера. Движение несимметричного солитона сопровождается локальным изгибом и расширением молекулы. Головы других миозиновых молекул, находящихся над пробегающими под ними изогнутыми участками спиральных молекул, прижимаются к тонким нитям, вызывая их небольшое смещение в направлении движения солитонов — к центру саркомера... Хорошей иллюстрацией механизма перемещения тонких нитей вследствие движения распухшей области толстых нитей, в которых перемещаются солитоны, могут служить вибромоторы К. М. Рагульскиса... из Научно-исследовательского института «Вибротехника» Каунасского политехнического института. В этих моторах возбуждаемые в пьезоэлектрических пленках упругие колебания в виде импульсов перемещаются вдоль их поверхности и вызывают под влиянием трения скольжения вращение или поступательное перемещение соприкасающихся с ними тел» (Давыдов / 1988, с. 43–44/).

Отметим, что в гипотезе Давыдова о механизмах мышечного сокращения все строится на молекулярных давидовских солитонах, прохождение которых временно деформирует часть системы мышечных нитей и порождает временные контакты между нитями двух разных видов. Само мышечное сокращение с взаимодвижением данных нитей происходит при этом именно за счет сил трения в данных контактах как в вибромоторах с их трением скольжения. Никакой дополнительный надмолекулярный солитонный механизм, или схема синхронной, скооперированной деятельности множества одиночных молекулярных солитонов Давыдовым не рассматривались. Насколько мы можем судить по современной биологической литературе, эта смелая гипотеза Давыдова о мышечном сокращении за счет сил трения скольжения между мышечными нитями в биологии не утвердилась.

Значительное внимание Давыдов уделял также теории протонной проводимости в цепочке молекул воды, предполагая участие в этой проводимости солитонов как транспортного средства проведения протонов по цепи. При этом он высказал инте-

ресную «гипотезу о том, что при протонировании вакантных мест в шиффовых основаниях протоны (дейтроны) перемещаются по цепям водородных связей молекул обычной (тяжелой) воды, заполняющей узкий центральный канал молекулы бактериородопсина, в котором образуются стабильные цепи водородных связей» (Давыдов /1988, с. 270/). Им и его сотрудниками рассмотрены особенности тонких приповерхностных слоев воды (толщиной 10–20 Å) со слоистой структурой, которые могут иметь значение для многих биологических и небиологических задач. В привязке к модели так называемой нити Бернала-Фаулера ими развита теория протонной проводимости в цепочке молекул воды, удерживаемых водородными связями. В этой теории описание динамики смещений протонов строится на особом нелинейном уравнении солитонного типа, ранее исследовавшемся в книге Bishop, Schneider /1978/. По данной теоретической модели ведущую роль играет электрическое поле, и возникновение солитонов основано на взаимодействии электрических диполей молекул воды. На данные работы в связи со значимостью явлений слоистой структурированности воды в приповерхностных слоях и высокой протонной проводимости в этих слоях ссылаются многие исследователи. Например, Бульенков /1991, с. 223/, развивая проблему структурированной воды и особых модульных конструкций на ее основе для биологических тел, ссылается на важность молекулярных солитонно-транспортных моделей Давыдова как моделей возможных универсальных механизмов переноса протонов и электронов в биологических средах. В целом, в этих замечательных работах Давыдова и его последователей солитоны фигурируют как молекулярное транспортное средство переноса электронов, протонов и энергии вибрационных возбуждений вдоль квазиодномерных молекулярных цепей. Множество других возможностей и способностей солитонов, представленных в общей теории солитонов, в частности, способность солитонов к взаимодействию между собой или их надмолекулярные формообразовательные потенции в приложении к биологии Давыдовым не рассматривалось.

Молекулярные давыдовские солитоны были исходно введены как гипотетические объекты. Последователями концепции Давыдова предпринято много усилий тем или иным экспериментальным образом продемонстрировать действительное существование этих молекулярных солитонов вполне конкретного

вида. Анализ этих попыток дан в работе Полозова и Якушевича /1985/, посвященной их гипотезе об участии молекулярных солитонов в возбуждениях ДНК. Их заключение таково: «Однако все эти попытки найти экспериментальное подтверждение существования солитонов представляются пока недостаточно убедительными». В недавней работе Савина и др. /1999/ показано, что если перейти от одномерной модели прямолинейной цепи к более реалистичной плоской модели зигзагообразной цепи, то картина солитонных процессов в цепи резко усложняется. В цепи, помимо нелинейного междоузельного взаимодействия (физического ангармонизма) появляется геометрический ангармонизм, обусловленный зигзагообразной конфигурацией цепи, имеющий противоположный знак и способный, например, иногда компенсировать физический ангармонизм. Авторы подчеркивают, что учет конфигурации цепи необходим для выявления возможности описания физических явлений на языке солитонов. Это означает, что в реальных биологических молекулах с их сложной пространственной конфигурацией наблюдение молекулярных солитонов из модели Давыдова, не учитывающей геометрический ангармонизм, весьма проблематично. Тем более практически невозможно вывести из модели одномерной молекулярной цепи, учитывающей только физический ангармонизм, что-то наблюдаемое для реальных биологических процессов надмолекулярного уровня, в котором согласованно работают мириады биологических молекул сложной конфигурации. Эта ненаблюдаемость молекулярных солитонов и сложность получения из гипотез о них выводов для макробиологии сильно затрудняет приобщение биологов к идеологии солитонов. Лишь выявление солитонной феноменологии на надмолекулярном биологическом уровне, независимое от существующих гипотез о молекулярных солитонах, способно соединить учение о солитонах с надмолекулярной биологией. Данной феноменологии посвящена наша книга.

Сложилось так, что автор познакомился с работами Давыдова уже после начала своих исследований по биосолитонам, о чем приходится только сожалеть, поскольку своевременное знакомство с ними могло бы упростить и ускорить развитие авторской концепции биосолитонов.

Наша концепция биосолитонов и ее материалы являются вполне оригинальными. Для иллюстрации этого отметим восемь

основных отличий наших разработок, представленных в данной книге, от содержания публикаций Давыдова.

1) *Отличие в надмолекулярности.* В нашей книге рассматриваются в основном надмолекулярные биосолитоны, т.е. солитоны, наблюдаемые в биологических явлениях надмолекулярного уровня. Между молекулярным и надмолекулярным, в частности, организменным уровнями в биологии лежит пропасть, незаполненная надлежащими знаниями. И из предполагаемого существования молекулярных солитонов еще никак не следует реализация солитонов на более высоких уровнях биологической организации.

2) *Отличие в наблюдаемости.* Молекулярные давыдовские солитоны были введены как гипотетические объекты при попытке с помощью идеи солитонов решить вопрос о недиссипативной передаче энергии молекулярных вибраций вдоль альфа-спирали белковой молекулы. Выше уже было сказано о трудностях экспериментального подтверждения их существования.

Наша концепция биосолитонов исходно была основана во многом на непосредственных наблюдениях солитонных волн в биологических трансформациях, например, локомоциях улитки, описанных в главе 2. По примеру первооткрывателя солитонов Рассела мы шли от прямых морфологических наблюдений характерных одnogорбых волн, движущихся с сохранением формы и скорости без видимой диссипации энергии. Эти первичные биоморфологические наблюдения были затем обоснованным образом дополнены нами представлениями о солитонных стенках между биологическими доменами, также непосредственно наблюдаемыми.

3) *Отличие в обращении к солитонным доменным стенкам.* Давыдова интересовали молекулярные солитоны как транспортное средство для переноса электронов, протонов и энергии колебательных возбуждений в одномерных цепях. Поэтому проблемы биологического формообразования, включающего доменобразование и солитонные стенки, им не рассматривались. Соответственно все связанные с этим и вводимые нами представления о биологической регуляции и структуризации на основе механизмов с участием солитонов не имеют аналогов в публикациях Давыдова.

4) *Отличие в типах солитонов и опорных солитонных уравнений.* Молекулярные давыдовские солитоны базируются на со-

литонном нелинейном уравнении Шредингера (НУШ), что влечет за собой ряд следствий, важных для исследователя, принимающих этот тип солитонов за основу. Дело в том, что каждое из солитонных уравнений имеет в физике свои области приложения, а солитоны разных солитонных уравнений могут существенно различаться по своим свойствам. Поэтому неадекватный выбор солитонного уравнения для моделирования той или иной природной ситуации может сильно влиять на работу естествоиспытателя, в том числе обеднять эвристические и ассоциативные возможности такого моделирования.

