

В. О. Самойлов

МЕДИЦИНСКАЯ БИОФИЗИКА

Учебник для вузов

3-е издание, исправленное и дополненное

*Рекомендован Учебно-методическим объединением
по технической физике в качестве учебника
для студентов, обучающихся по направлению
бакалаврской подготовки «Техническая физика»,
по магистрским программам «Медицинская
и биоинженерная физика»*

Санкт-Петербург
СпецЛит
2013

Рецензенты:

А. Э. ФОТИАДИ — заведующий кафедрой физической электроники Санкт-Петербургского Государственного Политехнического университета, доктор физ.-мат. наук, профессор;
В. К. ИВАНОВ — заведующий кафедрой экспериментальной физики Санкт-Петербургского Государственного Политехнического университета, доктор физ.-мат. наук, профессор;
Ю. В. НАТОЧИН — профессор кафедры физиологии медицинского факультета Санкт-Петербургского Государственного университета, доктор мед. наук, профессор, академик РАН;
Ю. А. ВЛАДИМИРОВ — заведующий кафедрой биофизики факультета фундаментальной медицины МГУ им. М. В. Ломоносова, доктор биологических наук, академик РАН

Рекомендован Проблемной учебно-методической комиссией по нормальной физиологии при Всероссийском учебно-научно-методическом центре по непрерывному медицинскому и фармацевтическому образованию МЗ РФ в качестве дополнительной литературы для студентов медицинских вузов

Самойлов В. О.

С17 Медицинская биофизика : учебник для вузов / В. О. Самойлов. — 3-е изд., испр. и доп. — СПб. : СпецЛит, 2013. — 591 с. : ил.
ISBN 978-5-299-00518-9

В книге рассмотрены основные вопросы медицинской биофизики в русле учебной программы, построенной в соответствии с системой физических и физико-химических процессов, лежащих в основе жизни. В учебнике пять разделов: транспорт веществ через биологические мембраны (биомембранология), биоэнергетика, биологическая электродинамика, биомеханика, информация и регулирование в биологических системах. В каждом из разделов приводятся примеры нарушения основных биофизических процессов при патологии. В Приложении представлены справочные таблицы физических констант и единиц перевода в СИ.

Издание соответствует государственным образовательным стандартам учебных дисциплин «Медицинская биофизика» направления бакалаврской подготовки «Техническая физика», специальностям «Биоинженерная физика» и «Медицинская биофизика».

Учебник предназначен для студентов технических университетов и в качестве дополнительной литературы для студентов медицинских вузов.

УДК 577.23 577.3 612

СОДЕРЖАНИЕ

Условные сокращения	7
Предисловие	9
Введение в биофизику	10
Предмет биофизики	10
Методы и направления современной биофизики	12
Особая миссия биофизики в биологии и медицине	14

Раздел 1

ТРАНСПОРТ ВЕЩЕСТВ В ОРГАНИЗМЕ (БИОМЕМБРАНОЛОГИЯ)

1.1. Структура, свойства и функции биологических мембран	19
1.1.1. Структурно-молекулярная организация биологических мембран	20
1.1.2. Физические и физико-химические свойства биологических мембран	33
1.1.3. Функции биологических мембран	39
1.1.4. Модели биологических мембран	40
1.1.5. Искусственные мембраны	45
1.1.6. Пассивный и активный транспорт веществ (массоперенос) через биомембраны	55
1.2. Кинетика биофизических процессов массопереноса	55
1.2.1. Уравнения переноса	55
1.2.2. Кинетика сопряженных процессов массопереноса	57
1.2.3. Сопряженный массоперенос заряженных частиц (ионов) через биологическую мембрану	60
1.2.4. Проницаемость клеточных мембран	60
1.2.5. Транспорт липофильных веществ через биологические мембраны	61
1.2.6. Транспорт гидрофильных веществ через биологические мембраны	63
1.3. Биологические насосы	68
1.3.1. Активный транспорт (общие положения)	69
1.3.2. Системы активного транспорта ионов	72
1.3.3. Ионный транспорт у галобактерии	79
1.3.4. Облегченная диффузия	83
1.3.5. Специальные механизмы трансмембранного массопереноса	85
1.4. Транспорт веществ в многомембранных системах организма	90
1.4.1. Понятие о многомембранной системе	90
1.4.2. Биофизические механизмы всасывания веществ в желудочно-кишечном тракте	92
1.4.3. Биофизический механизм секреции	98
1.4.4. Обмен жидкости через стенку кровеносного капилляра	101
1.4.5. Биофизические механизмы выделения веществ почками	103
1.4.6. Биофизические основы дыхания	117
Рекомендуемая литература	132

Раздел 2

БИОЭНЕРГЕТИКА

2.1. Квантово-механические основы биоэнергетики	133
2.1.1. Основные понятия квантовой механики	133
2.1.2. Испускание и поглощение энергии атомами и молекулами	141
2.1.3. Квантово-механические особенности строения биомолекул	145
2.1.4. Механизмы переноса энергии и заряда в биомолекулярных системах	154
2.1.5. Люминесценция биологических систем	159

