

Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины»

Д. Н. ДРОЗДОВ, А. В. ГУЛАКОВ

БИОФИЗИКА

Практическое пособие

для студентов
специальности 1-31 01 01 «Биология» (по направлениям)

Гомель
ГГУ им. Ф. Скорины
2025

УДК 577.35
ББК 28.071
Д754

Рецензенты:

кандидат биологических наук Н. В. Чуешова,
кандидат биологических наук А. А. Саварин

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
учреждения образования «Гомельский государственный
университет имени Франциска Скорины»

Дроздов, Д. Н.

Д754 Биофизика : практическое пособие / Д. Н. Дроздов,
А. В. Гулаков ; Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины. – Гомель :
ГГУ им. Ф. Скорины, 2025. – 30 с.
ISBN 978-985-32-0139-0

Пособие содержит краткие теоретические сведения о строении структур основных систем организма человека, рисунки и таблицы, которые способствуют закреплению материала, а также предназначены для облегчения усвоения материала студентами, заменяя препараты и наглядный материал при самостоятельной подготовке. Издание может быть использовано для изучения анатомии мозга человека на лабораторных, практических занятиях и семинарах, а также для самостоятельной работы. В конце каждого раздела предложены вопросы для самоконтроля, работа над которыми поможет закрепить изученный материал.

Адресовано студентам 1 курса специальности 1-31 01 01 «Биология» (по направлениям).

**УДК 577.35
ББК 28.071**

ISBN 978-985-32-0139-0

© Дроздов Д. Н., Гулаков А. В., 2025
© Учреждение образования
«Гомельский государственный университет
имени Франциска Скорины», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа 1. Определение коэффициента поверхностного натяжения жидкостей методом отрыва капель.....	5
Лабораторная работа 2. Основы биологической кинетики.....	9
Лабораторная работа 3. Биофизика мембран.....	12
Лабораторная работа 4. Фотобиология.....	16
Лабораторная работа 5. Радиационная биофизика.....	20
Лабораторная работа 6. Методы обработки биологических данных.....	25
Литература.....	30

ВВЕДЕНИЕ

Биофизика относится к одной из фундаментальных дисциплин в системе образования биологов, медиков и психологов. Получение систематических знаний в области биофизики способствует формированию широкого научного кругозора, становлению студента как самостоятельного исследователя и педагога.

Изучение биофизики часто вызывает значительные затруднения, которые связаны со сложностью и большим объемом предлагаемого материала. Задача настоящего пособия – помочь студентам сформировать базовые знания об основных физических процессах, протекающих в живых организмах.

Дисциплина «Биофизика» включена в учебный план подготовки студентов-биологов и является модулем государственного компонента «Общая биология», которая позволяет студентам приобрести знания о физико-химических процессах и физических явлениях в биологических объектах разного уровня организации. Вместе с такими дисциплинами, как цитология, гистология, физиология человека, биология индивидуального развития, она составляет необходимый базис для формирования современного специалиста биолога, что создает необходимую основу для успешного освоения знаний по другим биологическим дисциплинам.

Знания биофизики формируют у студентов основу научного мировоззрения, составляют фундамент прикладных исследований, в области фундаментальной биологии, лежат в основе познания физической и химической природы процессов жизнедеятельности.

Актуальность пособия «Биофизика» состоит в том, что в нем предложены шесть лабораторных работ, в которых рассматриваются вопросы биологической кинетики, термодинамики, молекулярной, фото- и радиобиологии, материал сопровождается подробным описанием экспериментальных работ, которые способствуют успешному освоению знаний.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ МЕТОДОМ ОТРЫВА КАПЕЛЬ

Цель работы: изучение явления поверхностного натяжения жидкостей разного состава методом отрыва капель.

Основные понятия по теме

Поверхность жидкости, соприкасающейся с другой средой, находится в особых условиях по сравнению с остальной массой жидкости. Возникают особые условия из-за того, что молекулы пограничного слоя жидкости, в отличие от молекул в глубине, окружены молекулами жидкости не со всех сторон. Молекулы пограничного слоя жидкости обладают избыточной поверхностной потенциальной энергией U_s по сравнению с молекулами в ее глубине. Величина поверхностного натяжения имеет диагностическое значение в лабораторной практике.

Обычно поверхностное натяжение биологических жидкостей сравнивают с водой – 72,5 мН/м при комнатной температуре. Например, в норме величина σ плазмы крови, сыворотки и мочи человека составляет соответственно 72, 56 и 70 мН/м. Значит поверхностное натяжение мочи и плазмы крови близко к воде, а сыворотки – меньше, чем у воды. Появление в моче желчных пигментов приводит к резкому снижению σ с 70 до 56 мН/м.

