

БИОЛОГИЯ

ПОДПИСНАЯ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНАЯ СЕРИЯ



1982/6

Г.Р.Иваницкий

БОРЬБА ИДЕЙ В БИОФИЗИКЕ



ЗНАНИЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

НОВОЕ В ЖИЗНИ, НАУКЕ, ТЕХНИКЕ

СЕРИЯ

БИОЛОГИЯ

6/1982

Издается ежемесячно с 1967 г.

Г. Р. Иваницкий,

член-корреспондент АН СССР

БОРЬБА

ИДЕЙ

В БИОФИЗИКЕ

Издательство «Знание» Москва 1982

Рецензенты: В. И. Кринский, доктор физико-математических наук; С. Э. Шноль, доктор биологических наук.

Генрих Романович ИВАНИЦКИЙ — член-корреспондент АН СССР, директор Научного центра биологических исследований АН СССР в Пушкино и Института биологической физики АН СССР, председатель Научного совета по проблемам биологической физики АН СССР, лауреат Ленинской и Государственной премий. Г. Р. Иваницкий известен в Советском Союзе и за рубежом как специалист в области математической и технической биофизики. Помимо научной работы, Генрих Романович уделяет внимание пропаганде научных достижений, он автор ряда научно-популярных статей и брошюр. В частности, его работа «В поисках третьего измерения» в сборнике «Число и мысль», вышедшего в издательстве «Знание» в 1977 году, была награждена Дипломом первой степени по итогам Всесоюзного конкурса 1978 года на лучшее произведение научно-популярной литературы.

Иваницкий Г. Р.

И 19 Борьба идей в биофизике. — М.: Знание, 1982. — 64 с. — (Новое в жизни, науке, технике. Сер. «Биология»; № 6).

11 к.

В брошюре показано, как менялся взгляд на предмет и место биофизики в естествознании по мере ее развития. Рассмотрены примеры научных разногласий между Гёте и Ньютоном, Вольта и Гальвани, Тимирязевым и Лазаревым. Даны основные положения биофизики, кристаллизовавшиеся в результате дискуссий между учеными. Рассказано об успехах биофизики наших дней и ее вкладе в медицину, сельское хозяйство и промышленные технологии.

2001040000

ББК 28.071
57.04



В начале августа 1982 г. в Москве начнет свою работу I Всесоюзный биофизический съезд. 1500 специалистов-биофизиков из всех районов Советского Союза соберутся в Московском государственном университете, чтобы обсудить проблемы современной биофизики. Цель брошюры — рассказать читателю о развитии и задачах этой увлекательной науки.

Между эмоциональным и логическим восприятием мира нет пропасти. Объем брошюры не позволяет дать систематическое изложение основных положений биофизики, поэтому возникло желание показать предмет этой науки с необычной стороны, пригласить читателя принять участие в сборке образа биофизики на основе очерков, отражающих различные ее стороны.

Хотелось дать возможность читателю взглянуть на биофизику с двух сторон: извне, чтобы увидеть макродинамику ее развития, и изнутри, чтобы рассмотреть те «пружины», которые меняют ее характер. Для прогнозирования будущего биофизики надо знать, как шло ее развитие в прошлом. Именно поэтому очерки имеют исторический аспект.

1. Что такое биофизика, как происходило ее формирование и развитие

Природа — некий храм, где от живых колонн
Обрывки смутных фраз исходят временами.
Как в чаще символов мы бродим в этом храме,
И взглядом родственным глядит на смертных он.

Шарль БОДЛЕР. Соответствия

Наука древних была едина, понятием «физика» (природа) обозначалась вся совокупность сведений о живой и неживой природе. В этом единстве была сила и слабость древней науки. Разделение физики на две области знания (на науку о живом и неживом) происходило постепенно, окончательное разделение произошло сравнительно недавно. Впервые термин «биология» встречается в 1802 году у французского естествоиспытателя Жана Батиста Ламарка.

Чтобы самостоятельно существовать, биология должна была определить предмет исследования, провести границу между живым и неживым. Однако все определения жизни, данные в XIX веке, сводились к тавтологии: «Жизнь — есть жизнь». Многие биологи того периода считали, что особая *жизненная сила* охраняет живое тело от действия внешних сил, стремящихся разрушить его. Живое живет по своим законам, которые к законам неживой природы совсем не имеют отношения, либо имеют, но косвенное, поэтому физика и биология — две самостоятельные и независимые науки. Биология состоит из морфологии, изучающей статическое строение живого, и физиологии, изучающей динамику живого.

Однако время от времени возникали вопросы. А так ли это на самом деле, различны ли законы для живого

и неживого? Может быть, в мире живых существ не наблюдается никаких сил, которые не были бы присущи неживой природе?

Еще в 1628 году на основе количественных измерений и применения законов гидравлики У. Гарвей объяснил механизм кровообращения. Р. Декарт и Г. Лейбниц заметили, что механические законы идентичны для неодушевленной материи и для живых систем. А. Лавуазье и П. Лаплас показали, что нет двух различных химий для неорганических и органических тел. В основе дыхания и выделения тепла в теле человека и животных лежат такие же процессы окисления, которые происходят и вне живых организмов. Наконец, в середине XIX века Дю-Буа-Реймон в книге о животном электричестве сделал вывод: «В материальных частичках организмов не обнаруживается никаких новых сил, которые не могли бы действовать вне их. Таким образом, нет никаких сил, которые заслуживали бы названия жизненных сил».

Стали раздаваться голоса в пользу объединения биологии и физики. Первое определение биофизики, которая должна разрушить границу между познанием живой и неживой материи, появилось в конце XIX века. В 1892 году 35-летний английский математик Карл Пирсон, известный в научных кругах своими работами по математической статистике, опубликовал философскую книгу «Грамматика науки». Эта книга принесла Пирсону не меньшую известность, чем кривые распределения случайных величин, открытые им в 1894 году и названные его именем. Пирсон придерживался субъективно-идеалистических взглядов на природу научных знаний, за что был подвергнут критике философов-материалистов, в частности, развернутая критика его взглядов содержится в книге В. И. Ленина «Материализм и эмпириокритицизм».

Книга Пирсона оказала влияние на последующее развитие науки, а определение биофизики, данное им, оказалось пророческим. К. Пирсон писал: «Мы не можем с полной определенностью утверждать, что жизнь есть механизм до тех пор, пока мы не в состоянии указать более точно, что именно понимаем мы под термином «механизм» в применении к органическим телам, тем не менее уже теперь представляется почти несомненным, что некоторые обобщения физики — в особен-

ности великий принцип сохранения энергии — описывают по крайней мере часть нашего чувственного опыта относительно жизненных форм. Нужна, следовательно, отрасль науки, имеющая своей задачей приложение законов неорганических явлений или физики к развитию органических форм. Такая наука, пытающаяся показать, что факты биологии — морфологии, эмбриологии и физиологии — образуют частные случаи приложения общих физических законов, получила название этиологии. Быть может, лучше было бы назвать ее биофизикой. В настоящее время биофизика еще не сделала особенно крупных успехов, но нет ничего невероятного в том, что ей принадлежит крупное будущее».

Первая четверть XX века. Некоторые ученые еще пытаются противопоставлять законы живой природы неживой, объясняя процессы жизнедеятельности действием особых факторов, которые заключены в живом и не поддаются физическому измерению. Однако методы химии, физики и математики все шире проникают в область биологии и медицины, появляется новая исследовательская техника, материалистический взгляд на живую природу становится основной философией ученых.

В 20—30-х годах в Советской России начинаются интенсивные исследования в области биофизики. Этот подъем был связан с именем академика Петра Петровича Лазарева. О биофизике П. П. Лазарев писал так: «Предметом биофизики является изучение физических и физико-химических явлений, протекающих в тканях и органах тела человека, животных и растений, и построение количественных физико-математических теорий в тех областях учения о жизни, где возможно сведение явлений на чисто физические причины». Следует обратить внимание на заключительную часть этого определения, оговорка должна означать, что это «сведение» не всегда возможно.

Середина XX века. Успехи атомной физики не могли не оказать воздействия на умы ученых, работающих во всех областях естествознания. Знаменитый датский физик Нильс Бор, один из творцов квантовой теории, в статье «Атомная физика и человеческое познание» писал: «Ни один результат биологического исследования не может быть однозначно описан иначе, как на основе понятий физики и химии». Учитывая достижения физики, возникают попытки переосмыслить предмет биофи-

зики. Американский биофизик Ю. Аккерман, автор известного в 60-х годах учебника, отметил: «Биофизика— наука, трудно доступная для людей, которые не знают биологии и физики. С точки зрения природы используемого материала биофизика определенно стоит ближе к обычной биологии, чем к физике... В отношении методологии биофизика примыкает ближе к физике, чем к биологии».

Вторая половина XX века. Уже существует Международный союз теоретической и прикладной биофизики, издаются журналы, растет число специалистов, но не прекращаются споры на тему: «Что такое биофизика?» Еще в прошлом веке в качестве противовеса витализму формировались две науки — биохимия и биофизика. Однако провести черту раздела между этими двумя науками оказалось сложно. По этому поводу академик Г. М. Франк, с именем которого связано развитие биофизики в СССР в 60—70-х годах, писал: «Биофизика не имеет присущего только ей объекта или предмета исследования, как, например, микробиология или энтомология. Эта наука скорее характерна только ей присущим физическим подходом к изучению широкого круга жизненных явлений... Особенно тесна связь, скорее даже «взаимопроращивание» биофизики и биохимии. И если изображать графически взаимоотношение биохимии и биофизики, нельзя ни в коем случае рисовать черту раздела между ними. Это будут скорее широкие кривые «распределения компетентности» с максимумами, сдвинутыми по отношению друг к другу».

Ситуация с определением биофизики стала сложнее, когда возникли науки, находящиеся в компетенции сразу трех разделов естествознания, например биофизическая химия. В 70-е годы XX века, несмотря на значительные успехи в различных областях биофизики, не было сформировано определение самого предмета этой науки.

В 1977 году профессор Л. А. Блюменфельд, возглавляющий кафедру биофизики физического факультета Московского государственного университета, в книге «Проблемы биологической физики» пишет: «Биофизика есть часть биологии, имеющая дело с физическими принципами построения и функционирования некоторых сравнительно простых биологических систем, но рассматривающая их как нечто данное и не занимающаяся

непосредственно вопросами их возникновения и эволюции».

Профессор МГУ и руководитель одной из лабораторий Института биологической физики АН СССР С. Э. Шноль в книге «Физико-химические факторы биологической эволюции» замечает: «Собственно биологической является именно теория эволюции. Однако сам ход, этапы, траектории эволюционного процесса вполне подлежат изучению с позиций математики, физики, физической химии». С. Э. Шноль в сферу изучения физики включает и эволюцию биологических систем.

Бессмысленно задавать вопрос: какие из приведенных определений биофизики следует считать правильными? Эти определения нужно рассматривать как отражение различных этапов развития науки. Так как же считать: биофизика — раздел биологии или физики? Постараемся ответить на этот вопрос.

Биофизика, как и любая другая наука, состоит из областей исследования, которые, в свою очередь, формируются из научных направлений. Рубрикация — процесс субъективный. Возможны сечения как по горизонтали, так и по вертикали (рис. 1). Горизонтальное членение отражает уровни структурной организации биоло-

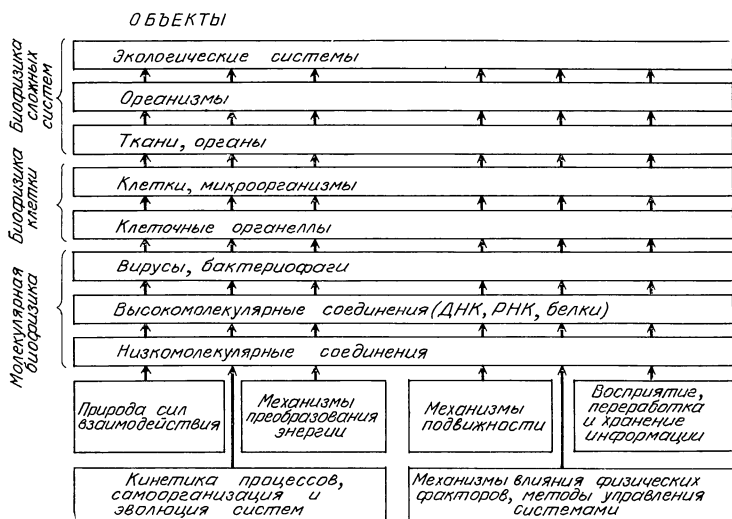


Рис. 1. Схема биофизики

гических объектов. По традиционной международной классификации, существующей двадцать лет, биофизику принято делить на три раздела: молекулярную биофизику, биофизику клетки и биофизику сложных систем.

На всех уровнях изучают физические явления, устанавливая особенности возникновения тех или иных физических закономерностей. Это второе членение — рубрикация по вертикали, т. е. по видам явлений, изучаемых на всех уровнях организации объектов. К изучаемым явлениям следует отнести: природу сил взаимодействия между объектами; механизмы преобразования энергии, подвижности объектов, восприятия, переработки и хранения информации, и т. д. Пересечение вертикального и горизонтального членения составляют области биофизических исследований.

Биофизика по набору исследуемых явлений и используемых методов тяготеет к физике, а по изучаемым объектам и целям исследования — к биологии. Следовательно, правы те, кто относит биофизику к физике, и те, кто считает биофизику разделом биологии. Если рассматривать динамику развития биофизики, то заметна тенденция расширения общих областей физики и биологии, включаемых в биофизику. Путем взаимного проникновения физики и биологии идет расширение сферы биофизики.

Биофизика превращается в теоретическую основу современной биологии — науку, изучающую физические механизмы и явления на различных уровнях структурной организации живых систем. Биофизика — не описательная наука, одна из главных ее целей — проникновение в сущность явлений путем построения иерархии математических моделей, выявляющих закономерности процессов, протекающих в живых системах. Как строятся такие модели? На этот вопрос будет дан ответ во втором разделе брошюры.

Рассмотрим, каким образом происходило формирование биофизики, как шло ее развитие. Что говорит молодая отрасль знаний — науковедение, исследующая законы возникновения, формирования и развития наук, о закономерностях развития биофизики?

В любом разделе науки существует скрытый этап зарождения, измеряемый иногда десятками лет. К этапу зарождения научных направлений историки науки всегда проявляли повышенный интерес: во-первых, это связано с изучением одной из центральных науковедческих проблем — восприятия и оценки научной средой новых идей, открытий, теоретических обобщений; во-вторых, этот период отличается драматизмом и накалом страстей, что интересно

и поучительно для любого из нас. Был такой период и в истории биофизики.

Можно выделить два фактора, регулирующих длительность этапа зарождения науки: психологический и социальный. Каждый ученый испытывает воздействие своих коллег. Либо он сопротивляется каким-либо идеям, либо испытывает сопротивление со стороны других, а чаще всего одновременно пребывает в двух указанных состояниях. «Консерватизм» научной среды — это своеобразный защитный механизм науки. Новое всегда осмысливается в рамках уже существующих теорий. В связи с этим восприятие новых идей, разрушающих привычные взгляды, вызывает сопротивление. Сопротивление тем сильнее, чем крупнее притязания «ученого-реформатора». Борьба мнений, борьба идей в науке позволяет отбирать из большого разнообразия выдвигаемых теорий, трактуемых экспериментальные факты, те, которые наилучшим образом описывают окружающий нас мир. При этом возникают неизбежные издержки — медленное признание и усвоение неожиданных, но прогрессивных направлений научного поиска.

Научная оценка — процесс в конце концов объективный и бесстрастный, но науку творят люди, и в ходе научного творчества постоянно возникают противоречия между строгой объективностью науки и субъективными особенностями творящих ее людей. В истории науки описано много случаев, когда ученые, отличавшиеся безукоризненной добросовестностью, не воспринимали и сопротивлялись распространению новых идей своих коллег. Например, Г. Гельмгольцу было отказано в публикации статьи, сообщающей о скорости проведения нервного импульса. Сам же Гельмгольц отказался читать статью Планка о втором законе термодинамики. Макс Планк с горечью писал: «Великая научная идея редко внедряется путем постепенного убеждения и обращения своих противников... В действительности дело происходит так, что оппоненты постепенно вымирают, а растущее поколение с самого начала осваивается с новой идеей».