2.2. Электронная схема жизни	166
2.2.1. Биофизические механизмы фотосинтеза	167
2.2.2. Биофизика клеточного дыхания	178
2.3. Первое начало термодинамики и живые организмы	203
2.3.1. Определения основных термодинамических величин	203
2.3.2. Первое начало термодинамики	204
2.3.3. Свободная и связанная энергия	206
2.3.4. Обратимые и необратимые процессы	207
2.3.5. Применение первого начала термодинамики к живым организмам	208
2.3.6. Источники свободной энергии живого организма и виды совершаемых им работ	211
2.3.7. Тепловой баланс организма, способы теплообмена	213
2.3.8. Химическая и физическая терморегуляция	218
2.3.9. Энерготраты организма, основной обмен	219
2.3.10. Физиологическая калориметрия (биокалориметрия)	221
2.4. Второе начало термодинамики	222
2.4.1. Понятие энтропии	222
2.4.2. Статистический смысл энтропии	224
2.4.3. Формулировка второго начала термодинамики	225
2.4.4. Диссипативная функция	226
2.4.5. Научное и практическое значение второго начала термодинамики	227
2.4.6. Второе начало термодинамики в биологических системах	228
2.4.7. Стационарное состояние	231
2.4.8. Теорема Пригожина	233
2.4.9. Термодинамический критерий эволюции. Особенности биологической эволюции	233
2.4.10. Диссипативные структуры	235
2.4.11. Методологическое значение второго начала термодинамики	238
<i>Рекомендуемая литература</i>	239

Раздел 3

БИОЛОГИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИКА

3.1. Основные положения теории электромагнитного поля	240
3.1.1. Истоки теории ЭМП	240
3.1.2. Материальные уравнения Максвелла	242
3.1.3. Взаимодействие ЭМП с веществом	244
3.1.4. Основные уравнения Максвелла	249
3.1.5. Излучение и распространение электромагнитного поля	253
3.1.6. Электромагнитный спектр (шкала электромагнитных волн)	255
3.1.7. Преобразование электрического поля физическими средами	256
3.2. Электрические и магнитные свойства тканей организма	260
3.2.1. Электропроводность живых тканей	260
3.2.2. Диэлектрические свойства живых тканей	263
3.2.3. Магнитные свойства живых тканей и биологические эффекты магнитных полей	267
3.2.4. Дисперсия электрического импеданса живых тканей	269
3.3. Механизмы биоэлектrogenеза и его роль в возбуждении	271
3.3.1. Развитие концепции «животного электричества» до создания Сванте Аррениусом теории электролитической диссоциации	271
3.3.2. Физико-химические основы биоэлектrogenеза	274
3.3.3. Потенциал покоя	280
3.3.4. Потенциал действия	283

3.3.5. Роль ионных каналов в биоэлектrogenезе	288
3.3.6. Возбудимость и возбуждение	301
3.3.7. Реакции невозбудимых и возбудимых мембран на раздражители	302
3.3.8. Вольт-амперные характеристики возбудимой и невозбудимой мембран	304
3.3.9. Пороговый раздражитель как мера возбудимости	306
3.3.10. Электротонические явления	307
3.3.11. Рефрактерность	309
3.3.12. Аккомодация возбудимых тканей	310
3.3.13. Лабильность возбудимых тканей	313
3.3.14. Локальный ответ	314
3.4. Распространение возбуждения	315
3.4.1. Кабельные свойства биологических мембран	316
3.4.2. Бездекрементное распространение возбуждения по возбудимой мембране	317
3.4.3. Сальтаторное проведение нервного импульса	320
3.4.4. Уравнение Ходжкина—Хаксли	323
3.4.5. Синаптическая передача	325
3.5. Внешние низкочастотные электромагнитные поля тканей и органов, биофизические основы электрографии	339
3.5.1. Механизм образования внеклеточного потенциала возбуждения в нервном и мышечном волокнах	340
3.5.2. Биофизические основы электрографии	341
3.5.3. Биофизические основы электрокардиографии	344
3.6. Взаимодействие электрической составляющей электромагнитного поля с организмом	356
3.6.1. Биологическое действие ЭМП низкой частоты	357
3.6.2. Биологическое действие ЭМП высокой частоты	363
3.6.3. Частотно-зависимые биологические эффекты ЭМП	368
<i>Рекомендуемая литература</i>	371