Известно, что НУШ возникает при исследовании нелинейных явлений, прежде всего, в физике плазмы и нелинейной оптике. Но НУШ не работает, например, в кристаллофизике, где доминирует солитонное уравнение синус-Гордона (СГ-уравнение). А потому для исследователя, вставшего на точку зрения солитонов НУШ, все солитонные богатства кристаллофизики остаются вне поля зрения, включая учения о дислокациях и доменизации, фигурирующие в нашей книге как важные для биологической структуризации. Для него также вне поля зрения остаются спиральные волны СГ-уравнения и все множество вопросов о загадке суперспиралей хромосом и других биологических структур.

В отличие от ситуации с молекулярными давыдовскими солитонами наше внимание не сконцентрировано на НУШ, а обращено на разные солитонные уравнения в поисках среди них пригодных для описания специфики наблюдаемых биологических явлений и рождения конструктивных ассоциаций. При этом наиболее интересными оказываются СГ-уравнение и его обобщения. Напомним, что в небιологических науках СГ-уравнение описывает дислокации в кристаллах, вращательные фазовые переходы в молекулярных кристаллах, движение блоховских границ в ферромагнетиках, движение директора нематического жидкого кристалла в магнитном поле, самоиндуцированную прозрачность, джозефсоновские линии передачи, поведение волн зарядовой плотности, взаимодействие элементарных частиц, фазовые переходы соизмеримость-несоизмеримость, суперионные проводники, поверхностные эпитаксиальные структуры и т.д. Эти области с их солитонными наработками способны дать ценные ассоциативные подсказки исследователю, занимающемуся биологической проблематикой.

Кроме того, между солитонами НУШ и солитонами СГ-уравнения имеются существенные различия по их динамическому и топологическому характеру (см., например, книгу Филиппова /1990/), особенностям возникновения и разрушения, и пр. Например, солитоны СГ-уравнения возникают сразу парами «солитон-антисолитон», что может многое значить для биологических систем с их спецификой размножения и доменизации, а также асимметрией биологических молекул.

5) *Отличие в неоднородности сред.* Приложения теории солитонов обычно касаются относительно однородных по составу сред. Модель молекулярных давыдовских солитонов также имеет дело с относительно однородной трансляционно-симметричной цепью полипептидных групп в альфа-спирали белковых молекул. Сам Давыдов подчеркивал, что «все живые организмы являются существенно неоднородными системами», и это резко осложняет применение к ним сложившихся в физике методов теоретического моделирования (Давыдов /1985, с. 5/). Соответственно, он не распространял теорию солитонов на неоднородные биологические среды.

Рассматриваемые в нашей книге биосолитоны реализуются на биологических макросредах, порой чрезвычайно неоднородных по своему химическому и конфигурационному составу, но всегда биологически отсепарированных (выстроенных самим организмом, защищающим их высокую специфичность, в частности, путем отторжения чужеродных биологических тканей и соблюдения характерной для живого лево-правой асимметрии молекулярных биоструктур). Это ставит целый ряд новых вопросов о природе солитонов в таких условиях и о способностях живого вещества к коллективным формам поведения вообще, в том числе возвращает к представлениям Шредингера о живой материи.

6) *Отличие в обращении к взаимодействию и колониальности солитонов.* В работах Давыдова рассматриваются одиночные молекулярные солитоны как средство транспортировки информации и энергии по молекулярной цепи. И ничего не говорится о возможности взаимодействия солитонов и существования их взаимосвязанных и многоуровневых ансамблей.

В нашей книге способности солитонов к специфическому взаимодействию с образованием устойчивых связок и колоний с нетривиальным поведением, включающим размножение солитонов, пульсационные виды поведения и пр., находятся в

центре внимания и им приписывается важная биологическая функция.

7) *Отличие в понимании природы живого вещества.* В работах Давыдова нами не найдено каких-либо высказываний о том, что само строение живых организмов осуществляется на солитонной основе. Для него белковые альфа-спирали представляли одни из многих вариантов молекулярных цепей (в том числе небиологических), в которых могут существовать солитоны НУШ.

Нами же выдвигается и аргументируется положение о солитонно-энергетической природе живого вещества в смысле особой важности биосолитонов, а также связанных с ними биодоменов для самоорганизации и саморазвития живого вещества, представляющего из себя биосолитонную среду с морфологией, во многом определяемой автолокализуемыми устойчивыми энергетическими объектами в ней. Другими словами, принимается, что живые организмы имеют солитонную основу и что с биосолитонами связаны уникальные особенности живого вещества по своему упорядочиванию, самовопроизведению, организации наследования информации и пр. Сама жизнь трактуется как форма существования солитонной энергии. При этом важное место отводится способности солитонных сред быть физическими ловушками и накопителями поступающей извне энергии, что также выходит за рамки рассматривавшегося Давыдовым вопроса о транспортных возможностях молекулярных солитонов в одномерных молекулярных цепях.

Опустим ряд мелких различий с работами Давыдова (так, молекулярные давыдовские солитоны являются «электрическими», поскольку построены на силах взаимодействия электрических диполей, а наши биосолитоны связаны, прежде всего, с механическими напряжениями) и закончим восьмым пунктом.

8) *Отличие в исследовательском подходе.* Насколько можно судить по его книгам, Давыдов был естественным образом ориентирован на нахождение все новых, небиологических и биологических, приложений его теоретических моделей солитонов в квазиодномерных молекулярных цепях трансляционно-симметричного типа. После признания научной общественностью важности «молекулярных давыдовских солитонов» в обсуждении проблемы «кризиса в биоэнергетике» у него, как у всякого последовательного ученого, появилась также интересная задача извлечь из этих «давыдовских солитонов» максимум возможных следствий, полезных для теоретической биологии. Сам харак-

тер «давыдовских солитонов», видимо, уже диктовал Давыдову направление дальнейших исследований. В целом, можно считать, что Давыдов шел к биологии от математических моделей солитонов в цепевидных структурах.

Автор настоящей книги находился существенно в ином положении и шел в обратном направлении — от биологии к математической теории солитонов. Его многолетний интерес к теме биологической самоорганизации и связанные с этим исследования высших, неевклидовых биологических симметрий в регулярных многодоменных (или многоблочных) биоструктурах привели со временем к накоплению «критической массы»: совокупность проведенных биоморфологических наблюдений и выявленных нелинейных биосимметрических преобразований общебиологического значения требовали найти адекватный физико-математический подход, способный охватить эти унифицированные морфотипы живого вещества в целом. После 25 лет биосимметрических исследований и попыток продвижения по пути «геометризации биологии» автор случайно познакомился с математической теорией солитонов и ему сразу стало «легче дышать». Он увидел ее адекватность накопленному им биоморфологическому материалу. В результате родилась настоящая книга.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Теоретическая наука во многом занимается тем, что стремится свести множество явлений к некоторым базовым понятиям, известным на сегодня. Другими словами, занимаясь наукой, мы добровольно соглашаемся смотреть на мир через очки уже существующих фундаментальных научных понятий.

Благодаря математикам и специалистам по математической физике в современной науке возникло новое фундаментальное понятие — солитон. Обладая свойствами волны и частицы, он не является ни тем, ни другим, а представляет собой принципиально новый объект математического естествознания. Этот объект наделен необычными с классической точки зрения свойствами. Его теория и приложения стремительно развиваются. Прогресс теоретической физики последних десятилетий показал, что научный охват очень многих природных явлений крайне нуждается в этом объекте вследствие их солитонной природы. Очевидно, что если исследователь подходит к солитонным средам и солитонным феноменам с классической, «досолитонной» точки зрения, то он обречен наталкиваться на парадоксы в них именно из-за неадекватности своего подхода. Образно говоря, далеко не безразлично, через очки каких понятий смотреть на окружающий мир. Например, через очки понятий теории линейных систем можно увидеть только очень отрывочные и смутные очертания закономерностей надмолекулярных биологических явлений, которые при этом сплошь и рядом выступают в форме необъяснимых парадоксов. (Для слепого человека вообще весь мир визуальных образов кажется парадоксом). Именно эта неадекватность подхода, по нашему мнению, имела место в биологии, где солитонное по своей природе живое вещество пытались понять с позиций досолитонного математического естествознания. Понятие солитона (теория солитонов) выступает той точкой опоры в области математического естествознания, с помощью которой естествоиспытатели могут добиться существенного прогресса в мире биологии.

Излагаемая в книге концепция солитонной природы живого вещества предоставляет содержательные подходы к осмыслению и моделированию множества биологических феноменов. На отдельных направлениях ее приложений можно было бы говорить

о создании соответствующих теорий, например, «солитонной теории локомоций», «солитонной теории рецепторики» и т.д. Но для упрощения и интеграции ситуации все эти частные направления, взаимосвязанные своей биологической сущностью и единым концептуальным подходом, объединяются нами под общим названием «солитонной биологии». Она является новой ветвью теоретической и математической биологии.