Каждый ученый — это отражение своей эпохи, он член общества и одновременно составная часть научного коллектива (90—92% литературных ссылок каждого ученого — это ссылки на чужие работы).

Наиболее широко в науковедении используют показатели: 1) рост числа публикаций, 2) изменение числа научных сотрудников и 3) число эффективных связей между учеными в различных областях науки. Анализ коллективов, работающих в далеких друг от друга научных направлениях, дает сходный характер изменения этих показателей. При развитии любого направления на определенной стадии наблюдается экспоненциальный рост числа научных публикаций (рис. 2, а). На этой стадии в научное направление вливается большое число специалистов. Затем рост публикаций замедляется, а иногда и резко падает, и соответственно происходит отток специалистов из данного научного направления в соседние. Начинается период медленного развития, как правило, характеризующийся появлением обобщающих монографий (5—10% от публикуемых работ). Какое-либо революционизирующее открытие вновь пробуждает интерес к «забытому» научному направлению. Оно опять развивается по экспоненциальной кривой, и далее процесс повторяется. Если рассмотреть область науки, состоящую из большого числа направлений, то характер развития сохраняет

ся, но возрастают периоды стадий быстрого развития и покоя с накладывающимися на них колебаниями (рис. 2, б). Экспериментальная проверка подтверждает такую закономерность (рис. 2, г). Почему кривая имеет такой вид, мы объясним во втором разделе.

Рассмотрим эмпирические факты, связанные с показателями продуктивности ученых. Историка науки интересует фундаментальный результат, полученный ученым; экономистов — прикладной аспект (производство новой техники, новых технологий); в науковедении в качестве измеряемого показателя продуктивности используют количество публикаций. По этому критерию распределение индивидуальных вкладов ученых подчиняется логарифмически нормальному закону распределения или, точнее, закону Ципфа—Лотки—Парето (рис. 2, в). Некоторые ученые публикуют немного статей

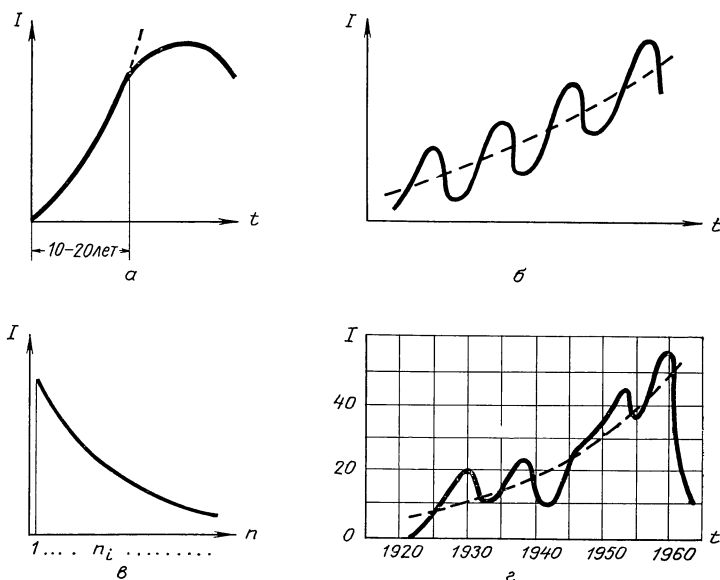


Рис. 2. Результаты науковедческого анализа: *a* — сглаженная кривая роста числа научных публикаций (числа научных сотрудников) на сравнительно малом временном интервале; *б* — кривая роста числа научных публикаций (числа научных сотрудников) на большом временном интервале; *в* — кривая продуктивности ученых (число опубликованных за одинаковый промежуток времени научных статей); по оси абсцисс отложены порядковые номера ученых, ранжированные по количеству опубликованных работ; *г* — экспериментально полученный график изменения числа публикаций за 40 лет по теме, связанной с изучением дискретного характера микромира (по А. Н. Вяльцеву). Пунктирная кривая — результат сглаживания

(или мало патентуют, или мало пишут отчетов), а другие ученые печатают много работ. Из этого, однако, не следует, что те, кто публикуют мало статей, имеют низкую научную продуктивность. Мерой продуктивности служат не только публикации, но и затраты времени на подготовку новых специалистов, число личных контактов с учеными, научно-организационная деятельность, повышающая эффективность научных исследований, или другие параметры, уровень которых рассматривается как показатель участия в научном процессе.

Вид кривой с «длинным хвостом» (рис. 2, в) затрудняет получение средних величин числа публикаций в расчете на одного специалиста. Однако с некоторыми допущениями можно считать, что в период экспоненциального развития научного направления на одного автора в среднем приходится 2,5 статьи в год. Иногда делаются попытки установить связь между возрастом ученого, числом опубликованных им работ и тем местом, которое он занял в истории науки, однако эти попытки не удовлетворяют современного исследователя. Например, у Г. Римана и Й. Фраунгофера (умерших в 39 лет) было соответственно 16 и 18 работ, у П. Н. Лебедева (прожившего 46 лет) — 22 работы, у Г. Герца (37 лет) — 25 работ, у Ж. Фуко (47 лет) — 66 работ. Известны ученые, которые оставили после себя всего 2—3 работы, например Э. Галуа, и тем не менее их имена навсегда вошли в историю науки.

Третий показатель — число эффективных связей между учеными. По мнению многих исследователей, эти связи между учеными выполняют информационную и организующую функции: во-первых, они обеспечивают существование соответствующей области науки, отделяя ее по специфике используемых методов, объектов исследования, терминологии и составу участников как от других областей науки, так и от «не-науки» (непрофессионального обсуждения проблем); во-вторых, те, что реализуют механизмы контроля за качеством научной продукции (признание, поощрение или осуждение); в-третьих, обеспечивающие связь отдельного ученого с научным миром (через организацию симпозиумов, конференций, через обмен оттисками статей, личные контакты).

Изучение научных коллективов показывает, что эффективно работающие группы исследователей в период экспоненциального роста научного направления контактируют между собой в 5 раз чаще, чем остальная масса исследователей, работающих в данной области науки, и через них проходит свыше 80% перекрестных ссылок в публикуемых работах. Время существования таких групп примерно 10 лет. Любопытно, что необходимость осуществления научных связей накладывает ограничение на размеры коллективов, внутри которых может эффективно происходить обмен информацией. Размеры такого коллектива ограничиваются обычно 100—150 специалистами

Развитие биофизики, как и любой другой науки, подчиняется перечисленным закономерностям. В целом биофизика как наука переживает этап экспоненциального развития. Однако различные области биофизики и научные направления развиваются с разной скоростью. Из направлений, которые замедлили свой рост, специалисты переходят в новые направления, находящиеся на

стадии экспоненциального роста. Приведем некоторые количественные данные.

Удвоение числа научных публикаций по биофизике в СССР происходило за последние два десятилетия каждые 5 лет, т. е. намного быстрее, чем в любой отрасли фундаментальных исследований. В 30—40-х годах в СССР работы по биофизике печатали в двух журналах: «Известия Института физики и биофизики» (редактор академик П. П. Лазарев) и «Журнал прикладной физики» (редакторы академики А. Ф. Иоффе и П. П. Лазарев). Сегодня в СССР 17 журналов печатают статьи по различным разделам биофизики. Ведущие журналы — «Биофизика», «Радиобиология», «Молекулярная биология», «Доклады Академии наук СССР». Во всем мире свыше 100 журналов печатают статьи по биофизике. По данным реферативного журнала «Биофизика» за 1973—1976 годы в ведущих журналах было опубликовано свыше 40 000 статей. Если принять, что на одного автора в среднем приходится 2,5 статьи в год, то в мире 4000—5000 специалистов эффективно работают в различных областях биофизики. Однако эти числа сильно занижены. На VII Международном биофизическом конгрессе (август, 1981) было сообщено, что во всем мире свыше 20 000 специалистов работают в области биофизики.

Анализ числа публикаций за 4 года (1973—1976) позволяет определить количественные показатели достигнутого развития и темпов относительного роста исследований в различных областях биофизики (рис. 3). Из диаграммы (см. рис. 3) видно, что в середине 70-х годов возросла скорость развития таких областей биофизики, как биологическая термодинамика (изучение общих закономерностей поведения открытых неравновесных систем), биофизика органов чувств, квантовая биофизика и т. д. Значительно медленнее развиваются радиационная биофизика, биофизика фотосинтеза и раздел молекулярной биофизики, изучающий структуру и функцию белков и нуклеиновых кислот. *С чем связано уменьшение темпов развития некоторых областей биофизики?*

Максимальная скорость развития радиационной биофизики приходилась на 50—60-е годы — начало широкого освоения атомной энергии. В этот период требовались обоснованные рекомендации по защите живых си-

стем от ионизирующих излучений, а также по использованию этих излучений для воздействия на живые организмы и растения, например, для целей селекции в сельском хозяйстве. Дальнейшие успехи в развитии радиационной биофизики были связаны с открытиями в других областях биофизики и биохимии. Поэтому к середине 70-х годов наблюдался отток специалистов из радиационной биофизики в другие направления.

В настоящее время в связи с активной деятельно-

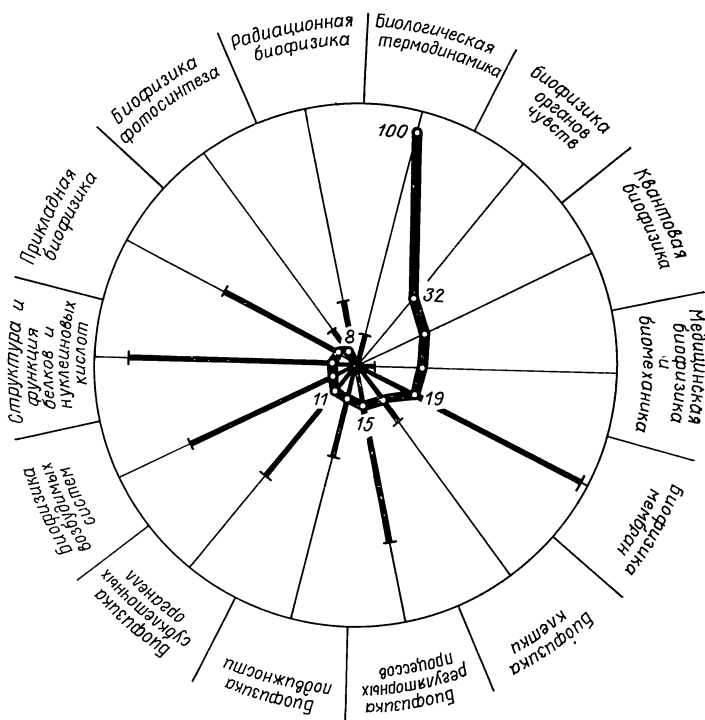


Рис. 3. Результаты анализа распределения числа публикаций по различным разделам биофизики за 4 года в середине 70-х годов (по данным П. О. Марценюк-Кухарук): круговая диаграмма распределения числа публикаций по различным областям биофизики; жирная линия — годограф скорости роста числа публикаций в различных областях биофизики. Самая большая скорость принята за 100 единиц, самая малая — за нуль, расположение по окружности названий областей биофизики ранжировано по величине скорости

стью человека, а отсюда и неизбежным загрязнением окружающей среды, в том числе различными физическими полями (электромагнитные излучения, звуковые волны), радиационная биофизика начинает ориентироваться на изучение не только высокоэнергетической ионизирующей, но и неионизирующей радиации или на исследование одновременного воздействия на живые системы этих двух видов радиации, что служит предпосылкой нового роста числа публикаций в этой области. Не случайно в рубриках V и VI Международных биофизических конгрессов (1975, 1978) появился вместо названия «Радиационная биофизика» новый раздел «Окружающая среда».

Уменьшение числа публикаций в области фотосинтеза связано с тем, что большая часть этапов фотосинтеза к середине 70-х годов была исследована и интересы специалистов, работавших в этой области, сместились в сторону биофизики мембран и субклеточных органелл. Уменьшение числа публикаций в области изучения структуры и функции белков и нуклеиновых кислот, происходящее на 1975—1976 годы, определяется не замедлением развития этого направления исследований, а тем, что образовалась новая область науки — молекулярная биология, поэтому работы этого направления были в значительной степени исключены из раздела «Биофизика».

Следует сделать три замечания: во-первых, значения количественных показателей зависят от рубрикации; во-вторых, биофизика, как и любая другая наука, — это динамическая система, поэтому приведенные показатели справедливы для ограниченного временного интервала; в-третьих, закон экспоненциального роста справедлив лишь при усреднении, поэтому использование статистического материала за 4 года может оказаться недостаточным для достоверных выводов. А чтобы выявить количественную картину развития биофизики в начале 80-х годов, необходимо было бы вновь проделать трудоемкую работу по анализу числа публикаций. Такие прогностические данные полезны, ибо они позволяют правильно ориентироваться студентам при их специализации и аспирантам при выборе тем диссертаций; дают возможность учитывать опережающие потребности в специалистах для различных областей биофизики.

Как формировались кадры биофизики?

На первых этапах развития биофизики пополнение ее кадрами шло за счет притока из смежных областей науки. В дореволюционной России вопросы биофизики привлекали внимание крупнейших ученых: И. М. Сеченова, А. Ф. Веригу, А. Ф. Самойлова, Н. Е. Введенского, А. А. Ухтомского, В. Ю. Чаговца, С. Ф. Штейна, Н. А. Умова, К. А. Тимирязева, П. П. Лазарева, В. И. Вернадского.

Еще в XVIII веке Даниил Бернулли писал Эйлеру: «Я желал бы, чтобы в Петербурге были медики, знающие начала математики, в особенности же — механику и гидравлику». Естественно, что эти специалисты приходили из физики или медицины, но через стадию получения двойного образования, оканчивая два факультета — физический и медицинский, либо путем дополнительного самообразования, стажирясь в физических и физиологических лабораториях. Приведем несколько примеров.

Петр Петрович Лазарев (1878—1942) — крупный биофизик, академик, по его инициативе в 1919 году в России организован Институт физики и биофизики, на основе которого затем был создан широко известный Физический институт АН СССР им. П. Н. Лебедева. Лазарев после окончания гимназии поступил на медицинский факультет Московского университета. С отличием окончив медицинский факультет, через два года он одновременно сдал два экзамена: один на ученую степень доктора медицины, а второй — за весь курс физико-математического факультета университета. В 1912 году он был избран профессором физики Московского высшего технического училища, ныне носящего имя Н. Э. Баумана, а с 1919 года стал директором Института биофизики при Наркомздраве.

Глеб Михайлович Франк (1904—1976) — академик, трижды лауреат Государственной премии, с 1957 года — директор Института биологической физики АН СССР, директор-организатор Научного центра биологических исследований АН СССР в Пущино. Франк окончил естественное отделение Таврического (Крымского) государственного университета. В период учебы в университете и в аспирантуре занимался исследовательской работой под руководством известного биолога профессора А. Г. Гурвича, а с 1929 года работал в Физико-техническом институте в Ленинграде у физика академика А. Ф. Иоффе, который вырастил поколение замечательных советских ученых. Кроме того, следует отметить влияние на образование Франка его отца — профессора математики.

Любопытна трансформация специальности крупного немецкого ученого Германа Гельмгольца (1821—1894), заложившего основы биофизики органов чувств, мышечного сокращения и возбудимых систем. Он окончил Военно-медицинский институт в Берлине и шесть лет работал врачом, затем преподавал и занимался исследовательской работой как физиолог в различных университетах Германии (Кенигсберг — 6 лет, Бонн — 3 года, Гейдельберг —

13 лет). После этого 7 лет преподавал физику в Берлинском университете, а с 1888 года был директором Физико-технического института в Берлине.