Раздел 4 БИОМЕХАНИКА

4.1. Механические свойства живых тканей	372
4.2. Ультраструктурная основа механических свойств живых клеток	380
4.2.1. Промежуточные филаменты	380
4.2.2. Система микрофиламентов (тонких нитей)	382
4.2.3. Система микротрубочек	385
4.3. Биофизика мышечного сокращения (актин-миозиновая система миоцита)	390
4.3.1. Особенности актин-миозиновой системы миоцита поперечнополосатых мышц	390
4.3.2. Механизм мышечного сокращения	393
4.4. Механические процессы в опорно-двигательном аппарате человека	398
4.4.1. Биомеханические свойства скелетных мышц	398
4.4.2. Ремоделирование костной ткани как основа ее прочности	402
4.4.3. Биомеханика суставов скелета	409
4.5. Биомеханика внешнего дыхания	412
4.6. Биомеханика кровообращения	416
4.6.1. Элементы биомеханики сердца	416
4.6.2. Биофизические закономерности движения крови по сосудам	422
4.7. Биомеханические процессы в жгутиках и ресничках	439
<i>Рекомендуемая литература</i>	445

Раздел 5

ИНФОРМАЦИЯ И РЕГУЛИРОВАНИЕ В БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

5.1. Механизмы преобразования информации в рецепторах сенсорных систем	447
5.1.1. Рецепторы сенсорных систем, классификация рецепторов	447
5.1.2. Биофизические механизмы преобразования информации в рецепторах . . .	450
5.1.3. Понятие о кодировании и некоторые особенности кодирования информации в рецепторных аппаратах	454
5.1.4. Биофизика слуха	462
5.1.5. Биофизика зрения	475
5.1.6. Биофизика хемосенсорных систем	500
5.2. Информация и живой организм	537
5.2.1. Элементы теории информации	537
5.2.2. Примеры применения теории информации к анализу процессов передачи информации в нервных каналах связи	540
5.2.3. Информация, заключенная в генетическом коде	543
5.3. Регулирование биологических процессов	546
5.3.1. Содержание кибернетики и бионики	546
5.3.2. Стратегия управления функциями организма	548
5.3.3. Понятие о местной регуляции физиологических процессов	550
5.3.4. Понятие о гуморальной регуляции физиологических процессов	551
5.3.5. Нервная регуляция физиологических процессов	552
5.3.6. Обратные связи в рефлекторных актах	554
5.3.7. Элементы теории автоматического регулирования	555
5.3.8. Приложение теории автоматического регулирования к рефлекторной деятельности	559
5.3.9. Форпостное регулирование функций организма	561
5.3.10. Регуляция температуры тела гомойотермного организма	561
Заключение	578
<i>Рекомендуемая литература</i>	578
Приложения	579
Предметный указатель	584
Литература	591

УСЛОВНЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

АДФ	— аденозиндифосфат
АКМ	— альвеолокапиллярная мембрана
АМФ	— аденозинмонофосфат
АО	— атомные орбитали
АРФ	— абсолютно рефрактерная фаза
АСУ	— автоматическая система управления
АТФ	— аденозинтрифосфат
АЦ	— аденилатциклаза
АЧХ	— амплитудно-частотная характеристика
БМ	— биомембрана
БП	— биопотенциалы
БР	— бактериородопсин
ВАХ	— вольт-амперная характеристика
ВПСП	— возбуждающий постсинаптический потенциал
ВЭКС	— векторэлектрокардиокопия
ГМК	— гладкомышечные клетки
ГП	— генераторный потенциал
ДК	— дыхательный коэффициент
ДСК	— дифференциальная сканирующая микрокалориметрия
ДСЛ	— диффузионная способность легких
ДЦ	— дыхательная цепь
ЖК	— жидкие кристаллы
ИНТ	— инкапсулированное нервное тельце
ИЭВС	— интегральный электрический вектор сердца
КАГ	— карбоангидраза
КГР	— кожно-гальваническая реакция
КД	— кровяное давление
КМП	— критический мембранный потенциал
Кр	— креатин
КрФ	— креатинфосфат
КУ	— корректирующее устройство
КУД	— критический уровень деполяризации
КФК	— креатинфосфокиназа
МДП	— максимальный диастолический потенциал
МДС	— магнитодвижущая сила
Метод ЛКАО	— метод линейной комбинации атомных орбиталей
МО	— молекулярные орбитали
МОД	— минутный объем дыхания
МП	— магнитная составляющая электромагнитного поля
МЦК	— мукоцилиарный клиренс
МЦТ	— мукоцилиарный транспорт
НАД	— никотинамидадениндинуклеотид
НС	— наружный сегмент палочки (фоторецептора)
ОД	— облегченная диффузия
ОР	— объект регулирования
ОРФ	— относительно рефрактерная фаза
ОС	— обратная связь
ОСБ	— одорантсвязывающие белки
ОЦ	— окислительная цепь
ПКА	— протеинкиназа А
ПКП	— потенциал концевой пластинки