Энергия U_s обязана своим происхождением наличием поверхности жидкости, поэтому она пропорциональна площади S этой поверхности. Для того, чтобы увеличить площадь поверхности при постоянной температуре на бесконечно малую величину dS , надо совершить работу: $dA = dU_s = \sigma dS$, где σ – коэффициент поверхностного натяжения. Из формулы следует, что коэффициент поверхностного натяжения жидкости σ численно равен работе, которую нужно совершить, чтобы увеличить площадь поверхности на единицу:

$$\sigma = \frac{dA}{dS}. \quad (1)$$

Коэффициент поверхностного натяжения жидкости определяется природой жидкости и ее температурой. При повышении температуры коэффициент поверхностного натяжения уменьшается. При критической

температуре он становится равным нулю, т. к. исчезают разницы между жидкостью и ее насыщенным паром. Коэффициент поверхностного натяжения существенно изменяется при добавлении в жидкость поверхностно-активных веществ. Жидкость в равновесии имеет минимальную потенциальную энергию, поэтому должна иметь минимально возможную поверхность. Это означает, что существуют силы, стремящиеся сократить поверхность раздела фаз – это силы поверхностного натяжения F_σ . Определение коэффициента поверхностного натяжения: коэффициент поверхностного натяжения жидкости σ численно равен силе, действующей на единицу длины линии раздела фаз. Стремление жидкости уменьшить площадь поверхности проявляется в том, что малый объем жидкости принимает форму шара. В этом случае сила тяжести, действующая на каплю, мала, и форма капли жидкости определяется поверхностной энергией. Этим же объясняется шаровидная форма капель в состоянии невесомости.

Перед отрывом капли образуется шейка, радиус которой несколько меньше радиуса трубки. Вдоль окружности L этой шейки и действует сила поверхностного натяжения F_σ , направленная вверх, которая в момент отрыва равна силе тяжести. Если радиус шейки $r = R$, то $F_\sigma = 2\pi R\sigma = mg$, где m – масса одной капли жидкости. Зная массу одной капли жидкости, можно определить σ :

$$\sigma = \frac{mg}{2\pi R}, \quad (2)$$

где m – масса одной капли (усредненное значение), г;

g – ускорение свободного падения, $9,8 \text{ м/с}^2$;

R – внутренний радиус кончика трубки, принимаем $R = 0,25 \text{ мм}$.

Ход работы

Подготовьте штатив, емкости и шприц для выполнения измерения. Предварительно вскипятите и остудите воду до комнатной температуры. С помощью кипячения удаляются пузырьки воздуха, которые мешают проводить измерение. После того как вода остынет, наберите ее в шприц с пометкой вода, удалите воздух, если он попал в шприц. Объем жидкости $m_{\text{общ}}$ определяем по нижнему краю поршня, данные запишите в таблицу. Объемы измерений выбираются произвольно в диапазоне 1–5 мл.

Закрепите шприц носиком вниз, равномерно аккуратно надавливайте на основание поршня так, чтобы капли не сливались. Работу

выполняйте в паре, ваш напарник должен подсчитать количество капель N и записать результат для каждого объема в таблицу. По числу капель (N) найдите массу одной капли m для каждого измерения (объема). Определите среднюю массу капли и отклонение среднего значения $m \pm \Delta m$. Данные запишите в таблицу 1.

Таблица 1 – Данные эксперимента

Жидкость	№	$m_{\text{общ}}$	N	Средняя масса капли, $m \pm \Delta m$, г	Коэффициент поверхностного натяжения σ , мН/м
Вода	1				
	2				
	3				
Мыло	1				
	2				
	3				
Соль	1				
	2				
	2				

Рассчитайте длину границы раздела фаз, которая равна длине окружности шейки капли перед ее отрывом $L = 2\pi R$. Будем считать радиус шейки r равным внутреннему радиусу кончика трубки $R = 2,5 \pm 0,2$ мм. По формуле (2) для каждого случая рассчитайте коэффициент поверхностного натяжения жидкости σ . Расчеты проводите в системе СИ, результаты запишите в таблицу 1.

Найдите среднее значение коэффициента поверхностного натяжения. Оцените абсолютную и относительную погрешности среднего значения σ по формуле для прямых измерений. Запишите выражение для доверительного интервала. Проанализируйте полученный результат. Сравните полученный результат со справочными данными.

Повторить эксперимент для двух растворов – первый 10 %-ный раствор поваренной соли, второй раствор с добавлением ПАВ (жидкое мыло), данные занесите в таблицу. Используйте полученные значения коэффициентов поверхностного натяжения воды, солевого раствора и раствора для построения графика (учтите погрешности измерений). Сформулируйте вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент поверхностного натяжения? Получите его размерность.
2. Где возникают силы поверхностного натяжения? Как они направлены? Приведите примеры.
3. От каких факторов зависит коэффициент поверхностного натяжения?
4. Что такое поверхностно-активные вещества? Приведите примеры.
5. Объясните зависимость коэффициента поверхностного натяжения от температуры.
6. Объясните, почему при отсутствии внешних сил форма капель жидкости сферическая?
7. Расскажите о методе определения коэффициента поверхностного натяжения в данной работе.
8. Какое практическое значение имеет коэффициент поверхностного натяжения в лабораторной практике?
9. Как определить абсолютную и относительную погрешности определения среднего значения σ ?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. ОСНОВЫ БИОЛОГИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ

Цель работы: освоить методику определения температурного коэффициента и энергии активации процесса ассимиляции углекислоты веточкой элодеи.

Материалы и оборудование: элодея, секундомер, термометр, нитки, стеклянная палочка, стаканы разных диаметров, настольная лампа, лезвие, лёд.