Такой динамизм и разносторонний характер интересов свойствен многим ученым. Альберт Сент-Дьерди — известный венгерский биофизик и биохимик (иностранный член АН СССР) в автобиографической статье писал: «Помнится, мои гистологические исследования продвигались вполне успешно, но на третьем году изучения медицины морфология перестала удовлетворять меня — она мало что говорила мне о живом. Я принялся за физиологию... Я хотел понять, что такое жизнь. Физиология казалась мне невероятно сложной, и я занялся фармакологией: здесь можно было подступиться если не к пациенту, то к лекарству. Вскоре я убедился, что этого мало. И я переметнулся в бактериологию, но бактерии тоже не лыком шиты. Я взялся за физическую химию, то есть за молекулы, которые в то время считались самой малой единицей. Несколько позже я пришел к выводу, что и молекулы слишком сложны, и принялся за электрон... я решил одолеть эту лестницу — начиная от электронов, через более сложные системы, с надеждой выйти когда-нибудь на клеточный уровень организации. Видите, линия моей внутренней жизни представляет собой почти правильную синусоиду».

Науковеды утверждают, что каждые пять лет активно работающий специалист меняет направление своих исследований.

Планомерная подготовка кадров биофизиков началась в первые годы Советской власти. Первый курс под названием «Биофизика» был прочитан П. П. Лазаревым для врачей при клинике Московского университета в 1922 году, затем для врачей при Государственном институте физиологии и ортопедии, а в 1927 году — для студентов физико-математического факультета Ленинградского политехнического института. К концу 30-х годов стали читать отдельные главы биофизики в других учебных заведениях.

В 1953 году в СССР была организована первая специализированная кафедра биофизики на биолого-почвенном факультете Московского государственного университета. В 1959 году создана кафедра на физическом факультете МГУ, затем были созданы специализированные кафедры биофизики в Московском физико-техническом институте, в ряде медицинских высших учебных заведений и университетов по всей стране. В настоящее время свыше 25 кафедр готовят специалистов-биофизиков.

Становление отечественной биофизики повлияло на развитие этой науки в других странах. После создания в 1919 году первого Института биофизики в нашей стра-

не биофизика получила «права гражданства» во всем мире. Во многих научных институтах Америки возникают биофизические отделы, в конце 20-х годов в Германии организуется Институт биофизики. В 1936 году в СССР в составе Общества испытателей природы с целью взаимодействия биофизиков выделилась специальная секция. Организационная работа в области биофизики в тот период проводилась под руководством П. П. Лазарева. Развертывание работ во вновь созданном в 1952 году Институте биологической физики АН СССР стимулировало создание в 1961 году Международного союза теоретической и прикладной биофизики. У колыбели организации этого союза находились А. Ф. Иоффе, Г. М. Франк, А. М. Кузин. В августе 1961 года был принят устав Международного союза теоретической и прикладной биофизики. С этого момента с интервалом в три года стал проводиться Международный биофизический конгресс.

В 1971 году по инициативе академика Г. М. Франка создан координационный центр стран—участниц СЭВ по проблеме «Исследования в области биологической физики». Журнал «Студия биофизика», выпускаемый в ГДР, стал печатным органом этого центра. Страны—участницы СЭВ каждые пять лет составляют совместную программу научных исследований по различным областям биофизики. Сегодня в СССР около 70 научных учреждений имеют биофизические лаборатории. Для координации их работы в Академии наук СССР существует специальный Научный совет по биофизике, который имеет филиалы в наших республиках и крупных районах РСФСР.

Научный совет решает множество задач, главные из которых следующие: 1) содействие развитию экспериментальной и теоретической биофизики с целью решения важнейших задач; 2) стимулирование биофизических исследований в каждом районе нашей страны, улучшение координации между исследовательскими группами и лабораториями; 3) улучшение подготовки кадров биофизики, организация помощи высшей и средней школе в преподавании; 4) установление и развитие международных связей между учеными биофизиками, улучшение обмена научной информацией, содействие лучшему взаимопониманию между государствами через совместные действия ученых разных стран и, наконец, использование средств массовой информации для предотвращения крупных хозяйственных ошибок, которые могут иметь серьезные последствия для людей.

2. Математическое моделирование.

Можно ли на основе методов,
разработанных в биофизике,
объяснить динамику
ее собственного развития?

Океан — источник электрических, магнитных,
гравитационных импульсов — говорил как будто
бы на математическом языке.

Станислав ЛЕМ. Солярис

Как отмечалось, одна из главных целей биофизики— это проникновение в сущность биологических явлений на основе построения математических моделей, выявляющих закономерности процессов, протекающих в живых системах. Использование математических методов в биологии своими корнями уходит в далекую от нас историю.

Леонардо из Пизы (р. ок. 1170 — ум. ок. 1228) — итальянский математик, известный больше по прозвищу Фибоначчи (что означает сын Боначчи), в 1202 году опубликовал книгу «Трактат о счете», которая содержала все арифметические и алгебраические сведения того времени, вплоть до решения квадратных уравнений, по этой книге европейцы познакомились с арабскими (индусскими) цифрами. Однако в данном случае важнее отметить, что в ней впервые была рассмотрена с позиций математики биологическая задача: сколько кроликов рождается в один год от одной пары?

«Природа кроликов такова, — пишет Фибоначчи,— что через месяц пара кроликов производит на свет другую пару, а рожают кролики со второго месяца после своего рождения. Так как первая пара в первом месяце дает потомство, то необходимо их количество удвоить, и в этом месяце окажутся две пары; из них одна пара, а именно, первая, принесет потомство и в следующем месяце, таким образом, во втором месяце оказываются 3 пары; из них в следующем месяце 2 пары дадут новое потомство и т. д.». Таким образом получим ряд чисел:

1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, 233, 377.

Два первых числа соответствуют началу размножения, 12 последующих — месячному приросту поголовья кроликов. Каждый последующий член этого ряда равен сумме двух предыдущих. Этот ряд вошел в историю как ряд Фибоначчи, а члены ряда получили название чисел Фибоначчи. Это была первая, дошедшая до нас математическая модель биологического процесса.

Вторая важная работа из этого ряда принадлежала итальянцу Джованни Борелли (1608—1679) — ученику Галилея, одному из крупных ученых XVII века. Его книга «О движении животных» в двух томах была обнародована уже после его смерти. В первом томе описывались строение и форма различных мышц человека и животных. Во втором — на основе механических аналогий и геометрических построений рассматривались сокращение мышц, движение сердца, циркуляция крови, пищеварение. Это был первый капитальный труд по биомеханике.

Дальнейшие математические успехи в биологии были связаны с открытиями в самой математике XVII века, в частности, с разработкой И. Ньютоном и Г. В. Лейбницем метода анализа бесконечно малых величин (основ дифференциального и интегрального исчисления). Математика постепенно превращалась из собрания теорем в инструмент познания динамических процессов.

Следует упомянуть одну из работ замечательного математика Леонардо Эйлера (1707—1783), научная деятельность которого была тесно связана с Россией. Он создал математическую модель системы кровообращения.

Значительным этапом в развитии математического моделирования в XIX веке были работы Гельмгольца.

XX век открывается работами П. П. Лазарева по созданию математических моделей ионного возбуждения в процессах зрения. В 20-х годах он разработал подобные модели для слуха, обоняния и вкуса и изложил в книге «Ионная теория возбуждения».

В 1917 году англичанин д'Арси Уэнтворт Томсон опубликовал книгу «О росте и форме» (более 700 страниц). Он исследовал расположение листьев, спиральные раковины, форму яиц и рогов и множество других фрагментов живой природы, пытаясь приспособить к описанию их формы и роста методы геометрии. Книга оказа-

ла положительное влияние на последующее разумное использование математических методов в биологии.

Большое значение имела книга Альфреда И. Лотки «Элементы физической биологии», вышедшая в 1924 году. Грандиозная по своим замыслам, она была близка нашим современным идеям анализа живых систем. Используя аппарат дифференциальных уравнений, он исследовал кинетику процессов живых систем на разных уровнях структурной организации, начиная от химических процессов и кончая функцией мышления.

В 1931 году в Париже вышла книга итальянского математика Вито Вольтерра «Лекции по математической борьбе за существование». Используя некоторые из дифференциальных и интегро-дифференциальных уравнений, он описал различные проявления борьбы в экологических сообществах и показал, что прирост одних видов получается благодаря гибели других. В ряде случаев такая борьба должна приводить к колебаниям численности как «хищников», так и «жертв». Эта работа продолжает оказывать влияние на развитие математических идей в биологии.

В середине XX века начинается экспоненциальный рост числа работ по математическому моделированию. Библиография по различным направлениям использования математики в биологии сегодня составляет несколько сотен работ, в том числе десятки монографий и сборников.

Статистические методы были развиты в биологии благодаря работам по генетике Р. Фишера и его последователей. Определенное влияние оказали работы Н. Рашевского и его учеников по моделированию функций нервной системы. Следует отметить ряд попыток дать кибернетическое толкование изучаемым явлениям в биологии (Н. Винер, У. Росс Эшби, Джон фон Нейман, К. Шеннон, Х. Кастлер и др.). Большую роль в развитии математической биофизики у нас в стране сыграли работы и научные семинары, проводимые Н. А. Колмогоровым, И. М. Гельфандом, М. Л. Цейтлиным, А. А. Ляпуновым, Н. В. Тимофеевым-Ресовским, М. М. Бонгардом, С. В. Фоминым, А. М. Молчановым, Д. С. Чернавским и др.

Рассмотрим подробнее идеи системного анализа, ибо они существенно повлияли на развитие математических идей в биологии.

В настоящее время складывается впечатление, что в науке процессы дифференциации превалируют над процессами синтеза. Увеличивается количество наук, все чаще встречаются названия наук с определениями, указывающими на процесс их дробления: молекулярная физика, квантовая химия, физико-химическая биология, молекулярная биофизика и т. д. Многие ученые высказывают опасения, что это приводит к потере целостного восприятия мира. Один из известных биохимиков Эрвин Чарграфф в 1975 году писал: «Излишняя дробность представления о природе, зачастую приводящая к ее полному исчезновению, делает мир похожим на Шалтая-Болтая, которого не удалось собрать; такой мир может стать еще более неуправляемым по мере того, как от континуума природы будут отламывать — «для более тщательного изучения» — кусочки все мельче и мельче... И чудесный, красочный ковер распускается по ниточкам; одну за другой нити вытаскивают, разрывают, изучают; в конце концов узор забывается и восстановить его невозможно».

Существует ли такая опасность? Анализ и синтез — две стороны познания мира. Например, если в музее нас интересует композиция и сюжет картины, то мы отходим от полотна, чтобы взглядом охватить целиком произведение искусства. Если нас интересует техника мазка, то мы подходим к картине поближе. Если интересует состояние картины, то мы вооружаемся лупой и рассматриваем микротрещины краски. Разные цели — разная степень детализации. Все зависит от постановки задачи! Изучение целого опирается на знания, полученные при исследовании его частей.

Свойства целостных биологических структур определяются свойствами составляющих их блоков. Это утверждение оказывается конструктивным, так как позволяет изучать отдельные блоки и их взаимодействие, что намного продуктивнее изучения целостной структуры. Но как из отдельных частей собрать целое?

Еще Аристотель отметил, что целое возникает в результате взаимодействия частей, поэтому целое может быть больше суммы частей. В большинстве случаев целое — это совокупность различного рода деятельности, объединение которых взаимно влияет друг на друга. Путеводная нить для сборки целого — принцип функ-

циональности — надо иметь характеристики, определяющие взаимосвязь частей в целом.

В 30-х годах нашего века Л. Берталани сформулировал идеи системного анализа, т. е. рассмотрение свойств целого через свойства его частей. При этом целостность системы объекта — основной принцип при ее исследовании. Чтобы объект исследования можно было рассматривать как систему, он должен удовлетворять следующим требованиям:

- 1) объект (целое) должен состоять из подсистем (частей);
- 2) объединение подсистем в систему должно помогать в формулировке задачи (цели исследования);
- 3) должна существовать характеристика, определяющая взаимосвязь подсистем в системе;
- 4) система должна быть частью (подсистемой) большей системы.

Расцвет системного анализа пришелся на 60—70-е годы и связан с распространением вычислительной техники.

В конце XVIII века Жорж Кювье, заложивший фундамент сравнительной анатомии и палеонтологии, говорил: «Дайте мне одну кость, и я восстановлю животное». Однако не всегда можно однозначно восстановить целое по его фрагментам. На рис. 4 приведен пример восстановления из одних и тех же фрагментов двух разных изображений. Неоднозначность решения часто возникает в научных исследованиях.

Чтобы из множества фрагментов собрать целое, надо соединить фрагменты в определенной последовательности, например линейной (буквы в слове или нуклеотиды в цепи ДНК), двумерной (цифры в таблице, элементы мозаики в картине, клетки в полоске ткани) или трехмерной (детали в машине, органы и их компоненты в организме).

Как быть, если нам не полностью известны характеристики, определяющие взаимосвязь частей в целом?

В научных исследованиях так чаще всего и бывает. Как правило, имеется неполная информация о целом, его частях и о связях между частями, и тем не менее необходимо найти целое. Аналитического решения такая задача не имеет. Решение задачи «в лоб» в некоторых случаях может дать метод перебора. Перебор вариантов есть следствие недостаточности информации.

Это обменная операция — обменивается неосведомленность на время («чем меньше знаем, тем дольше ищем»). Суть перебора состоит в том, что развивается какая-либо линия в решении задачи методом последовательных проб (подстановок) до тех пор, пока не будет найдено решение. Если поиск заходит в тупик, то выбирается следующая линия решения, и так до тех пор, пока решение не будет найдено (или не будут перебраны все варианты). Нельзя ли операцию перебора поручить вычислительной машине? Можно, но даже на самых современных вычислительных машинах нельзя перебрать варианты синтеза при исследовании биологических систем без введения правил, ограничивающих перебор. Например, если действовать методом перебора, то для создания модели трехмерной структуры молекулы сравнительно простого белка — лизоцима потребовалось бы просмотреть около 10^{120} вариантов; трехмерной структуры бактериальной клетки «кишечной палочки» необходимо проанализировать 10^{20000} вариантов и т. д.

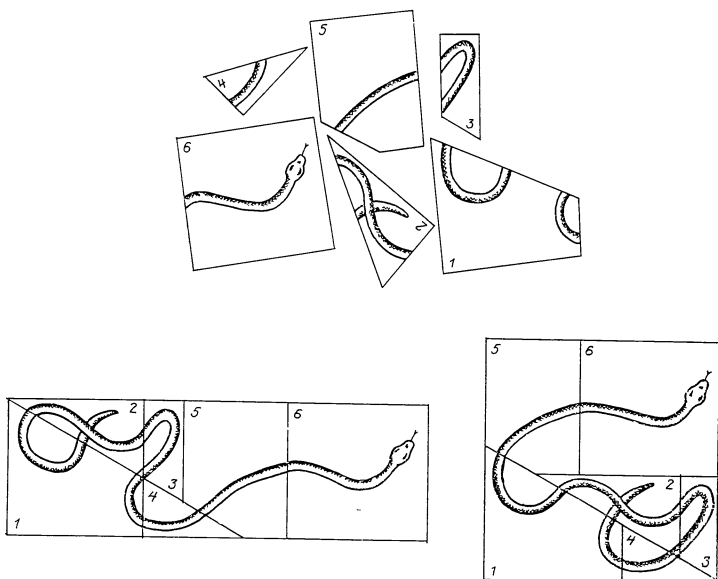


Рис. 4. Восстановление из одного набора фрагментов двух разных геометрических фигур и рисунков

Основная задача исследований — это борьба с перебором, т. е. поиск ограничивающих «слепой» перебор правил. Законы природы — это совокупность правил, запрещающих определенные варианты перестановок и сочетаний, получаемых из комбинаторного анализа. При исследовании каждый бит дополнительной информации сокращает перебор. В исследованиях имеют дело с несколькими каналами получения информации (научный эксперимент, известные законы природы, осведомленный консультант и т. д.). Системный подход в технике состоит в синтезе системы с заданными свойствами на основе известного функционального набора элементов. Такой синтез можно считать «прямой задачей». В биологии и физике фактически ставится «обратная задача» — по поведению уже существующей системы необходимо восстановить ее организацию.