ПП	— потенциал покоя
P	— регулятор
РП	— рецепторный потенциал
САР	— система автоматического регулирования
СКФ	— скорость клубочковой фильтрации
СНО	— свободные нервные окончания
СОЭ	— скорость оседания эритроцитов
СПС	— саркоплазматическая сеть
СР	— сладкочувствительный рецептор
СФ	— сопрягающий фактор
ТК	— твердые кристаллы
ТМВ	— типичные миокардиальные волокна
ТПСП	— тормозный постсинаптический потенциал
ТЭА	— тетраэтиламмоний
УЗД	— уровень звукового давления
ФЛ	— фосфолипиды
ФМН	— флавиномононуклеотид
ФОС	— фосфорорганические соединения
ФП	— флавопротеиды
ФС	— фотосистема
ФЭ	— фаза экзальтации
цАМФ	— циклический аденозинмонофосфат
ЦВД	— центральное венозное давление
ЦНС	— центральная нервная система
ЩК	— щелевой контакт
ЭДС	— электродвижущая сила
ЭКГ	— электрокардиограмма
ЭКП	— эндокохлеарный потенциал
ЭМВ	— электромагнитная волна
ЭМГ	— электромиограмма
ЭМП	— электромагнитное поле
ЭП	— электрическая составляющая электромагнитного поля
ЭПР	— электронный парамагнитный резонанс
ЭС	— элемент сравнения (компаратор)
ЭТЛ	— эластическая тяга легких
ЭЭГ	— электроэнцефалограмма
ЯМР	— ядерный магнитный резонанс
H-ATФаза	— водород-активируемая АТФаза (протонная помпа)
Ca-ATФаза	— кальций-активируемая АТФаза
Na-K-ATФаза	— натрий-калий-активируемая АТФаза
H-K-ATФаза	— водород-калий-активируемая АТФаза

ПРЕДИСЛОВИЕ

Четверть века назад увидел свет учебник «Медицинская биофизика» для слушателей Военно-медицинской Академии, в котором учебный материал излагался в соответствии с основными физическими и физико-химическими процессами, лежащими в основе жизнедеятельности. С тех пор этот оригинальный подход был успешно применен в учебном процессе не только медицинских, но и технических вузов России. Многие биофизики, как педагоги, так и научные сотрудники, признали учебник удачным и сетовали на его малый тираж и ведомственное издание.

При подготовке нового учебника в 2000-е годы прогресс биофизики потребовал глубокой переработки всего учебного материала. Это удалось осуществить в двух изданиях нового учебника «Медицинская биофизика» (в 2004 и 2007 годах). Необходимость новых изданий, включая третье, дополненное и переработанное, была обусловлена рядом обстоятельств.

Несмотря на то, что с 2000 года биофизика исключена из учебных планов медицинских вузов России, наш учебник был рекомендован Проблемной учебно-методической комиссией по нормальной физиологии при Всероссийском учебном научно-методическом центре по непрерывному медицинскому и фармацевтическому образованию МЗ РФ в качестве дополнительной литературы для студентов медицинских вузов, хотя его основным адресатом были медико-физические и медико-технические факультеты и кафедры технических университетов.

Второе издание учебника по сравнению с первым было дополнено двумя подразделами: «Биофизика хемосенсорных систем» и «Регуляция температуры тела гомойотермного организма». Это позволило лучше увязать классические представления о регуляции функций организма с принципами кибернетики. Тем самым удалось полнее и глубже охарактеризовать биофизические механизмы информационных и регуляторных процессов в организме человека и животных.

В третьем издании подверглись кардинальной переработке главы, посвященные ионным каналам, синаптической передаче, радиобиологии неионизирующих излучений, биофизике мышечной подвижности. Издание содержит предметный указатель и список литературы, рекомендуемой для более глубокого и широкого изучения каждого из разделов учебника, а также новые иллюстрации, включая цветные рисунки и микрофотографии, которые сделали третье издание не только более наглядным, но и более содержательным.

Мои коллеги: А. В. Блинов, В. Н. Карнаухов, В. В. Кораблев, Ю. В. Наточин, В. М. Покровский, И. Н. Топтыгин, Ю. Е. Шелепин – нашли в предыдущих изданиях ряд неточностей и неудачных формулировок, которые исправлены в третьем издании. Выражаю глубокую благодарность коллегам за внимание к моему труду и скрупулезный анализ материалов учебника, что способствовало его улучшению. Моя особая благодарность в подготовке третьего издания Е. В. Бигдай, Г. М. Богомоловой, М. С. Жарковой, А. Л. Зефирову, М. Г. Хотину, А. И. Ерофееву.

Член-корреспондент РАМН
В. О. Самойлов

ВВЕДЕНИЕ В БИОФИЗИКУ

ПРЕДМЕТ БИОФИЗИКИ

Предметом биофизики является изучение физических и физико-химических процессов, лежащих в основе жизни. Существуют и более емкие определения биофизики. Например, лауреат Нобелевской премии А. Сент-Дьердьи утверждал, будто биофизика — «все то, что интересно». Термин «биофизика» закрепился в научной литературе с 1892 г., когда Карл Пирсон, автор книги «Грамматика науки», на ее страницах заявил: «... 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». А. Фик и вслед за ним другие немецкие ученые называли эту область знания медицинской физикой, но французский физиолог Ж. А. Д'Арсонваль еще до предложения К. Пирсона предпочитал термину «медицинская физика» словосочетание «биологическая физика».