Издавна люди отмечали способности живой материи по особому обращению с энергией, умению каким-то образом организовать ее. Если в неживом энергия рассеивается и наблюдается тенденция к беспорядку, повышению энтропии, то в живом, напротив, энергия аккумулируется и порядок увеличивается, например, из маленького семечка вырастает огромное дерево. В силу подобных причин живое предстает как энергетический феномен. Концепция биосолитонов, будучи также энергетической в своей основе, дает содержательный подход к этому феномену. Согласно этой концепции введение солитонообразующей энергии в многоуровневую биосолитонную среду живого вещества заставляет эту среду создавать биологические форму и движение, осуществлять многие физиологические процессы в соответствии с известными в физике энергетическими принципами.

Освещаемая в книге концепция биосолитонов изменяет направление мысли о природе биологической самоорганизации. Вместо распространенного предположения о чисто химическом фундаменте этой самоорганизации выдвигается представление о ее энергетической основе на базе устойчивых сгустков энергии — солитонов, связанных с участием в живом особых нелинейно-физических механизмов. Соответственно солитонная биология рассматривает живую материю во многом как мир энергетической самоорганизации, способный бороться с рассеиванием энергии и через то создавать порядок. Она предоставляет новое понимание старой проблемы, выражаемой словами А.Сент-Дьерди: «проблема ставится так: каким образом энергия управляет жизнедеятельностью? Как она приводит в движение живую машину? ... Это одна из наиболее важных проблем биологии». В нашей книге ответ на данные вопросы связывается с общебиологической ролью особой — солитонной — формы энергоструктуризации, до недавнего времени науке неизвестной.

Концепция биосолитонов представляется физически содержательным центром кристаллизации для множества имеющих-

ся и будущих идей и фактов о самоорганизующейся живой материи. Ее можно также рассматривать как новое, недостающее измерение в пространстве моделирования биологических явлений, причем именно в этом измерении, по нашему мнению, лежат многие ключевые моменты специфики живого. Создаваемая на ее основе солитонная биология открывает обширный пласт материалов, которые способны дополнительно стимулировать развитие других, небιологических приложений солитонной теории, уже проникшей во множество областей современного математического естествознания.

Желая облегчить для читателя приобщение к солитонной биологии, автор привел в книге много обзорных материалов по теории солитонов и ее приложений к различным областям физики. На этом насыщенном фоне необходимо выделить, что же нового сделано самим автором, иначе его собственные наработки рискуют раствориться в общей научной информации. Основными новыми положениями и результатами авторских разработок, направленных на создание основ солитонной биологии, являются следующие:

- Впервые предложено рассматривать макроскопическое живое вещество как биосолитонную среду, в которой существуют надмолекулярные солитоны живого вещества — биосолитоны. Впервые с позиции теории солитонов проведен анализ локомоторных и иных макроскопических биологических движений у целостных организмов и показана широкая реализация в биологических движениях надмолекулярного уровня солитоноподобных волн (одногорбых, движущихся с сохранением формы и скорости) на самых разных линиях и уровнях биологической эволюции, в том числе у организмов, размеры которых отличаются на несколько порядков. Выявление этих непосредственно наблюдаемых солитоноподобных процессов и их общebiологического значения позволило автору обосновать важность прежде никем не проводимого изучения роли солитонов надмолекулярного уровня в живом веществе, отличающемся крайней неоднородностью состава. Это изучение начато автором.

- Выдвинуто новое положение о том, что теория солитонов и солитонно-энергетический подход могут быть основой целостной системы биологического теоретизирования, необходимость поиска которой давно подчеркивалась многими естествоиспытателями. При этом важное значение имеют уникальные свойства

солитонов по их неразрушающему столкновению, взаимному притягиванию и отталкиванию, размножению, образованию устойчивых связей со сложным поведением (например, пульсирующих бризеров), которые ассоциируются со свойствами биологических объектов. Показано, что на этом пути возможны новые содержательные подходы к биологическим явлениям самоорганизации, самовоспроизведения, организации наследственной информации, разрастания упорядоченности, а также объемного роста, морфогенеза, сенсорики, локомоций и многим другим. Отмечена особая перспективность солитонного уравнения синус-Гордона для биологических приложений. В теоретическую биологию макроскопических объектов и явлений введено в качестве базового новое фундаментальное понятие математического естествознания — солитон. Заложены основы нового направления теоретической и математической биологии.

- Впервые проведенное на биологическом макроуровне изучение возможной роли солитонных доменных стенок (как одного из вариантов реализации солитонов в макросистемах) привело к понятию макроскопических биологических доменов и выявило полезность представления организма как суперсети солитонных доменных стенок. Особое значение отведено упругим биодоменам и связи биосолитонов с биомеханическими напряжениями.

- Предложено новое понимание жизни как формы существования солитонной энергии. Показано, что положение о солитонной природе многих биологических явлений позволяет по новому осмыслить роль физической энергии (в связи с ее солитонными формами) в живом веществе, включая биологические феномены понижения энтропии, а также выявить новые механизмы кооперативного поведения частей организма и обосновать новые важные представления (например, о взаимодействии физической и химической энергии в организме). При этом распространенное мнение о том, что жизнь — это энергетический феномен, получает новое содержание.

- В связи с выявлением непосредственно наблюдаемых биосолитонов в биологических макротелах развиты начальные положения о когерентных свойствах живого вещества, в силу которых множество его компонентов способно вести себя как единое целое и описываться единой волновой функцией. Эти положения открывают путь для новой физиологической парадигмы со-

литонно-кооперативного организма (см. параграф 6.5). Отмечены аналогии между когерентными явлениями в живом и неживом веществе, позволяющие переносить в биологию уже развитые в физике элементы теории когерентных явлений.

Ряд формулировок на тему о новизне авторских исследований и результатов читатель может найти также в конце главы 9.

Возвращаясь к исходной математической теории солитонов, отметим следующее. Выявленная важность теории солитонов для понимания природы живой материи, а значит для многих связанных с нею теоретических и прикладных областей знания и творчества — биологии и медицины, искусства и техники, спорта, психологии и пр. — ставит ее в положение базового центра научного роста, от которого зависит прирастание многих других научных областей. Самого человека наука, видимо, все более будет понимать как «*Homo solitonus*» — «Человека солитонного». Поэтому развитию и освещению математической теории солитонов должно быть уделено особое внимание на самом высоком уровне организации науки и образования. Необходимо возможно широкое знакомство общества образованных людей с ее достижениями и уникальными свойствами солитонов и солитонных сред. Это облегчается тем, что солитоны оказываются связаны с природой самого человека, для которого, говоря словами Декарта, «нет более плодотворного занятия, чем познание самого себя» и для которого присуще размышлять о самом себе. Владение понятием «солитона» должно стать элементом культуры современного человека. Наука находится на стадии очередного сильного рывка вперед, на этот раз в связи с развитием математической теории солитонов и ее приложений к живой материи.

В организационном плане для облегчения общения между специалистами по вопросам солитонной биологии группой заинтересованных лиц создан Международный научный клуб «Биосолитон». Список его задач включает всемерную поддержку развития теории и приложений солитонной биологии, обмен научной информацией между членами Клуба, подготовку научных конференций и т.п. Клуб «Биосолитон» ориентирован на тесное сотрудничество с ЮНЕСКО, Международным обществом по изучению симметрии «*ISIS-Symmetry*» и другими отечественными и зарубежными обществами. Планируется открыть его клубную страницу в Интернете с предположительным адресом /www.biosoliton.com/.

ОБ АВТОРЕ

Петухов Сергей Валентинович — доктор физико-математических наук, лауреат Государственной премии СССР, ведущий научный сотрудник Отдела биомеханики Института машиноведения Российской Академии Наук (Москва, 101830, Малый Харитоньевский пер., 4). Вице-президент Международного общества по изучению симметрии «ISIS-Symmetry».

Выпускник Кафедры физики живых систем Московского физико-технического института и ее аспирантуры 1973 года с базовой подготовкой в Институте проблем передачи информации РАН. Специалист в области теоретической и математической биологии, биомеханики, кристаллографии, биологических симметрий, теории самоорганизации, теории солитонов.

AUTHOR

Petoukhov Sergei V. — Doctor of Phys.-Math. Sciences, State Prize Award.

Department of Biomechanics, Mechanical Engineering Research Institute, Russian Academy of Sciences (Russia, 101830, Moscow, Malij Haritonjevskij pereulok, 4).