Основные понятия по теме

Биологическая кинетика изучает скорость биологических процессов и зависимость ее от концентрации веществ, участвующих в биохимических превращениях, а также от внешних условий, в частности от температуры. Такая зависимость понятна, если учесть, что любое химическое превращение происходит при условии соударения молекул, пребывающих в беспорядочном тепловом движении. По мере повышения температуры увеличивается длина пробега, а тем самым и вероятность их столкновения друг с другом.

Таким образом, относительное количество молекул, способных вступить в реакции, или как принято говорить, активных молекул, с повышением температуры увеличивается, а сама скорость реакций возрастает. Величину, показывающую, во сколько раз увеличивается количество активных молекул при повышении температуры на 10 °С, называют температурным коэффициентом и обозначают символом Q_{10}

$$Q_{10} = \frac{V_{T_2}}{V_{T_1}}, \quad (3)$$

где V_{T_1} – скорость реакции при начальной температуре;

V_{T_2} – скорость реакции при увеличении температуры на 10 °С.

Между величиной температурного коэффициента Q_{10} и той избыточной энергией, которой должны обладать молекулы, чтобы их соударение привело к химической реакции (так называемой энергией активации E), существует зависимость, которую выражают формулой:

$$E = 0,46 T_1 T_2 \lg Q_{10}, \quad (4)$$

где E – энергия активации, ккал/моль;

T_1 и T_2 – температуры, выраженные в градусах абсолютной шкалы и отличающиеся друг от друга на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($T_2 = T_1 + 10\text{ }^{\circ}\text{C}$);

$\lg Q_{10}$ – десятичный логарифм температурного коэффициента.

Данной формулой пользуются и для вычисления энергии активации биологических процессов, в том числе секреции желез, пульсации сократительных вакуолей простейших, сокращения мышц и т. д.

Для вычисления энергии активации какого-либо биологического процесса необходимо:

- определить его скорость при двух температурах – T_1 и T_2 ;
- разделив величину скорости, полученную при T_2 на величину, полученную при T_1 вычислить величину Q_{10} ;
- найти в таблице логарифмов десятичный логарифм Q_{10} и подставить в формулу (4) полученное значение $\lg Q_{10}$ и произведение численных значений показаний температур, выраженных в градусах Кельвина (абсолютной шкалы).

Ход работы

Увеличение скорости биологических процессов можно наблюдать по количеству выделяющихся пузырьков при изменении температуры воды в сосуде с веточкой элодеи. Для опыта берут стеклянный цилиндр и наливают в него воду комнатной температуры. Выбирают свежую веточку элодеи и острой бритвой обновляют срез стебля у ее основания. Это делают для того, чтобы освободить засорившиеся межклеточные ходы в стебле и дать свободный выход образующимся газам. Веточку привязывают ниткой к стеклянной палочке так, чтобы свежесрезанный кончик был направлен кверху.

Цилиндр с веткой помещают в другой сосуд с водой также комнатной температуры и выставляют на свет (под лампу накаливания). При этом из срезанного конца веточки начинают выделяться пузырьки газа. Считают количество пузырьков, выделяющихся за 10 минут. Такой подсчет производят три раза и выводят среднее арифметическое. Аналогично определяют количество выделяющихся пузырьков при изменении температуры на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в ту или иную сторону. Полученные значения заносят в таблицу 2.

Для понижения температуры можно пользоваться кусочками льда, которые опускают в наружный сосуд. Температуру определяют по

термометру, помещенному во внутреннем стеклянном цилиндре. Для повышения температуры во внешний сосуд подают горячую воду. После чего ждут, чтобы температура воды во внутреннем сосуде повысилась на $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Во время подсчета выделяющихся пузырьков при пониженной и повышенной температурах необходимо постоянно следить (с помощью термометра), чтобы температура воды во внутреннем сосуде держалась на необходимом уровне.

Результаты подсчёта пузырьков при разных температурах заносят в таблицу 2.

Таблица 2 – Данные эксперимента

Количество пузырьков	Температура		
	$X - 10\text{ }^{\circ}\text{C}$	$X\text{ }^{\circ}\text{C}$	$X + 10\text{ }^{\circ}\text{C}$
Среднее значение			

По формулам рассчитывают Q_{10} и E .
Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первый закон термодинамики.
2. Что такое интенсивные параметры системы?
3. Что такое экстенсивные параметры системы? Приведите примеры.
4. Какие бывают термодинамические системы?
5. Сформулируйте первый закон термодинамики для разных типов термодинамических систем.
6. Что такое неравновесное состояние системы?
7. В чем отличие обратимых и необратимых процессов?
8. Сформулируйте метод ледяной калориметрии Лавуазье – Лапласа.
9. Что такое энергия? Что такое теплота? Что такое температура?
10. Что такое свободная и связанная энергия системы?
11. Что такое энтропия?
12. Как теорема Пригожина объясняет снижение энтропии в живых организмах?
13. Что происходит с живой системой, когда она выходит из стационарного состояния?
14. Что такое принцип соотносительности Онзагера?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. БИОФИЗИКА МЕМБРАН

Цель работы: определение осмотического давления по методу Барджера – Раста.

Материалы и оборудование: растворы NaCl разных концентраций (0,1–1,0 %-ный), кристаллы KMnO_4 , часовые стёкла, стеклянные капилляры, стеклянная палочка, пластилин.