Современная биофизика исследует механизмы физических и физико-химических процессов в биологических системах на субмолекулярном, молекулярном, надмолекулярном, клеточном, тканевом, органном и организменном уровнях.

По природе объектов исследования биофизика — биологическая наука. По методам изучения биообъектов и анализа результатов исследований биофизика является своеобразным разделом физики (по мнению М. В. Волькенштейна, «биофизика — физика явлений жизни»). Она идет в авангарде тех областей биологии, которые превращают эту древнейшую область человеческого знания из гуманитарной в точную науку. Внедрение физических принципов анализа биологических явлений в медицину позволяет ей стать не только искусством, но и наукой. В этом особая роль биофизики среди других медицинских теоретических дисциплин.

Зачастую о биофизике говорят как о новой, молодой науке. Так, 9 ноября 1934 г. П. Л. Капица писал: «Биофизика — совершенно новая область, она пришла вместе с биохимией на смену старой классической физиологии. Вместо того чтобы изучать физиологические процессы в целом, биофизика и биохимия изучают отдельные элементы живого существа и стараются объяснить его функцию посредством законов физики и химии». Действительно, в отдельную научную дисциплину биофизика выделилась сравнительно недавно, но зачатки биофизики возникли сразу по появлению работ в области экспериментальной физики. Так, некоторые изыскания Г. Галилея (измерение температуры тела, определение работы, совершаемой человеком, и т. п.) можно отнести к биофизическим исследованиям.

Стремление объяснить процессы жизнедеятельности человека и животных физическими законами было весьма характерно для творчества многих ученых XVII и XVIII вв. (Р. Бойль, Р. Гук, И. Ньютон, М. В. Ломоносов, П. С. Лаплас, А. Л. Лавуазье и многие другие). XIX в. стал веком торжества аналитических методов в исследовании биологических явлений. Эти методы получили наибольшее развитие в физиологии, в недрах которой зародилась современная биофизика. Многие физиологические процессы, вплоть до нервной деятельности, пытались объяснить на основе физических законов. В отличие от аналогичных попыток предшественников, такие объяснения в значительной мере подтверждались экспериментально. Герман Гельмгольц измерил скорость распространения нервного импульса. Эмиль Дюбуа-Реймон изучил биоэлектродгенез почти всех органов и тканей орга-

низма. Эрнст Вебер объяснил некоторые свойства гемодинамики на основе физических законов. Выдающиеся открытия были сделаны в области биофизики органов чувств — достаточно назвать хотя бы закон Вебера—Фехнера.

Вместе с тем XIX в. определил весьма характерную тенденцию в последующем развитии биофизики. Одним из первых ученых, подметивших и утвердивших эту тенденцию, был Иван Михайлович Сеченов — отец русской физиологии. Он вслед за В. В. Петровым, наиболее последовательно развивал в России физико-химическое направление исследований в области физиологии и медицины, использовал методы математики и физической химии для исследования дыхания, установил количественные закономерности растворения газов в биологических жидкостях. В работах И. М. Сеченова прослеживается наиболее перспективный путь развития физиологии и биофизики, связанный прежде всего с физической химией. В докторской диссертации (1860) И. М. Сеченов утверждал: «Физиолог — физико-химик, имеющий дело с явлениями животного организма».

В XX в. биофизика стала самостоятельной наукой. Она приступила к изучению фундаментальных проблем биологии: наследственности и изменчивости, онтогенеза и филогенеза, метаболизма и биоэнергетики.

Большинство исследователей (биофизиков) XVII—XIX вв. рассматривали живой организм как физическую систему, причем основным методом такого изучения биологических явлений был поиск внешних аналогий. Заметим, что и сейчас подобный прием не без успеха применяется в биофизике. Например, сокращение мышцы можно моделировать обратным пьезоэлектрическим эффектом, амeboидное движение клеток — перемещениями ртутной капли в растворе кислоты, проведение нервного импульса — миграцией царапины по железной проволоке, обработанной азотной кислотой (модель Лилли), и т. п.

Познавательное значение таких моделей довольно ограничено. Зачастую при моделировании одного и того же биологического явления они сменяют одна другую вслед за появлением новых технических устройств. Например, рефлекторная деятельность рассматривалась во времена Р. Декарта по аналогии с работой паровой машины, в начале прошлого века — телефонной станции, сейчас — электронно-вычислительной машины. Однако и подобные (феноменологические) модели нужны. Они позволяют уточнять некоторые детали уже понятых в принципе явлений, конструировать бионические системы, в которых используются закономерности биологической организации для построения сложных технических устройств, например роботов. И все же это полезное направление физического моделирования не является главным в решении кардинальных биофизических задач.