Применение системного подхода к исследованию сложных биологических объектов состоит в последовательном использовании анализа и синтеза (рис. 5). Все

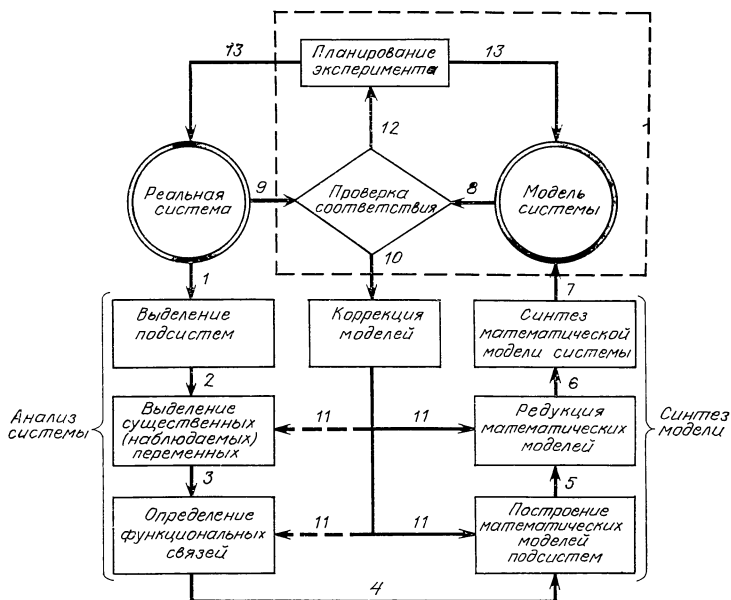


Рис. 5. Схема системного анализа при математическом моделировании динамики поведения биологических объектов

этапы анализа взаимосвязаны. При выделении подсистем сложным представляется вопрос о выборе разумного уровня детализации, необходимо отразить два-три нижележащих подсистемных уровня. Это облегчает модификацию модели для различных ситуаций, так как уточнения и введение дополнительных условий могут осуществляться на более высоких структурных уровнях. С другой стороны, использование многих иерархических уровней приводит к увеличению числа фрагментов, с которыми приходится оперировать, и усложняет задачу синтеза целого. Поскольку переменные параметры сложных объектов вместе с существенными переменными среды зачастую измеряются сотнями, осуществляется некоторое упрощенное описание реальной системы. Если реальная система достаточно сложна и непосредственная работа с ней невозможна, но имеется накопленный экспериментальный материал, реальная система может быть представлена в памяти вычислительной машины в виде архива (банка) экспериментальных данных.

Описанная стратегия математического моделирования хорошо зарекомендовала себя в биофизике и биохимии. Построены модели, объясняющие возникновение автоволновых процессов в распределенных возбудимых средах, модели различных режимов полиферментных процессов в клетке, механизмов возникновения и нарушения электрического поля сердца, механизмов узнавания объектов и т. д. Приведем пример математического моделирования. Речь пойдет об *автоволновых процессах* в биологических системах. Автоволны возникают не только в биологических, но и в химических и физических системах¹.

Каждая гипотеза, каждая теория имеют пору детства, отрочества, юности и зрелости. Эти этапы развития проходила и волновая теория. Как известно, она закладывалась трудами многих ученых. Христиан Гюйгенс еще в XVII веке рассмотрел и описал процесс движения маятника, а затем, используя эту аналогию, в 1690 году опубликовал гипотезу волнового распространения

¹ В 1980 году группе исследователей Института биологической физики АН СССР (Б. П. Белоусов, А. М. Жаботинский, А. Н. Заикин, Г. Р. Иваницкий, В. И. Кринский) была присуждена Ленинская премия за работу «Обнаружение нового класса автоволновых процессов и исследование их роли в нарушении устойчивости распределенных возбудимых систем» (*Прим. ред.*).

света. Томас Юнг сформулировал принцип интерференции (1801), заложив тем самым основы волновой теории. Огюстен Френель опубликовал в 1818 году теорию дифракции света, связав принцип Гюйгенса с идеей интерференции. Этот принцип получил название принципа Гюйгенса—Френеля. Хорошо известны опыты Френеля по дифракции световой волны, проходящей через два отверстия в экране. Г. Гельмгольц развил волновую теорию, заложив основы вихревого движения жидкости. Велики заслуги русских и советских физиков и математиков (Л. И. Мандельштама, А. А. Андропова, В. В. Шулейкина, Ю. В. Крылова и других), внесших вклад в разработку методов описания волновых процессов.

К середине XX века благодаря усилиям многих ученых волновая теория охватила упругие, гидравлические, электромагнитные и тепловые волны. Хотя в математическом описании поведения этих типов волн оставался еще ряд нерешенных задач, однако общая картина волновых явлений уже существовала. Было ясно, что во всех указанных случаях волной следовало называть возмущение, распространяющееся с конечной скоростью в пространстве и несущее с собой энергию от источника возмущения. По мере удаления от источника возмущения сфера распространения волны расширяется, что приводит к уменьшению удельной энергии волны и ее постепенному затуханию. Было дано описание вида и характера взаимодействия волн в пассивных средах.

Однако далеко не всегда среда, в которую вносится возмущение, ведет себя пассивно по отношению к введенной в нее энергии. В природе существуют такие среды, где в каждой точке пространства идут активные процессы, приводящие к появлению запасов энергии, которая может освобождаться при соответствующем возбуждении. В этих системах следует говорить не о переносе энергии при распространении волны, а об освобождении энергии. Приведем примеры подобных процессов: распространение пламени, возникновение волн возбуждения в сердце, волновое движение продуктов в химических реакторах, распространение эпидемий, экологических нашествий и т. п.

Во многих активных биологических системах (и не только в них) волны следуют одна за другой с определенным интервалом. Рассмотрим три различных системы: распространение пламени в горелке с асбестовыми

фитилями; волны возбуждения в биологической ткани; волны в химической автоколебательной реакции в тонком слое жидкости. Что общего между ними?

Представим себе горелку, устроенную следующим образом. В листе металла просверлены на некотором расстоянии отверстия, в которые вставлены асбестовые фитили, соединенные друг с другом. Концы этих фитилей погружены в ванну с густым маслом. Асбест не горит, но когда он пропитается маслом, то представляет собой фитиль, который можно поджечь. Скорость горения асбестового фитиля, пропитанного маслом, выше, чем скорость поступления горючего вещества (масла). Поэтому фитиль через некоторое время погаснет. После этого он за счет диффузии впитает масло, и его вновь можно поджечь и т. д. Таким образом, фитиль может находиться в трех состояниях: горение, пауза (рефракторный период, когда засасывается масло); готовность вновь вспыхнуть, если будет произведен поджог (стадия покоя). Если в такой демонстрационной горелке поджечь линию фитилей, то от них загорится следующая линия. Первая линия вскоре погаснет (выгорит масло), но к этому времени вспыхнет вторая линия и т. д., и по всей горелке пробежит фронт пламени. Если такую горелку замкнуть в кольцо, то по ней будут непрерывно пробегать волны пламени (рис. 6).

Подобная ситуация наблюдается в живой ткани, состоящей из возбудимых клеток, — ткань сердца, мозга, сетчатки и другие ткани организма. Каждая клетка окружена мембраной. Благодаря активному транспорту через мембрану одних ионов в одном направлении, других в другом устанавливается определенная концентрация ионов снаружи и внутри клетки. Например, содержание ионов K^+ внутри клеток значительно больше, чем в окружающей среде, а содержание Na^+ — гораздо меньше. Так как ионы заряжены, то на мембране возникает разность потенциалов 80—100 мВ. Возникновение волн возбуждения связано с изменением этих потенциалов. Клетку можно возбудить, например, приложив электрический потенциал. Если величина изменения потенциала возбуждения превышает некоторое пороговое значение, то возникает импульс возбуждения с амплитудой до 100 мВ (рис. 7). Возникновение импульса связано с деполяризацией мембраны, т. е. с ее перезарядкой в месте возбуждения. Из клетки выходят ионы

K^+ , а вместо них входят ионы Na^+ . В результате внутренняя часть мембраны заряжается положительно, а внешняя отрицательно. Возникший импульс возбуждает соседнюю клетку, изменяя проницаемость ее мембраны, и т. д. Через несколько миллисекунд непосредственно позади движущегося импульса изменяются направления потоков K^+ и Na^+ , и мембрана возвращается в исходное состояние. Движение импульса возбуждения по ткани сходно с распространением фронта пламени в горелке с асбестовыми фитилями.

Третья система — автоколебательные химические реакции. Эти реакции в 1959 году открыты Б. П. Белоусовым и затем по инициативе С. Э. Шноля исследованы в Институте биологической физики АН СССР А. М. Жаботинским и А. Н. Заикиным.

Опишем одну из реакций (в настоящее время известен класс таких реакций) — окисление лимонной кислоты броматом в присутствии катализатора — солей церия — металла переменной валентности. Сначала бромат окисляет ионы церия, а сам превращается в гипобромит. Гипобромит бромит лимонную кислоту, а бромпроизводное восстанавливает

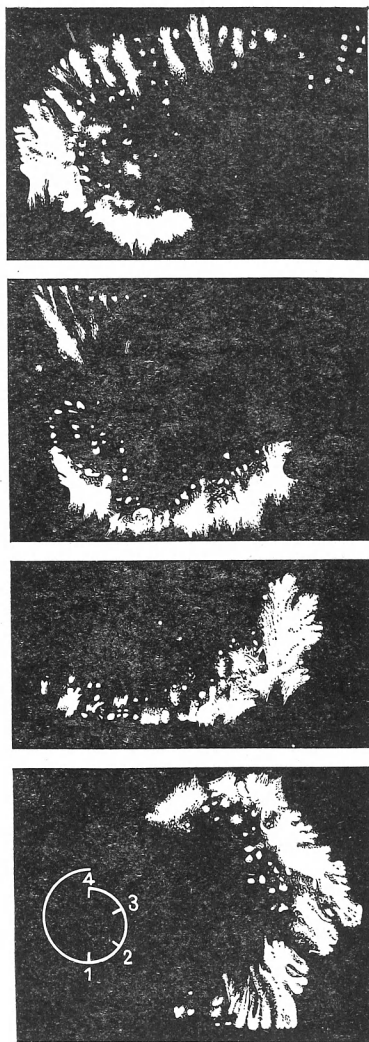


Рис. 6. Волна пламени, распространяющаяся по кольцевой горелке

ион церия, давая бромид-ион, способный тормозить реакцию ионов трехвалентных ионов церия с броматом. Роль химического маятника в этой реакции выполняют ионы металла переменной валентности. Попеременное изменение степени окисления церия проявляется в периодическом изменении окраски раствора (см. рисунок на обложке).

Все эти системы можно назвать распределенными активными средами. Хотя в каждом из этих случаев разные способы возбуждения, отличные друг от друга источники энергии и разные методы освобождения и восстановления энергии, но математическая модель явления одна и та же. В таких системах следуют друг за другом два типа влияющих друг на друга волн: волны возбуждения и волны восстановления, поэтому математической моделью поведения такой возбудимой среды служит система из двух нелинейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = D_E \Delta E + f(E, g), \quad (1)$$

$$\frac{\partial g}{\partial t} = D_g \Delta g + \varphi(E, g),$$

где E — энергия горения (в модели распространения пламени); разность потенциалов на мембране клеток (в модели возбуждения миокарда сердца); концентрация активных радикалов (в реакции Белоусова—Жаботинского);

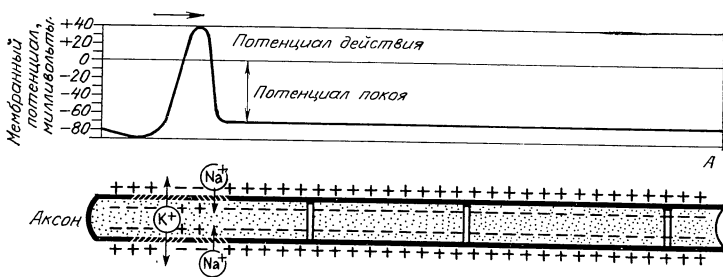


Рис. 7. Распространение электрохимической волны в возбудимых биологических тканях

g — необходимое количество горючего вещества (в модели распространения пламени); трансмембранная проводимость клеток (в модели возбуждения миокарда); концентрация окисленной формы катализатора (в реакции Белоусова—Жаботинского);

D_E, D_g — коэффициенты диффузии;
 t — время;

$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ — оператор Лапласа;

$f(E, g), \varphi(E, g)$ — функции, описывающие взаимное влияние волн.

Каждый элемент такой среды — отдельный фитиль в горелке, отдельные возбудимые клетки в миокарде сердца, элементарный (точечный) объем в химической реакции — обладает следующими свойствами:

1) эти элементы имеют запас энергии (либо в форме горючего вещества, либо в форме трансмембранных потенциалов или в форме окисленного катализатора);

2) при возбуждении эта энергия расходуется и элемент переходит из возбужденного в невозбужденное состояние;

3) затем наступает период восстановления запасов энергии (закачки горючего вещества; восстановления трансмембранного потенциала; увеличения концентрации активных радикалов катализатора);

4) после этого элемент может быть возбужден вновь принудительно, от соседних элементов, либо возбудится сам, если он имеет характеристики автогенератора.

Чтобы понять кинетику этих процессов, определить вид и характер взаимодействия волновых структур, возникающих в таких системах, необходимо решить систему уравнений (1) и сравнить полученные решения с поведением реальных систем. Трудности решения на универсальных цифровых вычислительных машинах нелинейных дифференциальных уравнений с частными производными общеизвестны. Эти трудности растут с увеличением числа переменных и точности вычислений. Чтобы избежать их, в соответствии со схемой (см. рис. 5) система была разбита на два уровня: во-первых, на точечные элементы (исследовали независимо кинетику работы одного элемента); во-вторых, на медленные и быстрые процессы, которые изучали отдельно для каждого элемента.

Таким образом, каждый элемент системы мог быть представлен в виде дискретного автомата с фиксированным числом состояний. Из набора таких точечных автоматов собиралась матрица (мозаичное панно), в которой учитывалось взаимодействие точечных автоматов (элементов). Такая матрица моделировалась на ЭВМ и описывала поведение возбудимой активной среды.

По-видимому, первая простейшая модель возбудимой среды была предложена Н. Винером и А. Розенблумом в 1946 году. Возбудимую среду рассматривали как множество дискретных элементов (клеток) на плоскости. Далее вводили формальные гипотезы о связях между соседними элементами и о поведении каждого элемента как конечного автомата с двумя фиксирован-

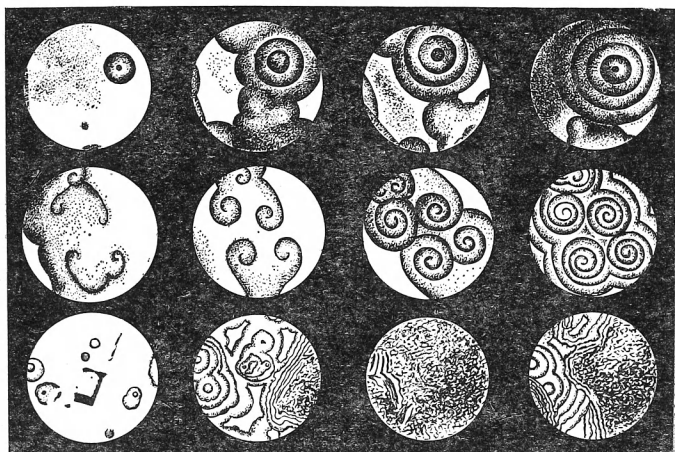


Рис. 8. Последовательные стадии развития автоволновых процессов в химической распределенной автоколебательной реакции Белоусова—Жаботинского: верхний ряд — взаимодействие ведущих центров. Такие центры (автогенераторы) спонтанно возникают в местах с резкой неоднородностью (например, начальный избыток неокисленной формы катализатора); средний ряд — взаимодействие ревербераторов. Такие виды волн возникают при разрывах фронта распространяющейся волны; нижний ряд — эволюционирование процесса как результат взаимодействия источников возбуждения (автогенераторов), создающих автоволны с разной частотой. В конкуренции всегда выигрывают высокочастотные автогенераторы, поэтому возникает «мелкозернистая» структура взаимодействия волн

ными состояниями. Однако анализ кинетики точечных элементов показал, что для описания процессов в приведенных выше системах двух состояний недостаточно.