Основные понятия по теме

Под осмотическим давлением раствора принято считать такое давление, которое производили бы частицы растворенного вещества в том случае, если бы оно, находясь в газообразной среде, занимало бы в ней такой же объем, какое занимает сам раствор. Осмотическое давление разбавленных растворов прямо пропорционально концентрации растворенного вещества и абсолютной температуре:

$$P = cRT, \quad (5)$$

где P – осмотическое давление раствора, атм;

c – концентрация раствора в моль/л;

T – абсолютная температура, °К;

R – универсальная газовая постоянная, равная 0,082 л атм/град моль.

В том виде, в каком представлена формула (5), в ней не учитывается возможность электролитической диссоциации растворенного вещества. В случае же полностью диссоциирующих электролитов формула принимает вид:

$$P = ncRT, \quad (6)$$

где n – число ионов.

Определение осмотического давления водной среды и биологических сред широко проводится в биологических исследованиях. Постоянство параметров внутренней среды (кровь, лимфа), в том числе и ее осмотического давления, обеспечивается наличием сложных нейрогуморальных регуляторных механизмов и специализированных органов секреции.

Для определения осмотического давления в биологии чаще используют косвенные методы, основанные, в частности, на зависимости упругости пара раствора от концентрации последнего. Понижение упругости пара раствора по сравнению с чистым растворителем, так же как и осмотическое давление, находится в линейной зависимости от молярной концентрации.

Ниже рассматривается один из косвенных методов определения, основанный на понижении упругости пара раствора по отношению к чистому растворителю – метод Барджера и Раста. При его помощи можно проводить измерения в очень малых объемах жидкости и при обычных температурах, не изменяющих свойств биокolloидов. По методу Барджера и Раста осмотическое давление исследуемого раствора сравнивают с заранее известной величиной осмотического давления контрольных растворов.

Ход работы

Готовят набор контрольных растворов хлористого натрия таких концентраций, которые позволяют определять осмотическое давление большинства биологических жидкостей беспозвоночных, холоднокровных и теплокровных позвоночных.

Исследуемый и один из контрольных растворов наливают на часовые стекла. Затем погружают в один из растворов капилляр и дают жидкости подняться до середины. Немного переворачивают капилляр, чтобы запустить пузырёк воздуха, и затем погружают капилляр в другой раствор. Последний поднимается по капилляру так, что пузырек воздуха окажется приблизительно на его середине. Для удобства последующего запаивания капилляра желательно на обоих его концах оставлять небольшие участки, незаполненные жидкостью. Концы капилляра быстро и тщательно вытирают ватой и запаивают с обоих концов пластилином.

Капилляр помещают на лист бумаги, к которому прикрепляют пластилином и оставляют на 30 минут.

Наблюдают за движением мениска. На поверхности того раствора, осмотическое давление которого меньше (а упругость пара соответственно больше), вода испаряется. Одновременно пар конденсируется на поверхности раствора, имеющего более высокое осмотическое давление и более низкую упругость пара. Поэтому объем первой из двух капель уменьшается, тогда, как объем второй увеличивается. В результате мениск движется в сторону с меньшей концентрацией.

Последовательно сравнивают исследуемый раствор с рядом контрольных и находят такой контрольный раствор, при котором объемы обеих капель остаются без изменения, т. е. мениски не движутся. В этом случае осмотическое давление исследуемого и контрольного растворов равны друг другу.

Растворы в течение всего опыта следует держать в закрытых сосудах во избежание испарения воды и изменения концентрации растворов. Результаты наблюдений оформляют в виде таблицы 3.

Таблица 3 – Данные эксперимента

Контрольный раствор	Исследуемый раствор	Направление движения мениска
0,5 % NaCl	X	
0,6 % NaCl	X	
0,7 % NaCl	X	
0,8 % NaCl	X	
0,9 % NaCl	X	
1,0 % NaCl	X	
Примечание: * – с целью облегчить наблюдение целесообразно подкрасить раствор кристаллами KMnO ₄ , один кристаллик на 100 мл раствора.		

Установив концентрацию исследуемого раствора, вычисляют его осмотическое давление по формуле (2), предварительно переведя процентную концентрацию раствора в молярную.

Пример. Пусть по данным измерений раствор имеет концентрацию, соответствующую 0,6 %-ному раствору NaCl, а температура во время измерений равна 17 °С. Молярный раствор NaCl содержит 58,5 г соли в 1 л воды. Следовательно, 0,6 %-ный раствор NaCl соответствует

$\frac{6}{58,5} = 0,1$ моль/л. Подставляя вычисленное значение в формулу (2)

и помня, что каждая молекула диссоциирует на два иона, получаем:

$$P = 2 \cdot 0,1 \cdot 0,082 \cdot (273 + 17) = 4,8 \text{ (атм.)}$$

По результатам работы сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение клеточной мембраны. Назовите основные функции биологической мембраны. Перечислите химический состав клеточной мембраны. Что такое лиофильные и лиофобные свойства? Из чего состоят фракции липидов?
2. Перечислите виды и опишите характеристику мембранного транспорта. Дайте определение пассивного и активного транспорта частиц.
3. Что такое плотность потока? В чем суть первого и второго законы Фика? Какая связь между коэффициентом диффузии D и коэффициентом растворимости P . Что такое градиент? Какая движущая сила в градиентных потоках?
4. Дайте определение понятиям «селективный канал» и «селективный фильтр». Какие свойства у селективных каналов? Какие типы ионных каналов и ионных насосов работают в клетке?
5. Что такое активный транспорт? Что показывает опыт Уссинга? Какие типы молекулярных машин осуществляют первичный активный транспорт ионов?
6. Что такое вторично-активный транспорт? Как происходит перенос аминокислот и сахаров через мембраны клеток эпителия?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ФОТОБИОЛОГИЯ

Цель работы: освоить методику исследования гемолиза эритроцитов под действием освещения в присутствии красителя.