Vice-president of the International Society «ISIS-Symmetry».

The graduate of Department of physics of living systems of the Moscow Physical-Technical Institute (1970) with basic training in the Institute of Information Translation's Problems, Russian Academy of Sciences.

Specialist in theoretical and mathematical biology, biomechanics, crystallography, biological symmetries, theory of self-organisation, theory of solitons.

**SUMMARY OF THE BOOK BY S.V. PETOUKHOV
«BIOSOLITONS — A SECRET OF LIVING MATTER.
THE BASES OF SOLITON BIOLOGY»**

The amazing ability of biological organisms to self-development and active motion was a subject of great interest for people from ancient times. This ability is connected with specific fate of energy, which is falling into living matter and participating in processes of its coming into order and transformation, like outgrowing of a small seed into a great tree.

This book presents an importance of a relatively new notion of mathematical sciences — «soliton» — for cognition of living matter. This notion has appeared and occupied significant position in modern theoretical physics just during the last 30-40 years due to mathematicians and specialists in mathematical physics. Sometimes, soliton is named a «wave atom». It possesses the properties of wave and particle simultaneously, but is not neither that, nor other. Soliton presents itself a new object of science. Solitons can interact with each other like charged particles, multiply and perish, form the ensembles with non-trivial morphology and behaviour, etc. It's possible to interpret solitons as a specific form of organization of physical energy in matter, and that's why we can speak on «soliton energy» in analogy with the known expressions «wave energy» or «vibration energy».

Solitons have been realized as conditions of special nonlinear media (or systems) and have the significant differences from usual linear waves, theory of which was used in the past for interpreting the wave-like natural processes. In particular, solitons present themselves frequently in the view of auto-localized bundle of energy in the typical form of one-hunch wave, which is moving with conservation of its form and velocity without dissipation of its energy.

Scientists, who have investigated natural phenomena of soliton type, could not understand and explain them on the base of classical theory of linear waves. In our opinion, the soliton nature of many biological phenomena prevented scientists from understanding of many aspects of living matter in the past.

One of the particularities of living organism is a presence of forms of constant motion or «charges of motion» in it. According

to well-known expression, «life is a motion». For example, it's always possible to distinguish living cells from dead ones, because living cells move and change their forms continuously.

In this book the author pays attention to the fact, that many supramolecular biological motions, including locomotions, have the form of stabilized one-hunch wave, spreading along a body with conservation of its form and velocity without visible heating of medium. There are biological examples of such one-hunch waves, which move in the opposite directions and have undisturbance interaction like classical solitons. The author has offered to use solitons as a model of such biological motions which have been observed on most different lines and levels of biological evolution, including organisms, the sizes of which differ in thousands times.

The author followed the example of J. Russel, who was a discoverer of solitons and who has observed this unusual one-hunch wave on a surface of water channel. The author made similar morphological observations of macrobiological motions. In the result he has surprisingly found numerous biological examples of such one-hunch waves and has interpreted them as solitons. Phenomena of soliton type in living matter were named by him as biosolitons. These initial results have allowed him to proceed to a systematic study of manifestations and an important role of biosolitons in biological bodies. This study opens a new scientific area, briefly named as «soliton biology». One of the most significant parts of it is a subconcept of biological domains with biosoliton domain walls. According to this subconcept an organism can be interpreted as a multilevel polydomains structure or a supernet of biosoliton domain walls. The notion of soliton is presented like a filament for discovering the whole ball of interconnected biological riddles.

According to author's biosolitons concept, a living matter is a special soliton medium. This medium generates multilevel colonies of biosolitons under supplying with energy. Biosolitons reveal their ability to specific interaction and behaviour in these colonies, including attraction and repulsion; origination of new biosolitons; forming of stabilized ligaments with non-trivial space-time behaviour, etc. Besides, biosoliton colonies reveal the ability to create and support in their system a special high order in counterweight of trends to disturbances («heat death»), considered in thermodynamics (see paragraph 6.4). This ability is associated

with analogical property of living matter. One of the main problems of biology is maintenance of body spatial configuration under constant renovation of its matter. This biological property also finds a useful analogy in properties of soliton as a moving auto-stabilized energetical formation, which supports its form under constant renovation of its composition (see paragraph 5.2).

According to this biosoliton concept of specific energetical nature of system organization in biological bodies, biosoliton is a universal type of collective behaviour of living matter and active participants of biological self-organization and vital activity. Their energetical colonies promote, in particular, an enlarging of biosoliton medium in the course of transformation of foods and energy, coming from outside, into new masses of living matter. It's important that soliton medium is a trap for coming energy of excitements which transforms it into non-dissipative soliton type of physical energy, which is working in organism in harmony with its chemical types of energy (see paragraph 6.2).

Up to this concept, biological morphology and physiology of organisms are defined (in a great degree) by morphology and activity of biosolitons' ensembles which are auto-localized interacting non-dissipative energetical formations with special forms. Specific soliton type of physical energy turns out to be essential for living matter on most different levels of its organizations and evolution. A life is a soliton form of energy existence in biosoliton media. Or, more briefly, a life is a form of existence of soliton energy.

The book is oriented on wide readership, who has interest in problems of theoretical and mathematical biology or new applications of solitons' theory. It has additionally a lot of overview materials for acquaintance with the theory of solitons and its known physical applications.

ЛИТЕРАТУРА

1. Абдуллаев Ф.Х., Хабибуллаев П.К. Динамика солитонов в неоднородных конденсированных средах. — Ташкент: ФАН, 1986, 173 с.
2. Абловиц М., Сигур Х. Солитоны и метод обратной задачи. М.: Мир, 1987, 445 с.
3. Аксенова М. — гл. редактор. Энциклопедия для детей, т.2 (Биология). М.: «Аванта+», 1998, 702 с.
4. Александер Р. Биомеханика. М.: Мир, 1970, 338 с.
5. Александр Сергеевич Давыдов (о нем). /Вступительная статья Ю.Б. Гайдидея и др. Киев: Наукова Думка, 1982, 51 с.
6. Алиев Х.М. Защита от стресса. Как сохранить и реализовать себя в современных условиях. М.: Мартин, 1996, 239 с.
7. Альтман Я.А. и др. Слуховая система. Л.: Наука, 1990, 617 с.
8. Амелинкс С. Методы прямого наблюдения дислокаций. М.: Мир, 1968, 440 с.
9. Андреев А.В., Емельянов В.И., Ильинский Ю.А. Кооперативные явления в оптике: Сверхизлучение. Бистабильность. Фазовые переходы. М.: Наука, 1988, 286 с.
10. Антонченко В.Я., Давыдов А.С., Ильин В.В. Основы физики воды. Киев: Наукова Думка, 1991, 667 с.
11. Бекеши Г., Розенблит В.А. Механические свойства уха. // Экспериментальная психология. М.: Изд-во ин. лит., т.2, 1963, с. 682–724
12. Беклемишев В.Н. Основы сравнительной анатомии беспозвоночных. Тт. 1, 2. М.: Наука, 1964, 431 с.
13. Белоусов Л.В. Введение в общую эмбриологию. М.: МГУ, 1980, 210 с.
14. Белоусов Л.В. Биологический морфогенез. М.: Изд-во МГУ, 1987, 238 с.
15. Белоусов Л.В., Чернавский Д.С. Концепция «морфогенетического поля» А.Г. Гурвича в свете теории диссипативных структур. Пушино: препринт Института биофизики АН СССР, 1982, 7 с.
16. Бендолл Дж. Мышцы, молекулы и движение. М.: Мир, 1970, 256 с.
17. Бернал Дж., Карлайл С. Поля охвата обобщенной кристаллографии. В кн.: Кристаллография, 1968, т.13, вып.5, с. 927–951.
18. Бернштейн Н.А. Очерки по физиологии движений и физиологии активности. М.: Медицина, 1966, 349 с.
19. Бляшке В. Дифференциальная геометрия и геометрические основы теории относительности Эйнштейна, т. 1. М.: ОНТИ НКТП СССР, 1935, 330 с.
20. Бодниер О.Я. Золотое сечение и геометрия Минковского в природе и искусстве. В кн.: Математика и искусство. Труды международной конференции, М.: МГУ, 1997, с. 129.
21. Бойко В.С., Гарбер Р.И., Косевич А.М. Обратимая пластичность кристаллов. М.: Наука, 1991, 281 с.
22. Браун Г., Уолкен Дж. Жидкие кристаллы и биологические структуры. М.: Мир, 1982, 198 с.
23. Буллаф Р. и др. Солитоны /под ред. Буллафа Р., Кодри Ф. М.: Мир, 1983, 408 с.