Основная цель биофизического исследования состоит в выяснении интимных (внутренних) механизмов биологических процессов, а не в рассмотрении внешних аналогий. Принято считать, что живые организмы представляют собой сложные физико-химические системы. Поэтому не физическое, а физико-химическое моделирование оказалось наиболее плодотворным. Оно привело к созданию ионной теории возбуждения, вскрытию природы биоэлектрогенеза, выяснению свойств биологических мембран и т. д. На этом пути особенно значительны достижения биофизики в последние годы.

По существу, *современная биофизика — это физическая химия и химическая физика биологических систем.* Именно такое направление является ведущим в работе двух крупнейших в мире институтов биофизики РАН, которые находятся в городе Пущино под Москвой. Проблемами биофизики занимаются сейчас многие научно-исследовательские учреждения Академии наук, Академии медицинских наук, Минздрава России. Среди них — институты физической химии и биохимической физики РАН, Институт биофизики Минздрава России. Развитием биофизики в нашей стране занимаются также университетские кафедры биологической физики.

Биофизика — пограничная область знаний, причем границы между ней и рядом других биологических наук довольно условны. При проведении этих границ исходят из самого определения предмета биофизики — к биофизическим относятся исследования, вскрывающие физические, а также физико-химические механизмы биологических процессов. В биофизических исследованиях применяется основной принцип экспериментального изучения природы — количественный анализ реакции организма на определенные стимулы с построением функциональных зависимостей между ними. Процессы жизнедеятельности получают строгую интерпретацию в виде количественных закономерностей, представляющих собой абстрактную форму выражения функциональной зависимости реакции от стимула.

Функции организма с незапамятных времен изучает *физиология*. В разное время содержание физиологии изменялось. Сейчас она рассматривает функцию как форму деятельности с определенным конечным результатом, проявлением которого служат физиологические свойства (В. А. Шидловский, 1981). В их внутренние механизмы невозможно проникнуть, используя традиционные физиологические подходы к изучению функций. Эти механизмы, поскольку они имеют физическую и химическую природу, изучают биофизика и биохимия. Различие задач биофизики и физиологии в изучении функций организма можно проиллюстрировать таким примером. Исследуя биопотенциалы, биофизик интересуется прежде всего механизмом возникновения электромагнитных процессов в живых тканях, физико-химическими основами этого феномена, его энергетическим обеспечением, тогда как для физиолога биопотенциалы являются показателями жизнедеятельности организма, служат количественной характеристикой важнейших физиологических свойств (прежде всего, возбудимости). Так, по электрокардиограмме физиолог судит о свойствах сердечной мышцы (автоматизме, возбудимости, проводимости). Его меньше занимает физико-химическая природа электрогенеза в миокарде, что составляет основную задачу биофизического исследования электрических процессов в сердце.

Биохимия, подобно биофизике, также стремится проникнуть в механизмы физиологических явлений, но изучает их химическую природу. Понятны трудности в разграничении биофизических и биохимических исследований, но это необходимо делать. «Не подлежит сомнению, — утверждал академик Г. М. Франк (1974), — что любые проявления жизни и живые организмы в целом в конечном итоге — „химические машины“. Однако, несмотря на примат химии, химический язык и химические концепции недостаточны, чтобы раскрыть материальную сущность явлений жизни. Это в первую очередь относится к путям превращения энергии, природе сил взаимодействия и разнообразным физическим процессам, таким, например, как генерация электрических потенциалов, возникновение механической энергии, механизмы управления и регуляции».

МЕТОДЫ И НАПРАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННОЙ БИОФИЗИКИ

Биофизические методы создаются на основе физических и физико-химических методов изучения природы. В них должны сочетаться трудно совместимые свойства: высокая чувствительность и большая точность. Этому условию отвечают прежде всего достижения современной электроники. Весьма плодотворно использование оптических методов. Широко применяются различные методы спектроскопии, включая радиоспектроскопию (методы электронного парамагнитного резонанса — ЭПР, позитронно-эмиссионной томографии — ПЭТ, ядерного магнитного резонанса — ЯМР). Давно вошли в обиход радиоизотопные методики.

Любое исследование требует, чтобы регистрирующие приборы не вносили искажений в изучаемый процесс. Для биофизического эксперимента соблюдение

этого требования особенно актуально. Известный советский биофизик Б. Н. Тарусов считал, что в этом требовании заключена важнейшая особенность биофизических методов, отличающая их от применения аналогичных методических приемов в других областях физики. Такая несколько утрированная формулировка специфики биофизических методов имеет определенные основания. Трудно сравнить какую-либо физическую систему с живым организмом по необычайно высокой чувствительности последнего к любым воздействиям на него. Они не просто нарушают нормальный ход биологических процессов, а вызывают сложные приспособительные реакции, разнообразные в разных органах и в различных условиях. Искажение смысла истинных явлений может оказаться столь существенным, что становится невозможным вносить поправки в артефакты (явления, не свойственные изучаемому объекту в естественных условиях и возникающие в ходе его исследования), поскольку методы коррекции, используемые с успехом в физике и технике, зачастую бесплодны в биофизике.