Материалы и оборудование: кровь, физиологический раствор, раствор эозина, пипетки, пробирки, кюветы, источник освещения, ФЭК-52.

Основные понятия по теме

Первичные фотофизические и фотохимические стадии фотобиологических процессов (физиологического характера: фотосинтез, фототропизм, фототаксис и т. п.; патологического характера: повреждения, связанные с действием УФ-лучей и т. п.) являются предметом изучения биофизики. К таким стадиям относятся поглощение света, миграция энергии, запасание энергии на синглетном и триплетном уровнях, первичный фотохимический акт и стабилизация продуктов реакции.

Фотобиологические процессы протекают под действием излучения в ультрафиолетовой, видимой и близкой инфракрасной области спектра. Наиболее важными характеристиками излучения служат длина волны (λ), частота (ν), энергия кванта света (E) и общая энергия излучения (I). Эти величины связаны друг с другом следующими соотношениями:

$$E = h\nu; \quad (7)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}, \quad (8)$$

где c – скорость света;

ν – число квантов в световом потоке;

h – постоянная Планка.

Фотохимическим действием обладают только кванты, которые поглощаются, поэтому спектральная область фотобиологического процесса определяется спектром поглощения веществ, ответственных за этот процесс. Фотосинтез протекает под действием видимого и ближнего и инфракрасного излучения, поглощаемого фотосинтетическими пигментами (хлорофиллы); бактерицидное действие ультрафиолетовых лучей связано с поглощением квантов белками и нуклеиновыми кислотами.

Основными методами исследования фотобиологических процессов являются оптические и спектральные методы. Оптические свойства отражают способность молекул поглощать и трансформировать энергию света, то есть свойства, которые наиболее существенны для ее участия в фотобиологическом процессе. Вместе с тем спектральные методы позволяют исследовать процессы непосредственно в сложных биологических системах, таких как клетки, ткани или организмы, без нарушения их состояния.

Видимый свет обычно не оказывает заметного действия на такие объекты, как клетки и ткани животных. Однако в присутствии некоторых красителей (эритрозин, эозин, бенгальская роза, метиленовый синий и др.), а также ряда естественных пигментов (порфирина, глицерина и др.) освещение приводит к поражению и гибели клеток. Это явление носит название *фотодинамического действия*. В основе фотодинамического действия лежит реакция фотоокисления белков за счет световой энергии, поглощенной красителем.

Ход работы

Изучение гемолиза с помощью фотоколориметра.

При разрушении эритроцитов (гемолизе) происходит уменьшение мутности суспензии, а, следовательно, увеличение светопропускания. Поэтому изменение светопропускания суспензии эритроцитов может служить показателем гемолиза. Пропускание эритроцитов можно измерять на фотоэлектроколориметре типа ФЭК–52 или с помощью обычного визуального колориметра типа КОЛ–1. Чтобы поглощение не мешало измерению светорассеяния, определение гемолиза производят с красным светофильтром, т. е. в спектральной области, где гемоглобин не поглощается и все изменения связаны только с изменением мутности (светорассеяния).

Приготавливают 1 %-ную взвесь отмытых эритроцитов животного в физиологическом растворе. Две пробы исходной суспензии разводят в 100 раз: одну – дистиллированной водой, другую – физиологическим раствором. Пропускание обоих растворов измеряют на фотоколориметре с красным светофильтром.

Раствором для сравнения служит дистиллированная вода или физиологический раствор. Проводят повторные измерения через 10, 30 и 60 минут после разведения растворов. Следует убедиться в том, что пропускание суспензии, разведенной водой (гипотонический гемолиз), значительно превышает пропускание эритроцитов в физиологическом растворе (контроль).

Исследование гемолиза эритроцитов под действием освещения в присутствии красителя.

Готовят 1 %-ную суспензию эритроцитов в физиологическом растворе.

В две пробирки наливают по 9 мл красителя эозина (проба 1 и проба 2) – и в две пробирки проба по 9 мл физиологического раствора (проба 3 и 4).

В каждую из пробирок добавляют по 1 мл 1 %-ной суспензии эритроцитов.

Пробы 1 и 3 облучают источником света в течение 20 минут, а пробы 2 и 4 ставят в темноту.

В качестве источника для облучения используют лампу накаливания мощностью 500 Вт (проекторная или прожекторная лампа). Пробирки с облучаемой суспензией помещают на расстоянии 25 см от лампы. Чтобы исключить нагревание объекта инфракрасным излучением лампы, между источником света и пробирками с суспензией эритроцитов помещают стеклянный сосуд с плоскопараллельными стенками, заполненный 0,5 %-ным раствором CuSO_4 (толщина слоя раствора должна быть около 5–10 см).