24. Бульенков Н.А. О возможной роли гидратации как ведущего интеграционного фактора в организации биосистем на разных уровнях их иерархии. — Биофизика, т. 36, вып. 2, 1991, с. 181–243.
25. Бушан Г. Наука о человеке. М.: Сфинкс, 1911, 341 с.
26. Вавилов Н.И. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. — Избранные труды в 5 тт. / т.5. М., Наука, 1965, с. 179–222.
27. Вайнштейн Б.К., Шаскольская М.П. Кристаллы. — В кн.: Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия, 1984, с. 327–330.
28. Ведаев А.В., Роде В.Е. Домены. — В кн.: Физический энциклопедический словарь. М.: Советская энциклопедия, 1984, с. 182–183.
29. Велихов Е.П., Чернавский А.В. — отв. редакторы. — Сб. Интеллектуальные процессы и их моделирование. М.: Наука, 1987, 395 с.
30. Вернадский В.И. Размышления натуралиста: Пространство и время в неживой и живой природе. — М., Наука, 1975, 260 с.
31. Вернадский В.И. Живое вещество. М.: Наука, 1978, 220 с.
32. Винников Я.А. и др. Рецептор гравитации /ред. В.Н.Черниговский — В кн.: Проблемы космической биологии, т.12, Л., Наука, 1971, 520 с.
33. Винников Я.А. Эволюция рецепторов. Л.: Наука, 1979, 139 с.
34. Влияние солнечной активности на биосферу /ред. М.Н.Гневышев. М.: Наука, 1982.
35. Воловик Г.Е. Нелинейные явления в физике конденсированных сред: вселенная в капле гелия. — В кн.: Нелинейные волны. Динамика и эволюция /ред. Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. М.: Наука, 1989, с. 343–351.
36. Волькенштейн М.В. Общая биофизика. М.: Наука, 1978, 590 с.
37. Воробьева Э.И. Параллелизмы и конвергенции в эволюции кистеперых рыб. В кн.: Морфологические аспекты эволюции. М.: Наука, 1980, с. 7–28.
38. Газарян К.Г., Белоусов Л.В. Биология индивидуального развития. М.: Высшая школа, 1983, 287 с.
39. Гельфанд С. А. Слух. М.: Медицина, 1984, 350 с.
40. Гессе Р. Тело животного как самостоятельный организм. СПб.: 1912, 560 с.
41. Гете И.-В. Избранные сочинения по естествознанию. — М., АН СССР, 1957, 553 с.
42. Говардовский В.И., Грибакин Ф.Г. Фоторецепторные мембраны: оптические и электрические свойства. В кн.: Структура и функции биологических мембран. М.: Наука, 1975, с. 197–223.
43. Голубев С. Н. Реальные кристаллы в скелетах кокколитофорид. М.: Наука, 1981, 290 с.
44. Голубовский М.Д. Критические исследования в области генетики. — В кн.: Александр Александрович Любищев /ред. П.Г.Светлов. Л.: Наука, 1982, с. 52–64.
45. Гробстайн К. Стратегия жизни. М.: Мир, 1968, 144 с.
46. Губанов Н.И., Утепбергенов А.А. Медицинская биофизика. М.: Медицина, 1978, 301 с.
47. Гурвич А.Г. Избранные труды. М.: Медицина, 1977, 351 с.
48. Гурфинкель В.С., Коц Я.М., Шик М.Л. Регуляция позы человека. М.: Наука, 1965, 256 с.
49. Гурфинкель В.С., Левик Ю.С. Скелетная мышца. Структура и функция. М.: Наука, 1985, 143 с.
50. Давид О.Ф. Морфофизиологические основы локомоции аннелид. Л.: Наука, 1990, 140 с.
51. Давыдов А.С. Биофизика: проблемы и перспективы развития. Киев: Знание, 1983, 48 с.

52. Давыдов А.С. Нелинейная биофизика. Киев: Препринт ИТФ АН УССР, 1984, 64 с.
53. Давыдов А.С. Квантовая механика и биология. Киев: ИТФ АН УССР, 1985, 17 с.
54. Давыдов А.С. Солитоны в биоэнергетике. Киев: Наукова Думка, 1986, 159 с.
55. Давыдов А.С. Солитоны в молекулярных системах. Киев: Наук. Думка, 1988, 303 с.
56. Давыдов А.С. The lifetime of molecular (Davydov's) solitons. Киев: Препринт ИТФ АН УССР, 1990, 20 с.
57. Данилов Ю.А. Джон фон Нейман. М.: Знание, 1990, 46 с.
58. Деттер В., Стеллар Э. Поведение животных. Л.: Наука, 1967, 141 с.
59. Динамика дислокаций / ред. В.И. Старцев. Киев: Наукова Думка, 1975, 403 с.
60. Добролюбов А.И. Волновые движения деформируемых тел и жидкостей. Минск: Наука и техника, 1989, 94 с.
61. Додд Р., Эйлбек Дж., Гиббон Дж., Моррис Х. Солитоны и нелинейные волновые уравнения. М.: Мир, 1988, 694 с.
62. Дорфман Я.Г., Сергеев В.М. Нейроморфогенез и модели мира в сетях нейронных процессоров. — В сб.: Интеллектуальные процессы и их моделирование, М.: Наука, 1987, с. 39–65.
63. Дубров А.П. Геомагнитное поле и жизнь. Л.: Гидрометеониздат, 1974, 220 с.
64. Дубров А.П. Симметрия биоритмов и реактивности. М.: Медицина, 1987, 175 с.
65. Евин И.А. Синергетика искусства. М.: Наука, 1993, 190 с.
66. Емельянов И.П., Емельянов И.И. Введение в биологическую математику. Якутск: Якутский научный центр СО РАН, 1992, 275 с.
67. Железняков В.В., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В. Сверхизлучение. Метод электродинамики сплошных активных сред. — В кн.: Нелинейные волны / Ред. Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. М.: Наука, 1989, с. 358.
68. Заварзин А.А. Параллелизм структур как основной принцип морфологии. — *Zeitschrift für wissenschaftliche Zoologie*, 1925, Bd. 124, H. 1, S. 15–41.
69. Заварзин Г.А. Фенотипическая систематика растений. Пространство логических возможностей. М.: Наука, 1974, 142 с.
70. Захаров В.Е., Тахтаджян Л.А., Фаддеев Л.Д. Полное описание решений уравнения СГ. — ДАН СССР, т. 19, с. 1334–1336.
71. Захаров В.Е., Манаков С. В., Новиков С. П., Питаевский Л.П. Теория солитонов. Метод обратной задачи / отв. ред. С. П. Новиков. М.: Наука, 1980, 319 с.
72. Ильинский О.Б. Физиология кожной чувствительности. — В кн.: Физиология сенсорных систем, ч. 2. Л.: Наука, 1972, с. 30–56.
73. Инденбом В.Л. Сегнетоэластики и история развития теории двойникования и теории сегнетоэлектричества. — Известия АН СССР, Серия физическая, т. 43, № 8, 1979, с. 1631–1640.
74. Инденбом В.Л., Чамров В.А. Основные задачи о форме доменов в сегнетоэластиках — Кристаллография, 1980, т. 25, № 2, с. 213–217.
75. Иона Ф., Ширане Д. Сегнетоэлектрические кристаллы. М.: Мир, 1965, 555 с.
76. Калоджеро Ф., Дегасперис А. Спектральные преобразования и солитоны. М.: Мир, 1985, 469 с.