При учете феноменологии явления В. И. Кринским была введена конструкция автомата, имеющего три состояния: возбуждение, рефрактерность (снижение возбудимости) и покой. На такой модели удалось выявить условия, при которых могут существовать процессы с многократным прохождением волны. Оказалось, что причиной возникновения различных автоволновых процессов в системе являются локальные возмущения динамических параметров. В неоднородной среде (например, по длительности рефрактерности) при определенной частоте возбуждающих импульсов возникают разрывы волновых фронтов.

Рассмотренная выше автоматная модель достаточно абстрактна и содержит упрощения по отношению к реальным активным средам, однако она отражает специфику их поведения. Предсказанные моделью эффекты были экспериментально обнаружены во всех видах возбудимых сред. Функциональное и структурное сходство системы, рассмотренной в модели, и реальной химической системы проявилось в их одинаковом поведении.

Система (плоская или объемная), составленная из таких элементов, обладает интересными свойствами (рис. 8). В ней могут спонтанно возникать вихри возбуждений — ведущие центры (концентрические волны), ревербераторы (спиральные волны). При этом сталкивающиеся волны уничтожают друг друга (причем те волны, которые идут с более высокой частотой, уничтожают низкочастотные, здесь не бывает отражений от границ среды), системы волн могут эволюционировать, создавая мелкозернистую структуру, и т. д. Подобные явления возникают в сердечной ткани (рис. 9).

Создание и исследование моделей этих явлений позволили объяснить механизм возникновения тахикардии (временный сбой нормального ритма сердца), фибрилляции (частая хаотическая пульсация сердца). Теперь, понимая механизм явления, можно вести направленный отбор веществ, препятствующих возникновению фибрилляции.

После опубликования работ по автоволновым процессам аналогичные явления были обнаружены во многих системах: в сетчатке глаза, при изучении волн рас-

пространяющейся депрессии в головном мозге, при изучении самосборки многоклеточных организмов, в полупроводниках и химических реакторах. Таким образом, удалось выявить общий вид волновых процессов, характерный для всех распределенных возбудимых сред.

Рассмотрим другой пример использования описанной выше стратегии моделирования. Методы, разработанные в биофизике, могут представлять интерес для науковедения.

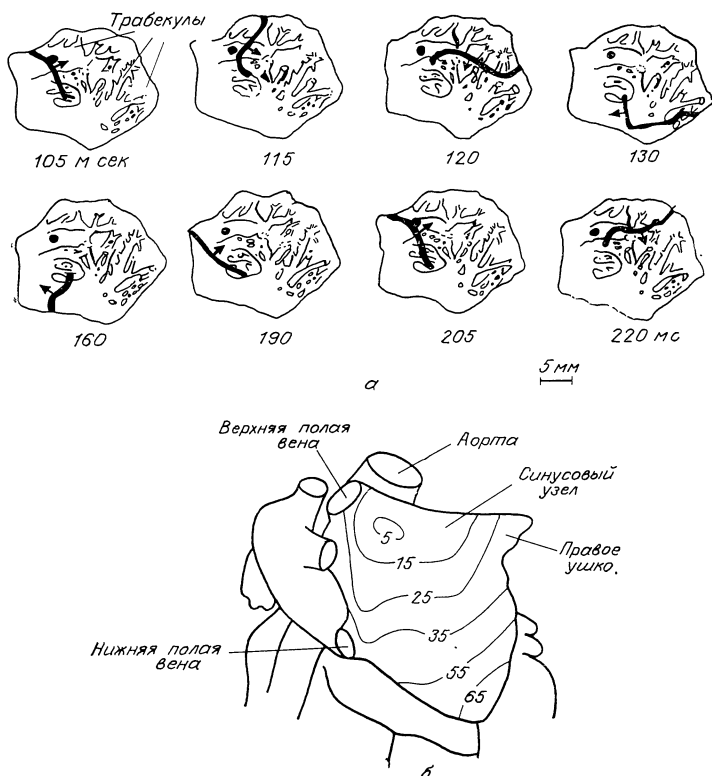


Рис. 9. Ревербераторы в полоске сердечной ткани при экспериментально вызванной аритмии (а). Показаны последовательные положения фронта вращающейся спиральной волны (толстая линия). Цифры — время в миллисекундах (по М. Аллесия). Для сравнения внизу приведено нормальное распространение волн в правом предсердии (б). При нормальной работе сердца существует только один ведущий центр — синусный узел

Попытаемся определить, какие данные следует заложить в модель, чтобы изменение количества научной продукции при взаимодействии двух областей науки соответствовало кривой, показанной на рис. 2, б. На основе анализа, проведенного в первом разделе брошюры, можно записать шесть основных постулатов и составить схему взаимодействий двух областей биофизики (рис. 10):

1) количество производимой научной информации I пропорционально числу сотрудников N , работающих в данной области науки;

2) производство научной продукции (научной информации) I прямо пропорционально затратам средств (энергии) E на развитие данной области науки и обратно пропорционально удельным затратам средств на получение единицы научной информации D , например затратам на одну научную статью;

3) количество научной продукции I и количество научных сотрудников N растет пропорционально средствам E , выделенным на развитие данной области, и уменьшается пропорционально росту удельных затрат D на получение единицы продукции, так как сотрудники уходят в более перспективные направления науки;

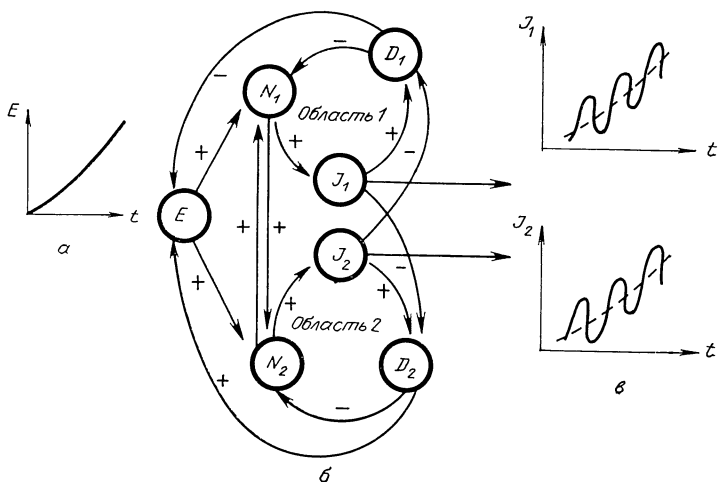


Рис. 10. Схема взаимодействия двух смежных областей науки

4) чем больше сотрудников N работает в данной области науки, тем быстрее реализуются имеющиеся идеи, что приводит к росту удельных затрат на единицу научной продукции D , к падению выхода научной продукции I и, как следствие, к миграции научных сотрудников в соседние области науки;

5) между областями науки существует положительная обратная связь. Рост количества научной продукции I (появление новых идей) в одной области науки стимулирует развитие другой области науки, так как уменьшает в ней удельные затраты на получение единицы научной продукции;

6) общее количество средств E , отпускаемых на развитие науки, растет (рис. 10, а).

На схеме (рис. 10, б) стрелками показаны связи между отмеченными в постулатах параметрами. Знак «+», стоящий рядом со стрелкой, показывает, что связь между параметрами положительная, т. е. увеличение одного параметра приводит к росту другого. Знак «—» указывает на отрицательную связь, т. е. увеличение одного параметра приводит к уменьшению другого.

Эти связи можно выразить через систему уравнений, которая определяет динамику изменения во времени выхода научной продукции:

$$\frac{dI_1}{dt} = K_1 E_1 N_1 N_2 - K_2 N_1, \quad (2)$$

$$\frac{dI_2}{dt} = K_3 E_2 N_1 N_2 - K_4 N_2,$$

где: dI_1/dt и dI_2/dt — скорости изменения количества научной продукции соответственно в области 1 и 2;

E_1, E_2 — средства, поступающие соответственно в области 1 и 2;

N_1 и N_2 — число сотрудников, работающих в областях 1 и 2;

K_1, K_2, K_3, K_4 — коэффициенты, зависящие от начальных условий.

Система уравнений (2) — нелинейная, так как в правой ее части наряду с линейными членами фигурируют произведения N_1 и N_2 . Нелинейность — следствие постулата 5.

Зависимость изменения во времени выхода научной продукции, полученная на основе решения системы

уравнений 2, показана на рис. 10, в. Как мы видим, она совпадает с кривой на рис. 2, б и в. Таким образом, можно утверждать, что построенная модель может претендовать на модель реального процесса взаимодействия двух областей науки. Очевидно, что если разорвать связь между I_1 и D_2 , то выход количества научной продукции в области 2 начнет падать. Одно из отличий системы уравнений (1) от системы уравнений (2) состоит в том, что в последней нет зависимости от пространственных координат, т. е. рассматривается поведение системы в одной точке (функция одной переменной — времени). Реально это не так, научная информация распространяется от одного ученого к другому, из одной страны в другую, но, к сожалению, в науковедении не проводилось исследований, которые позволили бы построить модель развития различных областей науки с учетом распространения информации по поверхности земного шара.

3. Кто прав? Примеры научных конфликтов

Почему два великих поэта,
Проповедника вечной любви,
Не мигают, как два пистолета?
Рифмы дружат, а люди — увы..

Андрей ВОЗНЕСЕНСКИЙ. С о б л а з н

Живая система активно реагирует не на все процессы, идущие во внешней среде, а только на те, которые оказываются для нее физиологически важными (например, сигналы об опасности, источниках пищи, о возможности размножения и т. д.). При этом величина воздействующей энергии и реакция организма не пропорциональны. Энергетически слабый, но физиологически важный раздражитель может вызвать бурную реакцию. На первый план выходят не энергетические, а информационные параметры сигналов.

В физике, как правило, пытаются исключить из рассмотрения живую систему и стремятся построить объективную модель физической среды. Биофизики, напротив, интересуются влиянием окружающей среды на живой организм и стремятся включить его в рассматриваемую систему. На основе различия исходных предпосы-

лок часто возникали научные споры между учеными, которые нередко приобретали конфликтную окраску. Развитие науки знает много таких случаев. Были и другие причины конфликтов (взаимное непонимание, неправильное определение предмета дискуссии, психологическая несовместимость и т. д.). Рассмотрим три исторических примера.

Исаак Ньютон и Иоганн Вольфганг Гёте. Создатель классической физики, с одной стороны, и поэт, «любитель и гость в науке», как он сам себя называл, с другой. Какое отношение эти два человека имеют друг к другу? Какой след могли оставить в истории биофизики их отношения? Какова основа конфликта между ними?

В данном случае нас будут интересовать работы Ньютона в области оптики. Многочисленные биографы Ньютона единодушны в том, что интерес к оптике возник у Ньютона, когда ему было не многим более двадцати лет. В 1665 году он приобрел призму, «чтобы произвести опыты со знаменитым явлением цветов». Научный мир узнал об открытии Ньютона о природе цветов из доклада, опубликованного в 1672 году и вызвавшего критические замечания ряда ученых, в частности, крупнейшего английского ученого XVII века Роберта Гука. За ним последовала долгая полемика, сильно огорчившая Ньютона, человека весьма чувствительного к критике. Дело кончилось тем, что Ньютон заперся в своей лаборатории, чтобы там в тишине завершить свою работу по оптике, которую опубликовал в Лондоне в 1704 году (годом раньше умер его главный оппонент Гук).

Опыты с призмой позволили Ньютону сделать фундаментальный вывод: «Лучи, отличающиеся по цвету, отличаются и по степени преломления». Серия опытов с двумя скрещенными призмами, разлагающими солнечный луч, убедила Ньютона в том, что цвета присутствуют в солнечном свете, а призма лишь разделяет их. Эти опыты сегодня известны всем. Однако он не обратил внимания на наличие черных полос в солнечном спектре. Это обстоятельство следует считать счастливой случайностью, так как необходимость объяснения их появления вызвала бы серьезные осложнения для построения его теории.

В другой серии опытов Ньютон разложил свет с по-

мощью призмы и пропустил его через узкую щель в экроне на вторую призму, которая его отклоняла, но не разлагала. Эти опыты имели фундаментальное значение для последующего развития спектроскопии и привели Ньютона к понятию однородного света или, как мы теперь называем, монохроматического света. Он писал: «Всякий однородный свет имеет собственную окраску, отвечающую степени его преломления, и такая окраска не может изменяться при отражениях и преломлениях». Тем самым было экспериментально подтверждено предвидение Декарта о природе цветов: тела, на которые падает свет, не производят цветов, и лучи не окрашиваются сами по себе; лучам свойственна определенная способность возбуждать в нас ощущение того или иного цвета.

После анализа цветов Ньютон перешел к синтезу цветов. Некоторые из этих опытов стали классическими и приводятся во многих практикумах. Сюда относится, например, опыт с быстро движущейся по спектру гребенкой. В этом случае за счет инерционности зрения мы не видим отдельных цветов, а видим белый свет. Все эти открытия позволили Ньютону объяснить цвета тел как результат избирательного поглощения падающего на них света.

Однако еще при жизни Ньютона были показаны опыты, в которых цвета предметов, поглощающих свет, отличались от цветов, предсказываемых его теорией. Тем не менее Ньютон на них не реагировал и считал возможным применять к цветам спектра правила смешения цветных красок и утверждал, например, что зеленый цвет спектра получается смешением желтого и синего.

Иоганн Вольфганг Гёте (1749—1832) родился через 22 года после смерти Ньютона. Как известно, Гёте был не только поэтом, но и крупным естествоиспытателем, работавшим во многих областях науки: морфологии животных и растений, геологии, метеорологии. Юрист по образованию, Гёте был в значительной мере «самоучкой» в области физики. Он до конца жизни не принадлежал к сословию ученых и не имел научных званий¹.

¹ Об оценке научного вклада И. В. Гёте см. статью: Канев И. И. Современники о научных работах Гёте. — В кн.: Научное открытие и его восприятие. М., 1971, с. 187—193.

Исходя из понятия колорита в живописи, которой Гёте увлекался с детства, он в возрасте свыше 40 лет занялся проблемой восприятия цвета — хроматикой. Гёте работал над этой проблемой почти 20 лет, затратив много труда, времени и средств. В 1810 году вышла в свет в двух томах его книга «Учение о цвете» (свыше 1400 страниц) с атласом таблиц, иллюстрирующим проделанные опыты. Гёте пришел к убеждению в ошибочности опытов Ньютона. Он отвергал его теорию, считая, что пришло время создать новое учение о цвете. Новизна концепции Гёте в том, что цвета, как таковые, не приходят в глаз извне в виде «лучей», а создаются нашим глазом. Белый свет казался Гёте первичным, простым и неразложимым, ибо глаз ощущал цвета часто без внешних раздражений, что Гёте установил самонаблюдением. Разумеется, физики восстали против учения Гёте.

Гёте, не любивший тяжб, упрямо продолжал исследования, лишь изредка отвечая своим противникам едкими эпиграммами. Из известных физиков один Томас Зеебек поддерживал научную связь с Гёте и написал для его книги две статьи. Сочувствовали Гёте его друзья и высокопоставленные покровители, мало понимавшие в науке. Следует помнить, что в начале 80-х годов Гёте был министром Веймарского княжества. Любопытно, что Гегель с уважением отнесся к учению Гёте. В своих изысканиях Гёте долгое время был одинок. Споры вокруг его учения о цвете продолжались до середины XX века. Еще при жизни Гёте некоторым ученым стало ясно, что он заложил основы учения о «физиологических цветах». Иначе говоря, он создал новую ветвь биофизической науки. В 20-е годы прошлого века два крупных физиолога — Ян Пуркинье и Иоганнес Мюллер продолжили дело Гёте, объявив себя его учениками и последователями. Мюллер в «Руководстве» указал, в чем прав Гёте, и назвал его вражду к ньютоновой теории недоразумением.