Затем все пробы оставляют в темноте на 10 минут.

Каждые 15 минут проводят измерение светопропускания растворов в каждой пробе. Измерение проводят, как описано выше. В качестве раствора сравнения используют 0,04 %-ный раствор эозина на физиологическом растворе. В крайнем случае, в качестве раствора сравнения можно использовать дистиллированную воду.

Результаты работы оформляют в виде таблицы 4.

Таблица 4 – Данные эксперимента

Проба	Т, %				
	15 мин.	30 мин.	45 мин.	60 мин.	75 мин.
Э+эозин+свет					
Э+эозин, без света					
Э+ физ. р-р+ свет					
Э+физ. р-р, без света					

По результатам работы постройте график зависимости коэффициента светопропускания от времени облучения.

Сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Охарактеризуйте световое излучение. В чем предмет фотобиологии? Что входит в состав солнечного спектра? О чем говорит волновая теория света?

2. Что такое тепловое и люминесцентное излучение? Дайте определение понятиям «синглетное состояние» и «триплетное состояние». Что такое 1 эйнштейн?

3. Что такое ультрафиолетовое излучение? Что такое излучение видимого спектра и излучение инфракрасного спектра? Что такое интенсивность излучения?

4. В чем суть закона поглощения света (закон Бугера – Ламберта – Бера)? Какие электроны участвуют в электронных переходах? Что такое коэффициент поглощения, светопропускания и оптическая плотность?

5. Какие бывают типы и классы фотобиологических реакций? Назовите последовательность фотобиологических реакций. Дайте определение понятию «хроматофор». Какие бывают стадии фотобиологических реакций?

6. Что такое информационная фотобиологическая реакция? В чем заключается трансдукция сигнала в рецепторном аппарате сетчатки? Какие существуют биосинтетические фотобиологические реакции?

7. Дайте определение фотодинамическому действию света. Что такое явление кислородного эффекта? В чем его сенсibiliзирующее действие? Назовите мутационные фотобиологические реакции.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. РАДИАЦИОННАЯ БИОФИЗИКА

Цель работы: определение содержания ^{137}Cs в почве.

Материалы и оборудование: набор образцов с известной массой и активностью, свинцовый домик, дозиметр ДРГ-01Т.

Основные понятия по теме

Радиоактивность – явление самопроизвольного превращения (распада) атомных ядер некоторых химических элементов (урана, тория, радия и др.), приводящее к изменению их атомного номера и массового числа. Такие элементы называются *радиоактивными*. *Активность* – это мера количества радиоактивного вещества, выражаемая числом радиоактивных превращений в единицу времени. В системе единиц СИ за единицу активности принято одно ядерное превращение в секунду (расп./с). Эта единица получила название беккерель (Бк). Внесистемной единицей измерения активности является кюри (Ки). *Кюри* – это единица активности радионуклида в источнике, равная активности нуклида, в котором происходит $3,7 \times 10^{10}$ актов распада в одну секунду. Единица активности кюри соответствует активности 1 г Ra.

Применяют также дольные и кратные единицы. Внесистемная единица активности кюри связана с беккерелем следующим образом: $1 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{10} \text{ расп./с} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Бк}$; $1 \text{ Бк} = 2,7 \times 10^{-11} \text{ Ки}$; милликюри (1 мКи) = $10^3 \text{ Ки} = 3,7 \times 10^7 \text{ Бк}$; микрокюри (1 мкКи) = $10^{-6} \text{ Ки} = 3,7 \times 10^{-4} \text{ Бк}$. В дозиметрии применяются удельная A_m (Бк/кг), объемная A_v (Бк/м³), молярная $A_{\text{мол}}$ (Бк/моль) и поверхностная A_s (Бк/м²) активности источников.

Для характеристики дозы по эффекту ионизации в воздухе, используют экспозиционную дозу рентгеновского и γ -излучений – количественная характеристика, выраженная суммарным электрическим зарядом ионов одного знака, образованных в единице объема воздуха в условиях электронного равновесия. За единицу экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений принимается кулон на килограмм (Кл/кг).

Внесистемной единицей экспозиционной дозы рентгеновского и γ -излучений является рентген (R). *Рентген* – единица экспозиционной дозы фотонного излучения, при прохождении которого через 0,00129 г

воздуха в результате завершения всех ионизационных процессов в воздухе создаются ионы, несущие одну электростатическую единицу количества электричества каждого знака.

Радиационный фон окружающей среды состоит из космических лучей, излучений изотопов земной коры и антропогенной радиации, возникшей в результате целесообразной человеческой деятельности, а также безответственного обращения с источниками излучения.

Радиационный фон, создаваемый космическими лучами, дает чуть меньше половины внешнего облучения, получаемого населением от естественных источников радиации. Космические лучи в основном приходят к нам из глубин Вселенной, но некоторая их часть рождается на Солнце во время солнечных вспышек. Космические лучи могут достигать поверхности Земли или взаимодействовать с ее атмосферой, порождая вторичное излучение и приводя к образованию различных радионуклидов.

Основные радиоактивные изотопы, встречающиеся в горных породах Земли, это калий-40, рубидий-87 и члены двух радиоактивных семейств, берущих начало соответственно от урана-238 и тория-232 долгоживущих изотопов, включившихся в состав Земли с самого ее рождения.