Чтобы лучше понять области применения биофизических методов, рассмотрим **основные направления** научных изысканий в биофизике. Согласно решению Международной ассоциации общей и прикладной биофизики, к ним относят исследования на молекулярном и клеточном уровнях, а также биофизическое изучение органов чувств и сложных систем.

Молекулярная биофизика изучает функциональную структуру и физико-химические свойства биологически важных (биологически функциональных) молекул, а также физические процессы, обеспечивающие их функционирование, исследует термодинамику биологических систем, перенос энергии и заряда по биомолекулам, квантовомеханические особенности их организации. Эта часть молекулярной биофизики постепенно выделяется в новый раздел под названием *квантовой биофизики*. В целом задача молекулярной биофизики — раскрыть физико-химические механизмы биологической функциональности молекул.

Работы по *биофизике клетки* посвящены физическим и физико-химическим свойствам клеточных и субклеточных структур, закономерностям деления и дифференцировки клеток, особенностям их обмена веществ (метаболизма), а также биофизическим механизмам специализированных функций клеток (мышечного сокращения, секреции, нервной импульсации и др.).

Биофизика органов чувств вскрывает физические и физико-химические механизмы восприятия специфических раздражителей рецепторными аппаратами сенсорных систем (анализаторов) человека и животных (на квантовом, молекулярном, клеточном уровнях).

Задача *биофизики сложных систем* состоит в разрешении общих физико-биологических проблем (происхождение жизни, наследственность, изменчивость и т. д.) на основе физико-математического моделирования важнейших биологических процессов.

Многие биофизики настаивают на выделении еще одного направления биофизических исследований — *биофизических основ экологии*. Его содержанием является выяснение механизмов воздействия на организм физических и химических факторов среды.

Существует тенденция отождествления всей биофизики с молекулярной биофизикой, что нашло отражение в учебнике М. В. Волькенштейна «Биофизика», изданном для студентов биологических и физических факультетов университетов. Такое ограничение можно допустить для определения области наиболее актуальных научных изысканий современной биофизики, хотя и с этим далеко не все согласны. Так, академик Г. М. Франк еще в 1974 г. утверждал, что «центр тяжести физико-химического рассматривания основы жизненных явлений смещается теперь в область биологии клетки», поскольку «явления жизни возникают только в си-

стеме, называемой клеткой», и, по словам Е. Б. Вильсона (1925), «ключ к каждой биологической проблеме нужно искать в клетке», а современная биофизика стала обладать методами, позволяющими сделать клетку объектом точного физического эксперимента. Это не означает, что другим направлениям биофизических исследований отводится вспомогательная роль. По мнению Г. М. Франка, в развитии биофизики должна соблюдаться «... непрерывность линии исследования от раздела, который мы обозначили как „молекулярная биофизика“, далее через биофизику клетки к биофизике сложных процессов».

Что же касается обучения студентов, которым предстоит работа в области медицины, то оно должно включать все разделы и направления современной биофизики. Только так можно восполнить некоторые традиционные пробелы высшего медицинского образования, тем более что в наших медицинских вузах нет других учебных дисциплин, которые рассматривают физические и физико-химические аспекты современного изучения клетки и надклеточных образований (тканей, органов, целого организма). В то же время преподавание молекулярной биофизики в медицинском вузе может быть несколько ограничено, так как многие вопросы этого раздела (свойства макромолекул, ферменты, биосинтез белка, кинетика нуклеиновых кислот и т. д.) излагаются в курсе биохимии в том объеме, который достаточен будущему врачу.

С каждым годом биофизические изыскания приобретают все большее практическое значение. Они вносят существенный вклад в разрешение многих проблем здравоохранения, сельского хозяйства, техники. Вместе с тем всякое новое достижение биофизики неуклонно и даже независимо от воли исследователей укрепляет естественно-научную базу диалектического материализма.

ОСОБАЯ МИССИЯ БИОФИЗИКИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

Из всех учебных дисциплин, преподаваемых будущим врачам и биологам, биофизика наиболее полно и последовательно прививает им классические *принципы научной методологии*.

Человек познает окружающий его мир, воспринимая *явления* (феномены, по И. Канту) посредством органов чувств. При обследовании больного в качестве явлений выступают *симптомы* заболевания. Однако для глубокого понимания природы явления и процесса нужно проникнуть в их *сущность* (ноумен, по И. Канту). В медицине под этим понимают *этиологию* (причину болезни) и *патогенез* (механизм развития заболевания).

Переход от явления к сущности представляет собой *абстрагирование*, т. е. формирование в сознании человека умозрительной модели внутренних механизмов процесса и явления — того, что находится за пределами наших ощущений. С давних пор люди проникали в сущность явлений *интуитивным* путем. Выдающийся древнегреческий мыслитель Аристотель достиг в этом непревзойденных успехов и изложил свои правила перехода от явления к сущности в научном трактате под названием «Органон».