В Веймаре в доме-музее Гёте мне довелось видеть нарисованную им картину, изображающую синие тени деревьев на розовом фоне. Такую псевдоокраску в лучах заходящего солнца мы часто можем наблюдать в реальной жизни. Гёте заметил и талантливо систематизировал эти явления, но не мог дать правильного им объяснения, оно было дано его последователями.

Для создания любого цвета достаточно смешать в разных пропорциях три основных цвета — красный, зеленый и синий. В начале XIX века была выдвинута гипотеза о существовании в сетчатке глаза трех родов чувствительных приемников, реагирующих на три основных цвета, т. е. на свет различных длин волн. В 1855 году с помощью трех фильтров получили первую цветную фотографию, своеобразную заявку на цветное кино и телевидение.

Позднее, уже в XX веке, выяснилось, что каждый приемник воспринимает с максимальной чувствительностью лишь один из основных цветов, хотя и способен реагировать на более широкую область спектра. Исследования показали, что цветную картину мира, подобную той, которую видим мы, «созерцают» далеко не все живые организмы. Это зависит от числа и спектральной характеристики приемников — колбочек. Например, у лягушки и черепахи по два приемника. У лягушки максимум чувствительности обоих приемников расположен ближе к красной области спектра, так что она смотрит на мир как бы сквозь розовые очки, а черепаха — сквозь зеленые. Светочувствительные клетки морской свинки обладают одним приемником. Перед морской свинкой окружающий мир должен предстать в виде черно-белой фотографии. Зрительное восприятие дождевого червя ограничивается лишь определением направления на светящееся тело. Не только цветного, но и черно-белого изображения для червя не существует. У человека клетки сумеречного зрения — палочки — имеют также один приемник, поэтому в сумерках все предметы серые.

Гёте установил, что, если белый экран осветить синими лучами, а затем синее освещение убрать и осветить экран белым светом, то зрителям он будет представляться окрашенным в розовый цвет. Иными словами, белые предметы всегда окрашены в цвет, дополнительный к тому, который перед этим на них падал. Теперь это явление носит название цветовой адаптации и объясняется так: раздражение колбочек светом определенной длины волны приводит к уменьшению чувствительности (утомлению) соответствующего приемника (который имеет максимум чувствительности на этой длине волны), в то время как чувствительность двух других приемников остается без изменения. Так появля-

ется субъективная окраска, сдвигающая область цветоощущения человека либо в сторону красного, либо в сторону синего цвета. Подобное явление наблюдается при замене белого фона цветным.

Уменьшение чувствительности одного из приемников заставляет видеть на подкрашенном фоне такой цвет, который на белом фоне был бы совсем другим. Вспомните голубые тени в розоватых лучах заходящего солнца. Можно довольно точно рассчитать, цветом какой интенсивности следует подкрасить фон, чтобы уменьшить чувствительность одного из приемников. Тогда вся гамма красок получается уже не естественной, а как бы покрашенной одним из основных цветов.

Гёте и Ньютон работали в разных планах проблемы цветности: Гёте исследовал психофизиологию цветового зрения, Ньютон и его школа — физику внешних оптических раздражителей, вызывающих ощущение цвета. Оба взаимно дополняют друг друга, а не исключают один другого, как думал Гёте. Возможно, что вражда Гёте к Ньютону объясняется тем, что он хотел отвоевать научную территорию для своего учения о цвете, полагая, что ньютоновское учение о цвете исключает всякое иное. Образно Гёте это высказал в предисловии к своей книге, сравнивая учение Ньютона со старым замком, утратившим всякое военное значение, в котором караул несут инвалиды, мнящие себя во всеоружии. Он требовал скрыть до основания «это старое гнездо крыс и сов» и на освободившемся месте построить новую крепость.

Таким образом, в области понимания цветоощущения, несмотря на открытую вражду с учением Ньютона, столь повредившую Гёте, сам он оказался новатором в науке, и продуктивность его последователей оправдала в историческом аспекте верность его биофизической точки зрения. Гёте ставил свое учение о цвете выше всего им созданного. В старости он сказал своему секретарю: «У меня нет иллюзий по поводу того, что я создал как поэт. При мне жили отличные поэты, еще лучшие жили до меня и такие же будут жить после меня. А то, что я в моем столетии являюсь единственным знающим правду в трудном учении о цвете, этим я могу немного гордиться, и я имею, поэтому, чувство превосходства над многими». Его секретарь в своих воспоминаниях говорит, что Гёте любил свое учение как мать, которая

любит дитя тем сильнее, чем менее доброжелательны к нему соседи.

В 1959 году в американской печати появилось сенсационное сообщение: «Теория цветного зрения рухнула! Эксперименты Эдвина Г. Лэнда доказали, что глаз человека совсем не нуждается в красных световых волнах, чтобы видеть красный цвет, в оранжевых — оранжевый, в желтых — желтый. Комбинируя всего-навсего два светофильтра при фотографировании и последующем проецировании полученного черно-белого снимка на экран, Лэнд воспроизводит всю естественную гамму красок, присущую объекту».

Можно с уверенностью сказать, что в этих сообщениях было по крайней мере две неточности: во-первых, фотографии Лэнда не отражают естественную гамму красок; во-вторых, эффекты, полученные Лэндом, легко объясняются с позиции трехцветной теории зрения. Опыты Лэнда сводились к подкраске фона, что приводило к изменению чувствительности одного из приемников в нашем глазу, а соответственно к псевдоокраске.

Эти сообщения были запоздавшим на столетие эхом, пришедшим к нам из дискуссии между последователями Ньютона и Гёте.

Луиджи Гальвани и Алессандро Вольта. Два современника: профессор анатомии и молодой физик, оба жили и работали в Италии, их научный спор породил одно из крупнейших открытий XVIII века.

Луиджи Гальвани (1737—1798) начал свои анатомические исследования мышечных движений лягушек в 1773 году в Болонском университете, а в 1780 году провел первые электрофизиологические опыты. Спустя 11 лет он опубликовал книгу «Трактат о силах электричества при мышечном движении». Гальвани так описывает начало работы: «Я разрезал и препарировал лягушку... Когда один из моих помощников острием скальпеля случайно очень легко коснулся внутренних бедренных нервов этой лягушки, то немедленно все мышцы конечностей начали так сокращаться, что казались впадшими в сильнейшие тонические судороги. Другой же из них, который помогал нам в опытах по электричеству, заметил, как ему казалось, что это удастся тогда, когда из кондуктора машины извлекается искра... Я зажегся страстным желанием исследовать это явление и вынести на свет то, что было в нем сокрыто».

Гальвани исследовал различных животных и обнаружил, что сокращения вызываются не только искрами из электрической машины, но и атмосферным электричеством, искрами, извлекаемыми из лейденской банки и даже при соединении металлическим проводом мышц и нервов. Последнее он считал особенно важным. Гальвани писал: «Животным присуще электричество, которое мы позволили себе обозначить вместе с Бертолонием и другими некоторым общим названием «животного». В 1795 году Гальвани изложил гипотезу о животном электричестве. Он считал, что электричество накапливается в неразрывном состоянии в мышечных тканях; через нерв, соприкасающийся с мышцей, оно переходит в металлический провод, а через него вновь возвращается в мышцу.

Алессандро Вольта (1745—1827) был на 8 лет моложе Гальвани и принадлежал к той группе физиков, которые с недоверием относились к «животному электричеству». Он считал, что такого электричества вообще не существует, за исключением случаев «электрических рыб». Ознакомившись с работой Гальвани, Вольта решил повторить эти опыты. В результате, как пишет сам Вольта, от «недоверия он перешел к фанатизму». Это было 5 мая 1794 года. Тем не менее его полностью не покинуло чувство сомнения. Он выдвигает против «животного электричества» ряд аргументов: лягушка (ее мышцы и нервы) — это просто измерительный прибор — электрометр, но очень чувствительный; если мышцы и нервы представляют собой обкладки конденсатора, то нервы — отрицательную обкладку, а мышцы — положительную (т. е. обратно тому, что утверждает Гальвани); сокращение мышц, включенных в круговую цепь с нервами, возникает лишь в том случае, когда провод дуги, замыкающей цепь, изготовлены из разных металлов.

Через 9 дней после публичного выражения согласия с теорией Гальвани Вольта вновь перешел в наступление. Эта вторая его лекция была 14 мая 1794 года. Вольта нашел, что наш язык представляет собой чувствительный индикатор электричества. «Кисловатый» привкус при одновременном приложении к кончику языка оловянной или свинцовой пластинки, а к его середине серебряной или золотой монеты, замкнутой в цепь с первой, совпадал с «привкусом» наэлектризованного про-

водника, когда его подносили к кончику языка на такое расстояние, что искра еще не проскакивала. Вольта обнаружил: если поменять на языке местами металлические предметы, то кисловатый вкус переходит в «щелочной», т. е. отдающий горечью. На основании этого он сделал вывод, что генераторами электричества являются металлы, а не биологический объект.

Началась борьба. Гальвани и его сторонники пытались из эксперимента исключить металлические проводники, а Вольта — биологический объект. Оба они достигли своей цели.

Вольта в результате длительной серии опытов расположил металлы в ряд, построенный так, что больший эффект соответствовал металлам или их сплавам, удаленным друг от друга в этом ряду (цинк, олово, свинец, железо, латунь, бронза, медь, платина, золото, серебро, ртуть).

Гальвани в одном из опытов особым образом препарировал лягушку, к ее телу остались присоединенными лишь бедренные нервы, а обе половинки лягушки затем были изогнуты так, что нервы касались голых бедренных мышц; каждое касание вызывало вздрагивание тела лягушки.

Вольта ответил на это обобщением собственной теории. Он утверждал, что нарушение электрического равновесия наступает не только при контакте проводников первого класса, т. е. металлов, но и при контакте проводников второго класса. Короче говоря, нарушение равновесия наступает при контакте любых двух различных веществ, а следовательно, и при соприкосновении двух различных частей лягушки. Используя результаты опыта Гальвани, Вольта расширил закон контактных напряжений на обратное утверждение: если разнородность соприкасающихся частей ни в чем ином не проявляется, то сам факт нарушения электрического равновесия должен свидетельствовать об этом.

«Чаша весов» склонялась в пользу Вольта. Он продолжал свои опыты с вполне определенной целью — найти способ увеличения эффекта, который слишком слабо выражен при контакте только двух металлов. Три с половиной месяца спустя после смерти Гальвани Вольта пишет Джозефу Бэнксу — президенту Королевского общества о создании им нового прибора — «искусственного электрического органа» по аналогии с есте-

ственным электрическим органом у электрического ската. Позже этот аппарат стали называть «вольтовой колонной» или «вольтовым столбом».

Хотя Вольт выглядел победителем, но Гальвани не был побежденным, так как исключил из своих опытов все физические факторы и на биологических объектах получил искомый феномен. Поэтому спор между сторонниками Гальвани и Волта продолжался. Особенно он ожесточился в XIX столетии. Трудami ряда ученых этот спор был решен в пользу обоих талантливых ученых. Карло Маттеуччи подвел итог этой дискуссии и показал существование «животного электричества», обладающего теми же свойствами, что и обычное электричество, а не отличного от него по своей природе. Так кончилась полемика, началась эпоха электротехники и родился один из разделов биофизики — электрофизиология¹.

Климент Аркадьевич Тимирязев и Петр Петрович Лазарев. Два наших соотечественника: основоположник исследований в области фотосинтеза, крупный ботаник, химик, физиолог, с одной стороны, и крупный биофизик, фотохимик и геофизик — с другой, имена их вошли в историю нашей науки.

К. А. Тимирязев (1843—1920) — ученый с мировым именем, его взгляды формировались в 60-х годах прошлого века. Эти годы отличались подъемом революционно-демократического движения. Еще студентом К. А. Тимирязев отказался подписать обязательство не участвовать в сходках и был исключен из университета. С тех пор он всегда был верен революционным традициям передовой интеллигенции. Незадолго до смерти «дворянин» К. А. Тимирязев был избран членом Московского Совета рабочих, крестьянских и красноармейских депутатов и очень гордился этим званием. К. А. Тимирязев умер в возрасте 77 лет, не успев дописать предисловие к своей знаменитой книге «Солнце, жизнь и хлорофилл». В этом незаконченном труде имеются едкие замечания в адрес тогда молодого академика П. П. Лазарева.

П. П. Лазарев (1878—1942) — ученик великого русского физика П. Н. Лебедева (1866—1912). С именем

¹ Подробнее о дискуссии между Гальвани и Волта можно прочитать в книге: Льюэни М. История физики. М., Мир, 1970, с. 192—197 или Гальвани Л., Вольт А. Избранные работы о животном электричестве. М.-Л., 1937.

П. П. Лазарева связана первая крупная научная экспедиция, организованная молодой Советской республикой в 20-е годы, по исследованию Курской магнитной аномалии и создание отечественной отрасли промышленности по производству рентгеновского медицинского оборудования.

К. А. Тимирязев писал о П. П. Лазареве: «Но еще ранее необходимо было составить себе ясное научное представление вообще о химическом действии света, то есть о том, что до сих пор носит не совсем удачное или, вернее, совсем неудачное название фотохимии. Может быть, ни одно слово так не тормозило и не направляло в совершенно ложном направлении понимание изучаемых явлений, как это слово «фотос» — свет. Раз какое-нибудь явление признается за действие света, тем самым признается, что оно зависит от светосильности источника, от его яркости. Так, по-видимому, думает и выдающий себя за специалиста П. П. Лазарев в первом своем академическом труде».

Далее К. А. Тимирязев дает следующую сноску: «В том не дают отчета даже наши фотохимики, считающие себя авторитетами в этой области, — стоит прочесть первую страницу недавно вышедшего произведения академика П. П. Лазарева».

Через шесть страниц в этом же предисловии читаем: «В фотохимии существовал закон, что физическое действие зависит в цветных телах от лучей цветности, комплементарной цвету изменяющегося вещества, или, выражаясь проще, что действие зависит от лучей, поглощаемых данным телом. Открытие этого закона обыкновенно приписывали Гершелю (в 1842 году). Я первый в 1892 году обратил внимание на оставшиеся незамеченными фотохимиками и теоретиками фотографии исследования Гротгуса (в 1818 году в Митаве), в первый раз установившие этот закон». Далее снова имеется сноска: «В первый раз я указал на Гротгуса в 1892 году, а в 1895 году даже показывал на публичной лекции в проекции на экран его опыт. Отмечаю это потому, что господин Лазарев и его сотрудники считают этот закон и его демонстрацию на экране основным фактом в фотохимии и приписывают его Лазареву; теперь и Лазарев сам себе его приписывает».

Прежде чем рассмотреть научную сторону конфликта проанализируем его психологическую основу.

Оба действующих лица — это творческие личности. Их объединяет желание и вкус к рассмотрению нового, необычного, склонность к работе с запутанными проблемами, живость ума, высокий уровень образованности, напористость и склонность к самоутверждению. Разъединяет их время, разница в возрасте — 35 лет. Хотя на временной шкале жизненные пути К. А. Тимирязева и П. П. Лазарева перекрестились, однако, если учесть ускоряющийся темп развития науки, то эти два ученых относятся к разным научным эпохам. Этим объясняется односторонний характер конфликта. Резкая критика со стороны К. А. Тимирязева и весьма сдержанная реакция со стороны П. П. Лазарева.

К. А. Тимирязев и П. П. Лазарев в течение нескольких лет встречались на знаменитых коллоквиумах (семинарах), проводимых Н. П. Лебедевым в помещении Столетовской библиотеки в Московском университете. П. П. Лазарев посещал их еще будучи студентом медицинского факультета. Т. П. Кравец, вспоминая коллоквиумы Н. П. Лебедева, писал: «И вот в первые дни существования коллоквиума, на его собраниях, с разрешения председателя, стал появляться не принадлежащий к сотрудникам Н. П. Лебедева молодой человек (П. П. Лазарев), не принимавший участия в прениях, вообще всегда весьма оживленных, но жадно прислушивавшийся ко всем выступлениям. При попытках вовлечь его в частные разговоры он охотно шел навстречу и поражал своей феноменальной памятью, огромной уже тогда эрудицией, скромностью, доходившей до застенчивости, и горячей верой в каждое напечатанное слово».