Человек подвергается облучению двумя способами. Радиоактивные вещества могут находиться вне организма и облучать его снаружи; в этом случае говорят о внешнем облучении. Или же они могут оказаться в воздухе, которым дышит человек, в пище или в воде и попасть внутрь организма. Такой способ облучения называют внутренним.

За последние несколько десятилетий человек создал несколько сотен искусственных радионуклидов и научился использовать энергию атома в самых разных целях: в медицине и для создания атомного оружия, для производства энергии и обнаружения пожаров, для изготовления светящихся циферблатов часов и поиска полезных ископаемых. Все это приводит к увеличению дозы облучения как отдельных людей, так и населения Земли в целом.

Экспозиционная доза до аварии на ЧАЭС на территории республики обычно не превышала 10–11 мкР/ч. По данным геологов, ее величина в районе Мозыря равнялась 2 мкР/ч, в северных регионах Беларуси, где расположены глинистые осадочные породы, обогащенные ураном, – 12 мкР/ч.

Основополагающими в радиобиологии являются понятия *радиочувствительности* и *радиоустойчивости* (*радиорезистентности*). Понятие *радиочувствительности* определяет собой способность организма проявить наблюдаемую реакцию при малых дозах ионизирующей радиации.

Ее мерой является полулетальная доза (ЛД_{50/30}), при которой происходит гибель 50 % особей в течение 30 суток. Для оценки применяются также летальные дозы ЛД₁₀₀ и различные частично летальные дозы ЛД₃₀, ЛД₅₀, ЛД₉₀.

Радиорезистентность подразумевает способность организма выжить при облучении в определенных дозах или не проявить ту или иную реакцию на облучение. Как же отмечалось ранее, первые радиобиологические исследования выявили подверженность живых организмов действию ионизирующей радиации. Впоследствии были установлены количественные зависимости проявления радиобиологических эффектов от величины дозы излучения, наряду с этим устанавливались и конкретные механизмы действия излучения на организмы на всех уровнях. Была также установлена пропорциональная зависимость между дозой ионизирующего излучения и соответствующим ей радиобиологическим эффектом.

Выделяют три этапа биологического действия ионизирующего излучения: физический, химический и биологический.

Физический этап действия излучения охватывает чисто физические явления взаимодействия частиц или квантов с веществом клетки – образование ионов и возбужденных атомов и молекул. При дозе 10 Гр число ионизированных и возбужденных молекул в клетке оценивается в 10^6 – 10^7 .

Химический этап в развитии радиобиологического эффекта начинается с образования в облученных клетках активных ионов и радикалов, вступающих в химические реакции с ненарушенными молекулами. Результатом прохождения данных реакций является появление химических соединений в принципе не характерных для облученной клетки.

Биологический этап действия ионизирующего излучения на живую клетку определяется, в основном, концентрацией новых веществ в клетке в результате прохождения радиационно-химических реакций на первых двух этапах. Именно наличие таких соединений, зависящее от дозы облучения, определяет широкий спектр нарушений клеточных структур.

Для измерения радиации используется дозиметр ДРГ–01Т. Он состоит из детектора и регистрирующего устройства. Ионизирующая частица попадает в детектор и вызывает газовый разряд. Прибор измеряет мощность экспозиционной дозы (МЭД). Шкала прибора проградуирована в мкР/ч.

Ход работы

Построение калибровочного графика.

Калибровку прибора проводят с использованием 5 образцовых источников излучения с известной активностью. Образцовый источник

помещают в свинцовый домик и измеряют МЭД в течение 10 минут. Отсчет показаний прибора производят каждые 15 секунд. Затем рассчитывают среднее показание. Аналогичным способом измеряют фоновую МЭД в отсутствие образцового источника.

Рассчитывают активность образца:

$$A = \text{уд. } A \times M = \text{Бк/кг} \times \text{кг}, \quad (9)$$

где A – активность образца, Бк/кг;

уд. A – удельная активность образца, Бк/кг;

M – масса образца, кг.

Для калибровочного графика строят зависимость активности (Бк) от МЭД (мкР/ч). По точкам проводят прямую линию, равноотстоящую от точек.

Определение содержания ^{137}Cs в почве.

Сосудом «дента» отобрать образец почвы. Сосуд «дента» должен быть заполнен до половины. Взвесить на электронных весах и определить чистый вес почвы. Масса сосуда «дента» равна 16 г.

Произвести измерение МЭД с образцом почвы способом, описанным выше.

Рассчитать удельную активность ^{137}Cs в почве:

$$\text{уд. } A = \frac{A}{M} = \text{Бк/кг}. \quad (10)$$

По результатам работы сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое радиоактивность? Назовите положения закона радиоактивного распада. В чем физический смысл постоянной радиоактивного распада? Какие используют единицы измерения радиоактивности?

2. Кто открыл явление радиоактивности? Какие виды и характеристики радиоактивного распада Вы знаете? Что такое правило смещения? Дайте определение понятия «период полураспада».

3. Что такое ионизирующее излучение, непосредственное и опосредованное (косвенное) излучение?