77. Каменский В.Г. Нелинейная динамика директора нематиков в магнитном поле. — ЖЭТФ, 1984, т. 87, вып. 4 (10), с. 1262–1277.
78. Кант И. Сочинения: В 6 т. Т. 1. М.: Мысль, 1963, 544 с.
79. Каппуччинелли П. Подвижность живых клеток. М.: Мир, 1982, 126 с.
80. Карпович А.Л., Смолянинов В.В. Особенности локомоции многоножки *Scolopendra Cingulata*. — Журнал эволюционной биохимии и физиологии, 1974, т. 10, № 5, с. 480.
81. Кикнадзе И.И. Функциональная организация хромосом. Л.: Наука, 1972, 209 с.
82. Китайгородский А.И. Смешанные кристаллы. М.: Наука, 1983, 277 с.
83. Князева Е.Н., Курдюмов С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М.: Наука, 1994, 220 с.
84. Кокшайский Н.В. Очерк биологической аэро- и гидродинамики. М.: Наука, 1974 280 с.
85. Конторова Т.А., Френкель Я.И. К теории пластической деформации и двойникования. — ЖЭТФ, т. 8, 1938, с. 89–96.
86. Корепин В.Е., Фаддеев Л.Д. Квантование солитонов. — ТМФ, т. 25, № 2, 1975, с. 147.
87. Корона В.В. Основы структурного анализа в морфологии растений. Свердловск: Изд-во Уральского университета, 1987, 269 с.
88. Косевич А.М., Ковалев А.С. Введение в нелинейную физическую механику. Киев: Наукова Думка, 1989, 301 с.
89. Кузнецова О.В. Максвелл и границы применимости второго начала термодинамики. — В кн.: Максвелл и развитие физики XIX–XX веков. М.: Наука, 1985, с. 158–166.
90. Кулаков А.В., Румянцев А.А. Введение в физику нелинейных процессов /отв. ред. В.Е.Фортов. М.: Наука, 1988, 158 с.
91. Куприянов В.В., Караганов Я.Л., Козлов В.И. Микроциркуляторное русло. М.: Медицина, 1975, 220 с.
92. Курдюмов С. П. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем. М.: препринт ИПМ АН СССР № 45, 1990, 45 с.
93. Лайс М., Гласс А. Сегнетоэлектрики и родственные им материалы. М.: Мир, 1981.
94. Линдсей П., Норман Д. Переработка информации у человека. М.: Мир, 1974, 550 с.
95. Лисовский В.Ф. Цилиндрические магнитные домены. — В кн.: Физический энциклопедический словарь, М.: Советская энциклопедия, 1984, с. 847.
96. Любичев А.А. Проблемы формы систематики и эволюции организмов. М.: Наука, 1982, 277 с.
97. Лэм. Дж.Л. Введение в теорию солитонов. М.: Мир, 1983, 294 с.
98. Маресин В.М. Геометрия формирования биологических тканей. — В кн.: Математическая биология развития. М.: Наука, 1982, с. 112–125.
99. Мезенцев А.Н., Мессина О.В. Транспорт аксоплазмы и биосинтетические процессы в аксоне. — Успехи современной биологии, т.72, вып.1(4), 1971, с. 62–76.
100. Мейен С. В. Путь к новому синтезу или куда ведут гомологические ряды. — Знание-сила, 1972, № 8, с. 20–22.
101. Мейен С. В. Дискуссия к статье А.А. Любичева «Поли- и моно». — Знание-сила, 1977, № 7, с. 292–31.
102. Мейен С. В. Типологические аспекты интеграции физического, биологического и социогуманитарного знания. — В сб.: Пути интеграции биологического и социогуманитарного знания. М.: Наука, 1984, с. 88–99.

103. Мейен С. В., Соколов Б.С., Шрейдер Ю.А. Классическая и неклассическая биология: Феномен Любичева. — Вестник АН СССР, 1977, № 10, с. 112–124.
104. Молчанов А.М. Возможная роль колебательных процессов в эволюции. — В кн.: Колебательные процессы в биологических и химических средах. М.: Наука, 1967, с. 274–288.
105. Молчанов А.М. Термодинамика и эволюция. — там же, с. 292–308.
106. Мэзия Д. Митоз и физиология клеточного деления. М.: Ин. лит., 1963, с. 427.
107. На пути к теоретической биологии. М.: Мир, 1970, 181 с.
108. Нейман Дж. фон. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир, 1971, 230 с.
109. Нелинейные волны. Динамика и эволюция/отв.ред. А.В.Гапонов-Грехов, М.И.Рабинович. М.: Наука, 1989, 398 с.
110. Нелинейный явления/отв. ред. К.В.Фролов. М.: Наука, 1991, 214 с.
111. Ньюэлл А. Солитоны в математике и физике. М.: Мир, 1989, 324 с.
112. Оловников А.М. (Olovnikov A..M.) A theory of marginotomy. — J. theor. Biology, 1973, 41(1), p.181–190.
113. Островский Л.А. Солитон. В кн.: Физический энциклопедический словарь, М., Сов. энциклопедия, 1984, с. 698–699.
114. Отелин А.А., Машанский В.Ф., Миркин А.С. Тельце Фатер-Пачини. Л.: Наука, 1976, 210 с.
115. Охнянская Л.Г., Мишин В.П., Спектор Э.Л. А.А.Ухтомский и развитие идей теории нелинейных колебаний в области физиологии. — В сб.: Учение А.А. Ухтомского о доминанте и современная нейрофизиология. Л.: Наука, 1990, с. 60–84.
116. Петухов С. В. Биомеханика, бионика и симметрия. М.: Наука, 1981, 239 с.
117. Петухов С. В. О геометрической теории полей объемного роста живых тел и ростовой биомеханике. Депонировано в ВИНТИ, № 1842–84 Деп., 1984, 33 с.
118. Петухов С. В. Высшие симметрии в биомеханике формообразования. — Автореферат диссертации д.ф.-м.н., М., Ин-т кристаллографии им. А.В.Шубникова, 1987, 39 с.
119. Петухов С. В. Геометрии живой природы и алгоритмы самоорганизации. М.: Знание, 1988, 48 с.
120. Петухов С. В. Солитоны в биомеханике. — Депонировано в ВИНТИ РАН 12.02.99г., № 471-В99, 12 с., Указатель ВИНТИ «Депонированные научные работы», 1999 № 4.
121. Петухов С. В. Надмолекулярные биосолитоны. — Депонировано в ВИНТИ РАН 18.05..99г., № 1554-В99, 36 с., Указатель ВИНТИ «Депонированные научные работы», 1999, № 7.
122. Поглазов Б.Ф., Бурнашева С. А. Немышечные двигательные системы. — В кн.: Итоги науки и техники, серия «Биологическая химия», 1989, т.29, 171 с.
123. Полозов Р.В., Якушевич Л.В. Нелинейные возбуждения в ДНК и экспрессия генов. Пушино: препринт ИБФ АН СССР, 1985, 20 с.
124. Попов А.В. Акустическое поведение и слух насекомых. Л.: Наука, 1985, 251с.
125. Пуанкаре А. Ценность науки. М.: Творческая мысль, 1906, 194 с.
126. Пуанкаре А. Наука и метод. СПб.: ОГИЗ, 1923, 134 с.
127. Раджараман Р. Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля. М.: Мир, 1985, 280 с.

128. Ребби К. Солитоны. — Успехи физических наук, 130, вып.2, 1980, с. 329–356.
129. Регирер С. А., Штейн А.А. Механические аспекты процессов роста, развития и перестройки биологических тканей // Итоги науки и техники. Серия «Комплексные и специальные разделы механики». М.: ВИНТИ, 1985, с. 3–142.
130. Ройтбурд А.Л. Известия АН СССР, серия физическая, 1983, т.47, с. 435.
131. Романовский Ю.М., Степанова Н.В., Чернавский Д.С. Математическая биофизика. М.: Наука, 1984, 304 с.
132. Рудяк В.М. Процессы переключения в нелинейных кристаллах. М.: Наука, 1986.
133. Савин А.В., Маневич Л.И., Христиансен П.Л., Золотарюк А.В. Нелинейная динамика загзагообразных молекулярных цепей. — УФН, т.169, №3, 1999, с. 255–270.
134. Серавин Л.Н. Двигательные системы простейших. Л.: Наука, 1967, с. 332.
135. Серавин Л.Н. Амебoidное движение. — В кн.: Движение немышечных клеток и их компонентов. Л.: Наука, 1977, с. 121–132.
136. Синнот Э. Морфогенез растений. М.: Изд. иностр. лит., 1963, 480 с.
137. Скотт Э. Волны в активных и нелинейных средах в приложении к электронике. М.: Сов.Радио, 1977, 368 с.
138. Смолянинов В.В., Карпович А.Л. Нормальная локомоция многоножки *Julus Sp.* — Журнал. эволюц. биохимии и физиологии, т. 8, № 5, 1972, с. 523–528.
139. Смолянинов В.В., Карпович А.Л. Кинематика метакрональной ходьбы. — Биофизика, т.20, 1975, с. 527–532, 709–714, 925–930.
140. Смолянинов В.В. Локомоторная теория относительности. М.: Препринт ИППИ АН СССР, 1984, 75 с.
141. Солитоны /ред. Р.Буллаф, Ф.Кодри. М.: Мир, 1983, 407 с.
142. Солитоны в действии /ред. К.Лонгрен, Э.Скотт. М.: Мир, 1981, 312 с.
143. Солитоны и инстантоны, операторное квантование /отв. ред. В.Л.Гинзбург. М.: Наука, 1986, 229 с.
144. Татаринов Л.П. Морфологическая эволюция териодонтов и общие вопросы филогенетики. М.: Наука, 1976, 256 с.
145. Тахтаджян Л.А., Фаддеев Л.Д. Существенно-нелинейная одномерная модель классической теории поля. — ТМФ, т. 21, 1974, № 2, с. 160–174.
146. Узизем Дж.Б. Линейные и нелинейные волны. М.: Мир, 1977, 623 с.
147. Уиттекер Е.Т. Аналитическая динамика. М.: ТТЛ, 1935, 500 с.
148. Урманцев Ю.А. Симметрия природы и природа симметрии. М.: Мысль, 1974, 229 с.
149. Федорова Д.Л., Петухов С. В., Васильчиков А.С., Брагина Е.Е. Биомеханика двигательного аппарата микроорганизмов в условиях влияния магнитных полей, индуцируемых домено-упорядоченными структурами. — Труды научного семинара под руководством академика К.В.Фролова (1994–98 гг.). М.: ИМАШ РАН, 1998, с. 206–226.
150. Ферми Э. Термодинамика. Харьков: Харьковский университет, 1973, 136 с.
151. Филиппов А.Т. Многоликий солитон. М.: Наука, 1990, 288 с.
152. Франк Г.М. — отв. ред. Движение немышечных клеток и их компонентов. Л.: Наука, 1977, 317 с.
153. Францессон А.В. Когерентность. — В кн.: Физический энциклопедический словарь. М.: Сов. Энциклопедия, 1984, с. 291–292.
154. Френкель Я.И. Собрание избранных трудов, т. 2. М.: Изд. АН СССР, 1958, 600с.
155. Фридель Ж. Дислокации. М.: Мир, 1967, 643 с.