Однако интуиция зачастую подводит тех, кто уповает только на нее. Ярким примером ненадежности интуитивного пути от явления к сущности служит ошибка самого Аристотеля в решении основополагающей проблемы природы вещей — он считал, что естественное состояние природы — покой, а в движение ее приводит действие определенных сил. Это мнение Аристотеля исповедовалось человечеством в течение двух тысяч лет, чему способствовало возведение постулата Аристотеля в догмат католической религии в Средние века.

Только Г. Галилей и И. Ньютон опровергли Аристотеля и доказали, что естественное состояние природы — вечное движение, а покой создается при определен-

ном взаимодействии сил. Правильный вывод удалось сделать благодаря *наугному методу* изучения природы.

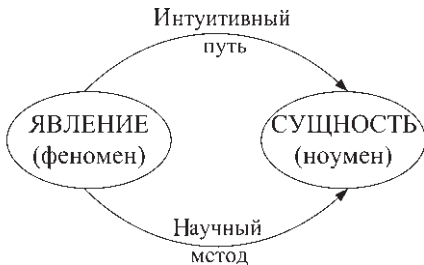
Научный метод развивался постепенно, и его принципы сформировались в начале XVII в. В 1620 г. английский философ Фрэнсис Бэкон (Франциск Бэкон Веруламский) в книге «Новый органон» сформулировал три атрибута (т. е. неотъемлемого, обязательного признака) научного метода, который представлялся альтернативой интуитивному пути познания. Даже название книги звучало как антитеза «Органону» Аристотеля. Бэкон утверждал: «Греческая мудрость — детство науки — плодотворна в спорах, но бесплодна в делах». Со столь категорическим вердиктом, очевидно, нельзя согласиться, поскольку ученые античного мира совершили много величайших открытий. Однако и ошибок они сделали немало. Причиной ошибок своих предшественников Бэкон считал излишнее доверие интуиции, «здравому смыслу» без проверки умозаключений в эксперименте. «Человеческий разум, предоставленный самому себе, — писал Ф. Бэкон, — не заслуживает доверия».

В развитие заявлений Бэкона первое научное общество в мировой истории (Лондонское Королевское общество), основанное в 1660 г., избрало своим девизом слова Горация: «Nullius in verba» («Ничего словесного»). Только эксперимент дает истинные сведения о сущности явлений («Истина лишь в опыте», — заявил позже И. Кант).

Таким образом, уже Ф. Бэкон провозгласил *эксперимент* первым атрибутом научного метода изучения природы. Вторым атрибутом было названо *измерение*, а третьим — *математический анализ* связи между количественными параметрами стимула и реакции изучаемой системы на него. Д. И. Менделеев, возглавлявший на рубеже XIX—XX вв. отечественную метрологию, утверждал, что «наука начинается с тех пор, как начинают измерять», а В. Гете, поэт и физиолог, со знанием дела учил современников и потомков: «В любом учении о природе ровно столько истины, сколько в нем математики».

Суть научного метода может быть отображена в виде схемы.

Пути проникновения в сущность явлений



Атрибуты научного метода:

1. Эксперимент: $R = f(S)$.
2. Измерения.
3. Математический анализ.

Эксперимент сводится к изучению реакции (R) исследуемого объекта на стимул (S). Стимулы и реакции на них измеряются, что позволяет установить функциональную зависимость: $R = f(S)$. В истории науки ее строили графоаналитическим методом и получали алгебраическую или тригонометрическую функцию. При ее дифференцировании приходили к дифференциальному уравнению (или системе дифференциальных уравнений), которое служило моделью детерминистических процессов. Изменяя начальные условия при решении дифференциальных уравнений, можно проанализировать прошлое и настоящее системы, а также прогнозировать будущее. Для стохастических процессов использовались методы теории вероятностей.

Обычно интуитивный путь познания и научный метод изучения природы гармонично сочетаются. Прежде чем применить научный метод, исследователь формулирует рабочую *гипотезу* на основе интуиции. Научная гипотеза отличается от простой фантазии тем, что содержит в себе план проверки ее достоверности научным методом. Для человека, не владеющего научной методологией, гипотеза —

Учебное издание

САМОЙЛОВ Владимир Олегович

МЕДИЦИНСКАЯ БИОФИЗИКА

Учебник

3-е издание, исправленное и дополненное

Редактор О. Ю. Гуршева

Техническое редактирование и компьютерная верстка И. Ю. Илюхиной

Подписано в печать 30.05.2013. Формат 70 × 100¹/₁₆.

Печ. л. 33 + 0,75 печ. л. цв. вкл.

Тираж 2000 экз. Заказ №

ООО «Издательство „СпецЛит“»

190005, Санкт-Петербург, Измайловский пр., 29

Тел./факс: (812) 251-66-54, 251-16-94

<http://www.speclit.spb.ru>

Отпечатано «Первая Академическая типография „Наука“»

199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

ISBN 978-5-299-00518-9



9 785299 005189