К. А. Тимирязев к этому времени был уже профессор Московского университета. В 1903 году он был приглашен в Лондон прочесть крунианскую лекцию — честь, которой редко удостоиваются иностранные ученые. Среди студентов и профессуры он был известен своими левыми взглядами. В 1892 году его уволили из Петровской академии за пропаганду дарвинизма. У официальных властей он слыл человеком «неблагонадежным, дурного либерального толка». Князь Мещерский о нем сказал: «Профессор Петровской академии Тимирязев на казенный счет изгоняет бога из природы».

В научных статьях и дискуссиях К. А. Тимирязев отличался горячностью, непримиримостью, не искал ди-

пломатических выражений. Вот пример полемических высказываний Тимирязева этих лет, в 1883 году он писал: «В последнее время некоторые немецкие ботаники (Сакс, Ганзен, Детмер, Визнер и др.) пытаются совершенно несправедливо заслонить заслуги Сенебье и в ущерб ему выдвинуть вперед Ингенгуза. Трудно себе представить, чем они при этом руководятся. Разве только, предвкушая близкое поглощение Голландии «общегерманским отечеством», задним числом уже считают Ингенгуза немцем?»

Как известно, в 1782 году женеvский пастор Жан Сенебье, хотя не очень четко, но первым показал, что при солнечном свете зеленый лист растений перерабатывает углекислый газ, растворенный в воде, в кислород. «Не произнося слова «углерод», Сенебье открыл самый факт его круговорота». Взгляды Сенебье опередили время и противоречили существовавшим тогда воззрениям, поэтому остались незамеченными. В 1797 году голландский ученый Ингенгуз опубликовал свою работу (без ссылки на Сенебье, о работе которого он, по-видимому, не знал), в которой показал, что «улучшение» воздуха растениями происходит только на свету, а в отсутствие света они, напротив, «ухудшают» воздух подобно животным, выделяя углекислый газ. Об этом факте и пишет К. А. Тимирязев.

К. А. Тимирязев — человек большой эрудиции, великолепно знавший историю науки, очень резко реагировал на любую историческую ошибку в трактовке научного приоритета. Когда читаешь труды К. А. Тимирязева, то обращаешь внимание на их особый полемический характер.

В начале 1911 года полицейские репрессии, связанные со студенческими волнениями, вызвали протест в Московском университете. В результате по приказу министра народного просвещения ректор университета и его помощники были уволены. Тогда 124 профессора и доцента Московского университета ушли из него. Среди них были профессора К. А. Тимирязев, П. Н. Лебедев и 33-летний магистр физики приват-доцент университета П. П. Лазарев.

Дружба Тимирязева с Лебедевым имеет принципиальное значение для понимания деталей конфликта. Лебедев был наиболее талантливым русским физиком-экспериментатором конца XIX и начала XX века. Ему

принадлежали классические работы, доказавшие существование светового давления, Тимирязев же вводил физический метод в исследование физиологии растений. «Стремление стать физиком», по словам Тимирязева, было его мечтой. Он с большим уважением относился к Лебедеву и хотел, чтобы кто-то из близких их последователей продолжил развитие симбиоза физики и физиологии растений. По инициативе Тимирязева Общество содействия опытным наукам им. Леденцова выдало субсидию Лебедеву для продолжения научных работ в области физики. Уход из Московского университета, ухудшение условий работы сильно повлияли на большое сердце Лебедева. В марте 1912 года П. Н. Лебедева не стало. Лабораторию возглавил П. П. Лазарев.

Лазарев пришел в лабораторию Лебедева в 1905 году с определенными интересами в области биофизики. П. Н. Лебедев, великолепно зная физику, хуже ориентировался в химии. Лазарев же, окончив медицинский факультет, где читали большой курс химии, был для Лебедева хорошим помощником в тех проблемах, которые лежали на границе физики и химии. В отличие от Тимирязева, который хотел «проследить судьбу солнечного луча в растении до его уничтожения, то есть до его превращения в химическую работу», Лазарев хотел проследить за судьбой солнечного луча в живом глазу, т. е. «наблюдать разложение зрительного пурпура». Об этом намерении он рассказал Лебедеву в 1907 году. Лебедев не только одобрил эту работу, но и сам принял в ней активное участие. Таким образом, в дальнейшем в лаборатории, которой руководил Лебедев, а затем Лазарев, существенное место стали уделять вопросам фотохимии зрения и физиологической оптике и не привился интерес к исследованию проблем фотосинтеза и физиологии растений.

В 1917 году за научные заслуги П. П. Лазарев был избран действительным членом (ординарным академиком) Академии наук. Показательно, что в связи с разносторонней деятельностью Лазарева его рекомендовали в академики физиолог И. П. Павлов, математик и механик А. Н. Крылов, математик В. В. Стеклов, минеролог и геохимик В. И. Вернадский и химик Н. С. Курнаков.

Опальный же «красный профессор» К. А. Тимирязев был членом Королевского общества Великобритании,

почетным профессором Кэмбриджского университета, университетов в Глазго и Женеве, членом Эдинбургского и Манчестерского ботанических обществ, но так и не был избран академиком в России. Октябрьская революция, которую предсказывал и ждал Тимирязев, совершилась, когда ему было уже 74 года. Оценивая замечания К. А. Тимирязева в адрес молодого академика П. П. Лазарева, необходимо учитывать описанный выше исторический, социальный и психологический фон.

Теперь рассмотрим научную сторону этих замечаний.

Свою блестящую лекцию в Лондонском Королевском обществе 30 апреля 1903 года К. А. Тимирязев начал словами: «Когда Гулливер в первый раз осматривал академию в Лагадо, ему прежде всего бросился в глаза человек сухопарого вида, сидевший уставив глаза на огурец, запаянный в стеклянном сосуде. На вопрос Гулливера диковинный человек пояснил ему, что вот уже восемь лет, как он погружен в созерцание этого предмета в надежде разрешить задачу улавливания солнечных лучей и их дальнейшего применения. Для первого знакомства я должен откровенно признаться, что перед вами именно такой чудак. Более тридцати пяти лет провел я, уставившись если не на зеленый огурец, закупоренный в стеклянную посудину, то на нечто вполне равнозначное — на зеленый лист в стеклянной трубке, ломая себе голову над разрешением вопроса о запасании впрок солнечных лучей...»

В 1868 году Тимирязев поставил перед собой задачу «определить какие составные части солнечного луча участвуют посредственно или непосредственно в этом процессе... определить соотношение между действующей силой и произведенной работой».

В 30—40-х годах прошлого века англичанин Добэни и американец Дрэпер «экспериментально» показали, что разложение углекислоты зеленым листом идет под действием *наиболее яркой части видимого спектра солнечных лучей*, т. е. желтых лучей (центральная часть видимого спектра). Тимирязев усомнился в правильности этих выводов. Много лет он потратил на доказательство того, что в экспериментах Дрэпера была допущена методическая ошибка, и, наконец, с помощью ряда ухищрений снял спектральную кривую поглощения света хлорофиллом. Снятие этой кривой — не самоцель, а

путь к раскрытию механизмов фотосинтеза. Вот как об этом пишет сам автор: «Нужно было привлечь к объяснению явления какой-нибудь новый физический принцип... Принцип, к которому обратились, был так называемый закон сэра Джона Гершеля, гласивший, что фотохимическое действие может быть вызвано только лучами, поглощаемыми изменяющимся телом...»

П. П. Лазарев в работе «О кинетике фотохимических реакций», которую он доложил на заседании Отделения физико-математических наук Академии наук 5 февраля 1919 года, говорил: «Экспериментальные исследования показали, что скорость элементарной фотохимической реакции пропорциональна количеству поглощенной светочувствительным веществом энергии и не зависит от длины волны луча в предположении, что полоса поглощения простая и не содержит вторичных максимумов. Этот закон был выставлен мною в 1908 году как основной закон фотохимии и на его основе был сделан ряд общих приложений в биологии».

Кто же прав в этом случае? Зависит ли результат фотохимических реакций от яркости источника света или не зависит?

Дальнейшее развитие науки показало, что в утверждающей своей части правы оба ученых. Критика была основана на недоразумении, нечеткости существовавших определений и недостаточности экспериментальных данных. Тимирязев считал, что «яркость» — это физиологическое понятие, связанное с субъективным восприятием видимого глазом света. Для нашего глаза в силу определенной спектральной чувствительности колбочек наиболее ярким кажется желтый цвет. Лазарев же в работе «О кинетике фотохимических реакций» использовал понятие «яркость» в физическом. (фотометрическом), а не физиологическом смысле. В физике было принято следующее определение: яркость протяженного источника света определяется отношением силы света в данном направлении к поверхности источника, видимой по этому направлению. В этом определении нет ни слова о длине волны (или о цвете) излучаемого источником света. Таким образом, критика Тимирязева в адрес Лазарева была основана на недоразумении, так как за 60 лет развития физики понятие «яркость» наполнилось другим содержанием.

Тимирязев правильно считал, что энергия света пре-

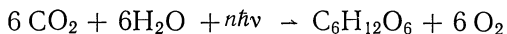
жде всего зависит от длины волны, но при этом, как и многие в то время, заблуждался, приписывая наибольшую энергию теплой (красной) области видимого спектра. Он писал: «Максимум энергии лежит, как известно, в инфракрасной части призматического спектра...»

Однако в 1888 году Генрих Герц заметил, что проскакивание искры между цинковыми шариками разрядника значительно облегчается, если один из них осветить ультрафиолетовым светом. Затем это явление было подробно изучено А. Г. Столетовым. Скорость фотоэлектронов, выбиваемых светом, *росла с увеличением частоты падающего света, а число фотоэлектронов было пропорционально интенсивности падающего света.*

В 1905 году А. Эйнштейн объяснил закономерности фотоэффекта исходя из корпускулярной теории света. Фотон, поглощаясь, отдает свою энергию $h\nu$ (h — постоянная Планка, ν — частота) электрону, и если эта энергия достаточна для того, чтобы освободить электрон от удерживающих его связей, то он выходит за пределы поверхности материала. Таким образом, прав Тимирязев — фотохимический эффект зависит от длины волны (частоты) света.

Однако, так как вероятность одновременного поглощения двух фотонов одним электроном ничтожно мала, то каждый освобожденный электрон заимствует свою энергию у одного фотона (обратное, вообще говоря, не происходит, т. е. не каждый поглощенный фотон освобождает электрон). Поэтому число освобождаемых фотоэлектронов должно быть пропорционально числу поглощенных фотонов, т. е. пропорционально интенсивности света (закон Столетова). Следовательно, Лазарев тоже прав, ибо он утверждал, что при данной длине волны, фотохимический эффект зависит от интенсивности источника (его яркости), т. е. от числа фотонов.

Таким образом, если записать укрупненно уравнение фотосинтеза



и рассмотреть третье слагаемое в левой его части, то там n — число фотонов (яркость источника), о чем писал Лазарев, и $h\nu$ — энергия фотона, на чем настаивал Тимирязев.

Тридцать пять лет посвятил К. А. Тимирязев снятию спектра поглощения хлорофилла и рассмотрению

проблем фотосинтеза. На современном спектрофотометре лаборант снимает спектр за 2—3 минуты. Наши сегодняшние колоссальные успехи по расшифровке молекулярных процессов фотосинтеза в значительной степени связаны с работой, которую выполнил К. А. Тимирязев во второй половине XIX века.

4. «Горячие точки» на границах наук. Проблемы прикладной биофизики

И мы без ханжества и лести,
За все, чем дышим и живем,
Не по-раздельному, а вместе
Свою ответственность несем.

Ярослав СМЕЛЯКОВ. Мальчишки

В 1980 году в Институте биологической физики АН СССР был подготовлен интересный документ — «Перечень прикладных задач, сформулированных на основе анализа современного развития фундаментальных биофизических исследований». Он содержал формулировку и обоснование решения более чем 90 прикладных задач.

В наше время практика стала ставить задачи, которые нельзя решить силами лишь одной отрасли знаний. При изучении каждой крупной научно-технической проблемы необходимо учитывать возможные последствия воздействия на окружающую среду и здоровье человека, поэтому особая роль биофизики (с ее системным подходом и мощным арсеналом физико-математических методов исследования) стала очевидной.

Какие же проблемы стоят сегодня перед наукой? Таких глобальных проблем четыре: во-первых, создание методов контроля, защиты и восстановления среды, необходимой для жизни человека; во-вторых, дальнейшее развитие профилактики, диагностики, поддержания и восстановления здоровья человека; в-третьих, поиск оптимальных вариантов обеспечения человека полезной для здоровья пищей; в-четвертых, выяснение путей преодоления трудностей, связанных с уменьшением запасов ископаемых (нефти, угля, металлов и т. д.). Все проблемы решаются в комплексе. В противном случае возможны серьезные ошибки. Приведем примеры.

Можно увеличить интенсивность сельского хозяйст-

ва, используя химические удобрения и пестициды¹. Однако при этом происходит смыв химических веществ в реки и озера. Такой печальный опыт уже был. Например, в Канаде по р. Ямаска с июня по конец августа 1974 года прошло 590 т вредных соединений, 50% которых приходилось на отходы сельского хозяйства и около 25% — на отходы населенных пунктов. Нитраты попадали в водоем, который служил источником питьевой воды. Интенсивная подкормка растений привела также к изменению химического состава продукта. В моркови, щедро питаемой фосфорно-калийными удобрениями, в 3—5 раз повысилось содержание калия. В других растениях изменился аминокислотный состав, увеличилось содержание соединений фосфора и азота. В результате у людей, потребляющих эти продукты и воду, возникли предпосылки для развития различных заболеваний, в частности, связанных с ухудшением переноса кислорода гемоглобином крови. А это значит, что третья проблема решалась в ущерб первой и второй. Подобные просчеты известны из практик и других стран (США, ФРГ).

В настоящее время накоплен опыт, используя который наука в состоянии предотвратить подобные последствия. Из 229 научных институтов, существующих в Академии наук СССР, свыше 80 работают над вопросами «продовольственной программы». Первая задача — разработать удобрения и пестициды селективного действия. Сегодня существует свыше 400 различных видов пестицидов. Вторая задача — законодательно регламентировать порядок (сроки, масштабы, виды) применения различных химических веществ в сельском хозяйстве.

Однако наряду с химическими методами интенсификации сельского хозяйства существуют и физические. Предпосевное облучение семян различными электромагнитными полями (например, использование ультрафиолетовых или гамма-лучей) позволяет получить прибавку к урожаю на 10—15%. Применение электромагнитных полей и ультразвука позволяет бороться с вреди-

¹ Пестициды (от латинских слов: «пестис» — зараза и «циедо» — убиваю) — ядохимикаты для борьбы с вредными насекомыми (инсектициды), с сорняками (гербициды), болезнями сельскохозяйственных растений (фунгициды) и т. д.

телями растений и т. д. Космическая съемка поверхности Земли в различных длинах электромагнитных волн позволяет следить за состоянием почв, сельскохозяйственных культур и водоемов и своевременно вмешиваться в случае опасных отклонений. Выход человека в космос изменил наше миропонимание. Человечество осознало, как мала наша Земля и вмешиваться в ее экологию нужно очень осторожно. В практической реализации этой установки большая роль принадлежит биофизике.

Системный, комплексный подход необходим при решении любых указанных выше проблем. Приведем такой пример. Недавно среди специалистов существовало мнение, что заболевание раком — это прежде всего следствие старения организма. Однако теперь полагают, что заболевания раком могут быть вызваны нарушениями в окружающей человека среде. Поэтому в значительной степени их можно предотвращать путем выявления опасных факторов. Например, наблюдается увеличение заболеваний раком легких и кишечника в развитых странах. Рост числа заболеваний раком кишечника объясняется исчезновением из рациона человека грубоволокнистой пищи и появлением в диете продуктов, содержащих вещества, из которых образуются сильные канцерогены нитрозамины, а также уменьшением в пище количества витаминов.

Выяснение причин заболеваний весьма запутано, потому что «ишемия сердца», «рак», «расстройство кровоснабжения» — каждый из этих терминов определяет множество процессов, характеризующихся нарушением регулирующих систем организма. Механизм регуляции становится ясным лишь при системном анализе, включая исследования на клеточном и молекулярном уровне.