156. Фултон А. Цитоскелет, архитектура и хореография клетки. М.: Мир, 1987, 114 с.
157. Ханджян О.А. Начала и основы теории представления. М.: Диалог-МГУ, 1998.
158. Харгитаи И. Симметрия глазами химика. М.: Мир, 1991, 360 с.
159. Хачатурян А.Г. Теория фазовых превращений и структурных твердых растворов. М.: Наука, 1974, 290 с.
160. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. М.: Атомиздат, 1972, 599 с.
161. Цыдыпов Ч.Ц. — отв. ред. Пульсовая диагностика тибетской медицины. Новосибирск: Наука, 1988, 134 с.
162. Чижевский А.Л. В ритме Солнца. М.: Мысль, 1969, 260 с.
163. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. М.: Мысль, 1973, 271 с.
164. Шафрановский И.И. Симметрия в природе. Л.: Недра, 1968, 184 с.
165. Шерватов В.Г. Гиперболические функции. М.: ГИТТЛ, 1954, 61 с.
166. Шноль С. Э. Конформационные колебания макромолекул. — В сб.: Колебательные процессы в биологических и химических средах. — М., Наука, 1967, с. 22–41.
167. Шноль С. Э. Физико-химические факторы биологической эволюции. М., Наука, 1979, 261 с.
168. Шредингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика. М.: Атомиздат, 1972, 88 с.
169. Шубников А.В., Копчик В.А. Симметрия в науке и искусстве. М.: Наука, 1972, 339 с.
170. Шувалов Л.А. Сегнетоэластики. — Известия АН СССР, т. 43, № 8, 1979, с. 1554.
171. Шулейкин В.В. Физика моря. М.: Наука, 1968, 1075 с.
172. Шульц Е. Организм как творчество. — В кн.: Вопросы теории и психологии творчества, т. 7, Харьков, 1916, с. 108–190.
173. Шунгская В.Е., Вепринцев Б.Н. Нервные клетки в культуре ткани (обзор). — В кн.: Биофизика клетки / ред. Г.М.Франк. — М., Наука, 1965, с. 239–254.
174. Шунгская В.Е., Ененко С. О. Подвижность нервных клеток в культуре. — В кн.: Движение немышечных клеток и их компонентов. Л.: Наука, 1977, с. 166–176.
175. Электронно-микроскопические изображения дислокаций и дефектов упаковки. Справочное руководство / ред. В.М.Косевич, Л.С. Палатник. М.: Наука, 1976, 224 с.
176. Энциклопедия математической физики / гл. ред. Л.Д.Фаддеев. М.: Большая российская энциклопедия, 1998, 691 с.
177. Aizu K. Possible species of ferroelastic crystals and of simultaneously ferroelectric and ferroelastic crystals. — J. Phys. Soc. Jap., 1969, v.27, №2, p.387–396.
178. Ambrose E.J. The movements of fibrocytes. — Experimental Cell Research. Suppl.8, 1961, p.54–73.
179. Bishop A.R., Schneider T. Solitons and condensed matter physics. — New York, Springer Verlag, 1978, 320 p.
180. Blake J.R., Sleight M.A. Hydromechanics of ciliar. — In: Swimming and Flying in Nature / Edit. T.Wu, C.Brokaw, C.Brennen. N.-Y.: Plenum Press, 1975, v.1, p.185–207.
181. Blank A.A. The non-euclidean geometry of binocular visual space. — Bull. Amer. Math. Soc., 1954, v. LX, p.376.
182. Blank A.A. Analysis of experiments in binocular space perception. — J. Opt. Soc. Amer., 1958, v. XLVIII, p.911–925.

183. Bulienkov N.A. Three possible branches of determinate modular generalization of crystallography. — In «Quasicrystals and Discrete Geometry»/ ed. J. Patera, Fields Institute Monographs, 1998, v. 10, p.67-134.
184. Coleman A.W. et al. Methylxanthine-induced escalation: a propagated wave phenomenon observed in skeletal muscle developing in culture. — Proc. Nat. Acad. Sci. USA, 1972, v.69, № 3, pp.613-616.
185. Cook T.A. The curves of life. L.: Constable and Co, 1914, 490 c.
186. Currie J.F. Aspects of exact dynamics for general solutions of the sine-Gordon equation with applications to domain walls. — Physical Review A, 1977, v. 16, № 4, p. 1692-1699.
187. Englander S.W., Kallenbach N.R., Huger A.J., Krumhansl J.A., Litwin S. Nature of the open state in long polynucleotide double helices: possibility of soliton excitations. — Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1980, v. 77, № 12, p. 7222-7226.
188. Fergason J.L., Brown G.H. Liquid crystals and living systems. — J. Amer. Oil. Chemists Soc., 1968, v. 45, p. 120-127.
189. Gray J. Animal locomotion. — London, William Clowes, 1968, 480 p.
190. Habenicht B. Beitrage zur mathematischen Begrundung einer Morphologie der Blatter. B. O. Sall, 1955, 200 S.
191. Hartmann M., Zool. Jahrb. Abt. Allgem. Zool. Physiol. Tiere, 1928, v. 45, p. 973.
192. Hertel H. Gekoppelte Biege- und Drehschwingungen als Antrieb. — VDI-Zeitschrift, 109, 1967, № 26, S. 1215-1221.
193. Jean R.V. Mathematical approach to pattern & form in plant growth. — N.-Y., 1984, 222 p.
194. Kienle G. Experiments concerning the non-euclidean structure of the visual space. — In: Bioastronautics. N.-Y., L.: 1964, p. 386-400.
195. Lissmann H.W. The mechanism of locomotion in gastropod molluscs. — J. Exp. Biology, v.21, 1945, № 1-2, p. 58-69.
196. Lissmann H.W. Zoology, locomotory adaptations and the problem of electric fish. — The cell and the organism, Cambridge, University Press, 1961, p.301-317.
197. Luneburg R.K. Metric methods in binocular visual perception. — In: Studies and Essays. N-Y.: Intersci. Publ., 1948, Courant anniv. vol., p. 215-239.
198. Luneburg R.K. The metric of binocular visual space. — J. Opt. Soc. Amer., 1950, v. 40, № 10, p. 627-642.
199. Meyen S.V. Plant morphology in its nomogenetical aspects. — Bot. Rev., 1973, v. 39, № 3, p. 205-260.
200. Muybridge E. Animals in motion. — N.-Y., 1957, 390 p.
201. Nady D. Symmetry: from the Birth of Greek and Aesthetics to a Modern. In: International Conference «Mathematics and Art», Moscow, 1997, p. 64-69.
202. Petukhov S.V. Non-Euclidean geometries and algorithms of living bodies. — An International Journal Computers & Mathematics with Applications, v.17, 1989, № 4-6, p. 505-534.
203. Rose J.E., Mountcastle V.B. Touch and kinesthesia. — In: Handbook of physiology. — Wash.: Amer. Physiol. Soc., 1959, v. 1, p. 387-429.
204. Schelling H. von. Experienced space and time. — In: Bioastronautics. N-Y.: 1964, p. 361.
205. Scott A.C. A Nonlinear Klein-Gordon Equation. — American Journal of Physics, v.37, 1969, № 1, p. 52-61.
206. Scott A.C. Dynamics of Davydov solitons. — Phys. Rev. A, 1982, v.26, № 1, p. 578.

207. Scott A.C. The vibrational structure of Davydov solitons. — *Phys. Scripta*, 1982, v.25, p.651-658.
208. *Solitons in Science and Engineering: Theory and Applications*/Guest ed. Lakshmanan M. Oxford: Pergamon, 1995.
209. *Swimming and flying in nature*, v.1/Ed. By T.Wy, C.Brokaw, C.Brennen; N-Y, Plenum Press, 1975, 420 p.
210. Symmetry and function of biological systems at the macromolecular level. — In: *Proc. Eleventh Nobel Symp.* 1968. — Stockholm: 1969.
211. Takeichi T., Kubota H.Y. Structural basis of the activation wave in the egg of *Xenopus laevis*. — *J. Embriol. exp. Morphol.*, 1984, v. 81, p. 1-16.
212. Thom R. Structural stability. — Mass. Benjamin Inc.: 1975, 348 p.
213. Thompson D'Arcy W. On growth and form. — Cambridge Univ. Press, 1942, 1116 p.
214. Thompson W. On the dynamical theory of heat. — *Trans. Roy. Soc. Edinb.*, 1851, v. 20, S. 261.
215. Wang X.Y. Nerve propagation and wall in liquid crystals. — *Physics letters*, v. 112A, № 8, 1985, p. 402-406.
216. Weiss A. replication and evolution in inorganic systems// *Angewandte Chemie*, № 10, 1981, S. 850-860.
217. Weiss P.A. Neuronal dynamics and neuroplasmic («axonal») flow. — In: *Cellular Dynamics of the Neuron*/Ed. by S.H.Barondes. N.Y., Academic Press, 1969, p. 3-34.
218. Weiss P.A. Neuronal dynamics and axonal flow: axonal peristalsis. — *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, v. 69, 1972, № 5, p. 1309-1312.
219. Wells G.P. How lugworms move. — *The cell and the organism*/Ed. by J.A. Ramsay & V.B.Wigglesworth. Cambridge: University Press, 1961, p. 209-233.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВСТУПИТЕЛЬНАЯ СТАТЬЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1	
ИСТОРИЯ И СВОЙСТВА СОЛИТОНОВ	10
Глава 2	
ЛОКОМОЦИИ И БИОСОЛИТОНЫ	20
2.1. Биосолитоны в локомоциях улитки и червеобразных организмов	21
2.2. Биосолитоны в локомоциях многоножек	30
2.3. Биосолитоны в локомоциях змей и рыб	34
2.4. Биосолитоны в немышечных двигательных системах	38
2.5. О телесных биологических конформациях	49
Глава 3	
СОЛИТОНЫ В КРИСТАЛЛАХ	53
3.1. Солитоны Френкеля-Конторовой	54
3.2. О магнитных и других солитонах, похожих на дислокации	68
3.3. Солитонное уравнение синус-Гордона	78
Глава 4	
БИОЛОГИЧЕСКИЕ ДОМЕНЫ И БИОСОЛИТОННЫЕ ДОМЕННЫЕ СТЕНКИ	92
4.1. Биологические домены	93
4.2. Аналогии между биодоменами и упругими доменами гетеро- фазных сплавов	102
4.3. Биогенные кристаллы	118
4.4. Колониальные организмы	123
Глава 5	
РОСТОВЫЕ ТРАНСФОРМАЦИИ И МОРФОГЕНЕЗ	128
5.1. Ростовые трансформация	128
5.2. Морфогенез	133
5.3. Деление клеток	140
5.4. О проблеме морфологических параллелизмов, законе гомологических рядов Вавилова и целостности в биологии	149
5.5. Одномерность и двухмерность в биообъектах	156

Глава 6

ЖИЗНЬ КАК ФОРМА СУЩЕСТВОВАНИЯ

СОЛИТОННОЙ ЭНЕРГИИ	165
6.1. О создании порядка в живом и биологической эволюции	165
6.2. Физические и химические аккумуляторы энергии	171
6.3. Самоорганизация, самовоспроизведение и наследование информации	172
6.4. О кооперативных формах поведения живой материи ..	190
6.5. Лево-правая диссимметрия в живом веществе	196
6.6. Солитонные среды как новая модель биологических сред	200

Глава 7

СЕНСОМОТОРНЫЕ СИСТЕМЫ И ВЫСШИЕ

ФИЗИОЛОГИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ	205
7.1. Рецепторные клетки и биосолитоны	208
7.2. Сенсорные системы	210
7.3. Мышцы	217
7.4. Нейроны	225
7.5. Координация движений и вопросы психофизики	232

Глава 8

БИОСОЛИТОНЫ В ОТДЕЛЬНЫХ

МОДЕЛЬНЫХ ЗАДАЧАХ	241
8.1. Об основах моделирования локомоций	242
8.2. Медицина и биосолитоны	246
8.3. Энергетический подход к любви, красоте и искусству	247
8.4. О биосолитонах и дистанционных воздействиях	250

Глава 9

О МОЛЕКУЛЯРНЫХ СОЛИТОНАХ ДАВЫДОВА	254
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	267
ОБ АВТОРЕ	272
AUTHOR	272
SUMMARY	273
ЛИТЕРАТУРА	276

CONTENTS

FOREWORD	3
INTRODUCTION	5
Chapter 1	
HISTORY AND PARTICULARITIES OF SOLITONS	10
Chapter 2	
LOCOMOTION AND BIOSOLITONS	20
2.1. Biosolitons in locomotions of a snail and worm-like organisms	21
2.2. Biosolitons in locomotions of millipedes	30
2.3. Biosolitons in locomotions of snakes and fishes	34
2.4. Biosolitons in locomotions of non-muscle motor systems	38
2.5. Biological bodies' conformations	49
Chapter 3	
SOLITONS IN CRYSTALS	53
3.1. Frenkel-Kontorova's solitons	54
3.2. Magnetic and other solitons, look like dislocations	68
3.3. Soliton sine-Gordon equation	78
Chapter 4	
BIOLOGICAL DOMAINS AND BIOSOLITON DOMAIN WALLS	92
4.1. Biological domains	93
4.2. Analogies between biodomains and springy domains of heterophases alloys	102
4.3. Biogenesis crystals	118
4.4. Colonial organisms	123
Chapter 5	
GROWTH' TRANSFORMATIONS AND MORPHOGENESIS	128
5.1. Growth' transformations	128
5.2. Morphogenesis	133
5.3. Fission of cells	140
5.4. The problem of morphological parallelisms, Vavilov's law of homological ranges and the wholeness in biology	149
5.5. One- and two-dimensions in biological bodies	156

Chapter 6

A LIFE AS A FORM OF EXISTENCE

OF SOLITON ENERGY	165
6.1. On making the order in living matter and biological evolution	165
6.2. Physical and chemical accumulators of energy	171
6.3. Self-organization, self-reproduction and hereditary information	172
6.4. On cooperative particularities of behaviour of living matter	190
6.5. Left-right dissymmetry in living matter	196
6.6. Solitons media as a new model of biological media	200

Chapter 7

SENSO-MOTOR SYSTEMS AND HIGHEST

PHYSIOLOGICAL FUNCTIONS	205
7.1. Receptor cells and biosolitons	208
7.2. Receptor systems	210
7.3. Muscles	217
7.4. Neurons	225
7.5. Motor motions and psycho-physics	232

Chapter 8

ADDITIONAL SECTIONS	241
8.1. On bases of modeling of locomotions	242
8.2. Medicine and biosolitons	246
8.3. An energetical approach to love, beauty and art	247
8.4. On biosolitons and remote influences	250

Chapter 9

ON MOLECULAR DAVYDOV'S SOLITONS	254
CONCLUSION	267
AUTHOR	272
SUMMARY IN ENGLISH	273
LITERATURE	276

Что такое жизнь с точки зрения физики? Имеет ли живое вещество энергетическую специфику? Можно ли определить жизнь как форму существования солитонной энергии? Что общего между живыми организмами и кристаллами? Эти и другие важные вопросы связаны с фундаментальным объектом современного математического естествознания — солитонами. Солитоны можно рассматривать как автолокализованные устойчивые густки энергии, обладающие свойствами волны и частицы одновременно. Концепция биосолитонов дает новое понимание жизни как энергетического феномена самоорганизации.