Биофизика вносит свой вклад и в решение указанной выше четвертой проблемы. Во второй половине XX века появился новый термин — биотехнология. Этим термином определяют воздействие биологических наук, и в частности биофизики, на решение технических проблем и на улучшение промышленных технологий. Приведем два примера.

Из всех способов преобразования химической энергии в механическую живая система использует наиболее эффективный: преобразование идет при сравнительно

низких температурах, низком давлении и сравнительно высоком коэффициенте полезного действия (свыше 30%). При этом незначительное количество энергии переходит непосредственно в тепло. Биологические системы отличаются пока от существующих технических высокой «миниатюризацией» (большими концентрациями энергии), низкими коэффициентами трения и большой надежностью.

Существующие плотности энергии в технических системах, например, создаваемые электрическими и магнитными полями в газовой среде, составляют соответственно 10^2 Дж/м³ и 10^6 Дж/м³. В биологических системах в двойном электрическом слое, возникающем на границе твердой фазы и раствора электролита, плотность энергии 10^7 — 10^8 Дж/м³. Это в 10—100 раз больше, чем энергия магнитного поля в электродвигателях. При этом используется эффективный вид «смазки» — отталкивающиеся электрически заряженные молекулярные слои. Надежность биологических систем определяется самовосстановлением и иерархической системой дублирования рабочих элементов. Сердце человека (хемозлектромеханический насос) делает за жизнь свыше 10^9 сокращений. Самые надежные механические системы обеспечивают не более 10^7 переключений.

Возможность создания нового типа механохимического двигателя доказана экспериментально. Функционирование его основано на том, что равновесие между двумя формами полимера, имеющего разные механические свойства, сдвигается при изменении химического потенциала среды. Полимер находится то в растянутом, то в сжатом состоянии. Источником энергии в этих двигателях служит перенос вещества по градиенту концентраций. Химический потенциал внутри «рабочего тела» такого двигателя изменяется циклически за счет периодического протекания ферментативного процесса. Сегодня еще рано говорить о широком использовании этих принципов в технике, однако первые результаты оказываются обнадеживающими.

Другой пример. Речь идет о новых возможностях получения фотоносителей не содержащих серебра. Эта проблема весьма актуальна. С одной стороны, постоянно растет потребность в фотоматериалах. С другой стороны, в живой природе существует ряд легко получаемых биологическим способом фотопигментов, отработанных

эволюцией для взаимодействия со светом. Особое место среди фотопигментов занимает родопсин — чувствительный элемент сетчатки глаза человека и животных. Поглощая квант света, родопсин распадается и меняет свою окраску. В темноте он вновь восстанавливается. Родопсин входит в относительно больших количествах в состав внешних мембран ряда фотосинтезирующих бактерий, например, солелюбивых пурпурных бактерий халобактериум халобиум, которые с участием этого белка энергию света преобразуют в электрохимическую энергию мембранного потенциала.

Приблизительно 10 лет назад в СССР по инициативе академика Ю. А. Овчинникова был создан всесоюзный проект «Бактериородопсин», цель которого — объединение усилий биохимиков, биофизиков и физиологов для детального исследования структуры и механизмов функционирования родопсинов. В результате такой совместной работы стали ясны детали фотохимического цикла в пурпурных мембранах и первичного механизма действия света на бактериородопсин. Была расшифрована структура родопсина. Стало ясно, что бактериородопсин может обратимо функционировать в растворе и тонкой пленке как влажной, так и полностью обезвоженной, не утрачивает своих функциональных свойств при нагревании до 100° С, устойчив к действию многих химических агентов и сильных электрических полей. Кроме того, обнаружено, что обезвоженный бактериородопсин может «останавливаться» на определенной стадии фотохимического цикла, сохраняя записанное на нем изображение. Так появилась идея использовать бактериородопсин как фотоматериал.

Молекулы бактериородопсина (и их модификации) по светочувствительности и разрешающей способности — удачные кандидаты на фотоматериал. Молекула родопсина представляет собой эллипсоид. Такие глобулы легко кристаллизуются, образуя пленку с шагом решетки около 40 Å. Каждая молекула родопсина при взаимодействии с квантом света, распадаясь, меняет свой цвет. Таким образом, эта пленка обладает гигантским разрешением! Есть еще ряд достоинств таких пленок, их можно использовать многократно, записывая и стирая изображение. В этом режиме работы появляется возможность применять такую фотопленку, как микроэлемент со световой памятью.

Пройдет еще 5—10 лет и во многих областях техники появятся новинки, в основе которых будут лежать биологические системы, обладающие удивительными свойствами. Мы стоим на пороге эпохи биотехники и биотехнологии!

Расскажем еще об одном практическом приложении, которое движется к своему завершению. Речь пойдет о биологическом и медицинском использовании перфторуглеродов.

Фтор — сильный окислитель, активный неметалл, реагирует со всеми элементами, кроме инертных газов, взрывоопасен (не случайно слово «фторос» по гречески означает разрушение). Насытив валентные связи фтора другими элементами (например, углеродом), агрессивность его можно усмирить. Так, появились фторорганические соединения. На основе этих соединений были получены вещества, которые используют сегодня в качестве смазочных масел, гидравлических жидкостей, покрытий трущихся деталей и посуды (фторопласты), наполнителей холодильных установок (фреоны) и т. д. К середине XX века для получения этих соединений были созданы новые отрасли химической промышленности. Большая роль в создании такой промышленности в СССР принадлежала академику И. Л. Кнунянцу.

Если в органическом соединении произведено полное замещение водорода на фтор (на это указывает приставка «пер»), то мы получим перфторуглероды. В настоящее время синтезируется большое количество фторированных соединений, многие из которых, помимо углерода, содержат атомы кислорода, азота, водорода, но их часто по-прежнему называют перфторуглеродами, хотя правильнее их называть перфторорганическими соединениями (ПФОС). Им присущ ряд свойств, среди которых наиболее привлекательны для биофизиков их химическая инертность и способность растворять большие количества газов: до 50 объемных % кислорода и до 190% углекислого газа. Именно в силу этого оказалось возможным предложить на основе ПФОСов отличные от традиционных методы «искусственного дыхания» для выращивания клеток вне организма, для поддержания жизнедеятельности трансплантируемых органов и, наконец, для создания специальных эмульсий, которые могут выполнять одну из главных функций крови — обмен углекислого газа на кислород.

История использования ПФОС в биологии и медицине такова. В 1962 году И. Килстра опубликовал статью под сенсационным названием «Мышь как рыба». Он показал, что мышь может оставаться живой будучи погруженной в физиологический раствор, который под повышенным давлением насыщается кислородом. В 1966 году Л. Кларк и Ф. Голлан обнаружили, что такой же эффект можно получить при нормальном атмосферном давлении, если вместо физиологического раствора применить ПФОС. Однако длительное жидкостное дыхание в ПФОСах невозможно, так как они в 2 раза тяжелее воды и в 1000 раз тяжелее воздуха, поэтому мускулатура диафрагмы легких и мышц, осуществляющих движение грудной клетки, не может выдержать такой нагрузки. Однако принудительное прокачивание через легкие, позволяет животному дышать жидкостью довольно долго. Сейчас эти исследования продолжаются как в СССР, так и в других странах.

Если удастся разработать безвредные методы дыхания человека жидкостью, то водолазы смогут опускаться на значительно большие глубины без опасности кессонной болезни и азотной интоксикации. Расширятся возможности завоевания человеком глубин Мирового океана. Метод дыхания в жидкой среде может пригодиться человеку во время больших ускорений при космических полетах.

Разработка этого аспекта применения ПФОС также может оказаться полезной для медиков, в частности, при промывании легких (лаваж) у больных бронхиальной астмой, при лечении тяжелых форм отеков легкого, заболеваний легких в результате нарушения секреции поверхностно-активных веществ. Использование в этих случаях ПФОС, способных растворять большие количества кислорода, будет существенным шагом вперед по сравнению с теми традиционными «гипоксическими жидкостями», которые применяют в настоящее время.

Еще одно применение ПФОСов связано с созданием кровозаменителей, дефицит которых растет с каждым годом. Сегодня в Нью-Йорке, Лондоне, Париже и других крупных городах за литр донорской крови платят по 100 долларов. В капиталистическом мире кровь стала предметом «бизнеса». Появились американские западногерманские и французские компании, например «Хэмо Карибиэн компани», которые скупают кровь в

странах Латинской Америки и Африки и перепродают ее фармакологическим фирмам и клиническим учреждениям в своих странах. Дефицит порождает спекуляцию. Вопрос создания дешевых и надежных кровезаменителей остро стоит на повестке дня.

Первое переливание человеку кровезаменителя, созданного на основе ПФОС, было произведено в 1978 году в медицинском центре Фукусима в Японии. У больного была редкая группа крови, которой не оказалось в клинике, и ему влили один литр кровезаменителя (что составляет около 20% крови). Весьма вероятно, что это было сделано с рекламной целью. Однако следует заметить, что профессор Риончи Наито предварительно испытал этот препарат на самом себе. Лиха беда начало! Сегодня в Японии и США произведено более 100 переливаний человеку кровезаменителей на основе ПФОС.

В Советском Союзе, начиная с 70-х годов, также велись в медицинских учреждениях исследования по созданию искусственных кровезаменителей на основе ПФОС. Биофизики подключились к этой проблеме недавно. В апреле 1980 года мне выпала честь доложить о результатах использования ПФОС в биологии и медицине на Президиуме АН СССР. В 1979 году в Институте биологической физики АН СССР были осуществлены успешные эксперименты по замене крови на собаках (до 70%). На людях такая замена не производилась. Одна из причин — жесткие, но правильные требования наших законов, запрещающие использование в клинике любых препаратов до момента их всесторонней проверки на животных, включая отдаленные последствия.

Однако уже сейчас видно, что «искусственная кровь» на основе ПФОС будет обладать рядом преимуществ перед донорской: а) отсутствие проблем, связанных с групповой, подгрупповой несовместимостью и другими факторами; б) отсутствие иммунологического конфликта; в) снятие проблемы передачи вирусного гепатита и других инфекций; г) длительное время циркуляции в кровеносном русле реципиента с сохранением газотранспортной функции; д) отсутствие ухудшения газотранспортной функции при длительном хранении; е) возможность организации ее массового производства.

Еще один аспект применения ПФОС — сохранение

изолированных органов. В настоящее время в клинике нет перфузионных методов, которые позволяли бы в течение длительного времени безопасно сохранять органы. Использование донорской крови обеспечивает хорошую оксигенацию, но вызывает быстрое нарушение состояния органа, поскольку от работы насосов разрушаются клетки крови. Применение плазмозамещающих растворов сопровождается кислородным голоданием органа, ибо они имеют низкую кислородную емкость. Созданная на основе ПФОС перфузионная жидкость обеспечивает хорошую оксигенацию органов и представляет существенные преимущества по сравнению с традиционными заменителями, применяемыми для сохранения органов.

Схема перфузии изолированного органа показана на рис. 11. На основе ПФОС удастся создать новую технику, которая позволяет консервировать органы, готовые к трансплантации. Высокая кислородная емкость эмульсий из ПФОС позволяет поддерживать напряжение кислорода в тканях перфузируемого органа, близ-

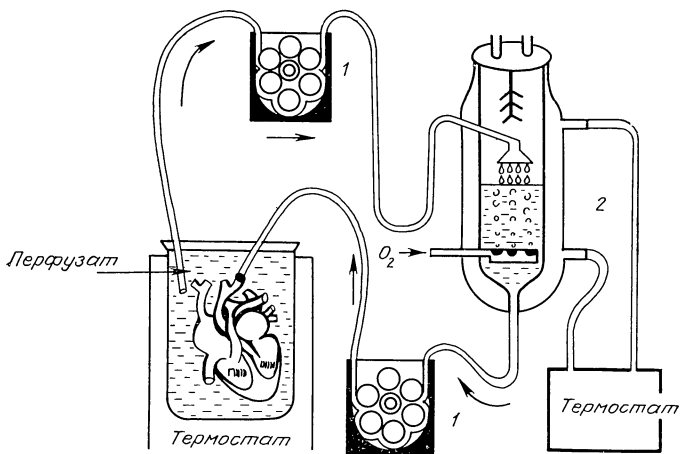


Рис. 11. Схема перфузии сердца газопереносящей жидкостью на основе перфторорганических соединений: 1 — перистальтический насос; 2 — устройство для обогащения жидкости кислородом (пузырьковый) противоточный оксигенатор. Стрелками показано направление движения перфузирующей жидкости

кое к нормальным. При этом можно провести тщательные биохимические исследования органа и перцепиента и тем самым свести к минимуму вероятность отторжения пересаженного органа. «Банк органов» — это дело ближайшего будущего¹.

Мы привели лишь несколько примеров прикладных биофизических исследований. Таких приложений десятки. Они открывают новые возможности для практики, которые еще недавно казались фантастическими.

¹ Подробнее об использовании ПФОС в биологии можно узнать из сборника «Перфторированные углероды в биологии и медицине». Пушино, 1980.

Для более детального знакомства с затронутыми в брошюре проблемами приведем список книг, которые могут оказаться полезными для читателя

Блюменфельд Л. А. Проблемы биологической физики. М., Наука, 1977.

Волькенштейн М. В. Физика и биология. М., Наука, 1980.

Волькенштейн М. В. Биофизика. М., Наука, 1981.

Жаботинский А. М. Концентрационные автоколебания. М., Наука, 1974.

Иваницкий Г. Р., Кринский В. И., Сельков Е. Е. Математическая биофизика клетки. М., Наука, 1978.

Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Что такое математическая биофизика. М., Просвещение, 1971.

Романовский Ю. М., Степанова Н. В., Чернавский Д. С. Математическое моделирование в биофизике. М., Наука, 1975.

Свирижев Ю. М., Логофет Д. О. Устойчивость биологических сообществ. М., Наука, 1978.

Смолянинов В. В. Математические модели биологических тканей. М., Наука, 1980.

Фомин С. В., Беркинблит М. Б. Математические проблемы в биологии. М., Наука, 1973.

Шноль С. Э. Физико-химические факторы биологической эволюции. М., Наука, 1979.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Что такое биофизика, как происходило ее формирование и развитие	4
2. Математическое моделирование. Можно ли на основе методов, разработанных в биофизике, объяснить динамику ее собственного развития?	19
3. Кто прав? Примеры научных конфликтов	37
4. «Горячие точки» на границах наук Проблемы прикладной биофизики	54

Генрих Романович Иваницкий

БОРЬБА ИДЕЙ В БИОФИЗИКЕ

Редактор **И. Тужилина.**

Заведующий редакцией естественнонаучной литературы **А. Нелюбов**

Мл. редактор **Л. Готт.**

Худож. редактор **Т. Егорова.**

Художник **Н. Константинова.**

Техн редактор **И. Шабратова.**

Корректор **В. И. Гуляева.**

ИБ № 4569

Сдано в набор 22.03.82. Подписано к печати 19.05.82. А 02766. Формат бумаги 84×108¹/₃₂. Бумага тип. № 2. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл. печ. л. 3,36. Усл. кр.-отт. 3,675. Уч.-изд. л. 3,63. Тираж 39 600 экз. Заказ 636. Цена 11 коп. Издательство «Знание». 101835, ГСП, Москва, Центр, проезд Серова, д. 4. Индекс заказа 826105. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.



Исаак Ньютон



Иоган Вольфганг Гете



Луиджи Гальвани



Алессандро Вольт



К. А. Тимирязев



П. П. Лазарев

ДОРОГОЙ ЧИТАТЕЛЬ!

Брошюры этой серии в розничную продажу не поступают, поэтому своевременно оформляйте подписку. Подписка на брошюры издательства „Знание“ ежеквартальная, принимается в любом отделении „Союзпечати“.

Напоминаем Вам, что сведения о подписке Вы можете найти в „Каталоге советских газет и журналов“ в разделе „Центральные журналы“, рубрика „Брошюры издательства „Знание““.

Цена подписки на год 1 р. 32 к.



СЕРИЯ

БИОЛОГИЯ