4. Как осуществляется взаимодействие электромагнитного ионизирующего излучения с веществом? Что такое ядерная реакция? В чем

суть ядерного резонансного рассеяния? Что такое Брэгговское рассеяние и комптоновское излучение? Что представляет собой эффект образования пар?

5. Как осуществляется взаимодействие корпускулярного ионизирующего излучения с веществом? Что такое упругое и неупругое рассеивание и как происходит удельная ионизация среды? Что такое тормозное излучение?

6. Дайте определение экспозиционной дозы, поглощенной дозы. В каких единицах измеряют экспозиционную и поглощенную дозы? Что такое поглощенная доза внешнего и внутреннего облучения?

7. Дайте определения понятиям «коэффициент качества излучения», «эквивалентная доза», «эффективная доза», «взвешивающий коэффициент». В каких единицах измеряются эквивалентная и эффективная дозы?

8. В чем заключается действие ионизирующего излучения на нуклеиновые кислоты? Что такое прямое и косвенное действие?

9. Какое действие ионизирующее излучение оказывает на белки? Как происходит образование свободных радикалов? Какое действие излучение оказывает на липиды и углеводы?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6.

МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Цель работы: освоить методику статистического анализа распределения биологических объектов.

Материалы и оборудование: циркуль, линейка, штангенциркуль, весы, табличный редактор *Microsoft Excel*.

Основные понятия по теме

Математическая статистика использует массовые явления и результаты обследования большого числа объектов, т. е. совокупности. *Генеральная совокупность* – это множество биологических объектов, обладающих признаками сходства и различия. Все объекты генеральной совокупности должны иметь хотя бы один общий признак, позволяющий их классифицировать и сравнивать. Наличие общего признака – основа для образования статистической совокупности.

Если генеральная совокупность слишком многочисленна, либо ее элементы малодоступны, используют выборочный метод наблюдения, когда наблюдение проводят только части объектов, и по результатам наблюдения делают вывод.

Выборка – это множество вариантов (образцов), отобранных определенным образом из генеральной совокупности для участия в исследовании.

Варианта – это отдельное значение варьируемого признака, которое он принимает в ряду распределения.

Объем выборки (n) – это число случаев, включённых в выборочную совокупность.

Выборка должна отвечать критерию *репрезентативности*, т. е. сохранять свойства и признаки генеральной совокупности. Для этого критерия выборка должна быть однородной, чем более неоднородна генеральная совокупность, тем больше должна быть выборка. Критерием однородности в биологических исследованиях является коэффициент вариации 30–35 %.

Для работы с выборкой данных используют *вариационный ряд*, т. е. упорядоченный ряд значений признака объектов. Значения признака варьируют в связи с характером распределения, что позволяет выявить закономерности и общие тенденции. Распределение случайной величины – это функция, определяющая вероятность того, что варианта принимает заданное значение.

Типы распределений в биологических исследованиях:

- нормальное распределение;
- логнормальное распределение;
- экспоненциальное распределение;
- пуассоновское распределение;
- биномиальное распределение.

В биологических исследованиях часто встречается нормальное распределение, т. е. такой тип распределения вероятностей, который характеризуется симметричной колоколообразной кривой, в центре которой находится математическое ожидание. Большинство значений случайной величины сосредоточено около среднего, чем дальше значение от положения среднего, тем меньше вероятность его возникновения.

Для определения степени связи эмпирической и теоретической функции распределения используют сравнение выборочных частот. Связь между эмпирической (выборочной) функцией распределения вариантов и теоретической функцией распределения можно оценить с помощью достоверной вероятности (p).

Методы χ -квадрат и анализ асимметрии и эксцесса в сочетании позволяют оценить соответствие наблюдаемых данных теоретическому распределению. χ -квадрат проверяет гипотезу о равенстве распределений, асимметрия и эксцесс дают информацию о форме распределения.

Предпосылки для применения метода χ -квадрат:

- независимость наблюдений, т. е. результат одного наблюдения не должен влиять на результат другого;
- достаточный размер выборки определяется статистическим ожиданием с частотой в каждой ячейке не менее 5;
- сумма всех наблюдаемых частот должна соответствовать сумме всех ожидаемых частот.

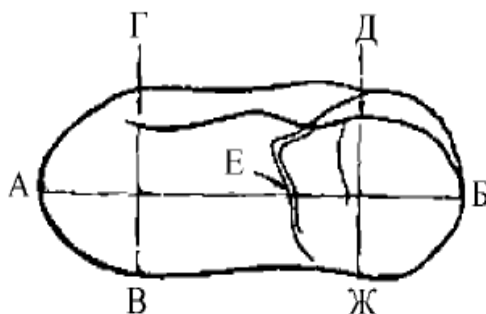
Эксцесс – это число, которое показывает степень остроты пика распределения. *Асимметрия* – это число, которое показывает степень асимметрии распределения вариантов относительно среднего значения (принимает значения от -1 до 1). Анализ асимметрии и эксцесса позволяет оценить форму распределения данных и отклоняется от нормального распределения. Для нормального распределения $As = 0$, $Es = 3$.

Ход работы

Определите характер распределения и сравните основные промеры широко распространенных пресноводных моллюсков *Planorbis corneus* и *Planorbis planorbis*, обитающих в природных водоемах

Гомельского района. Методика измерения раковины моллюсков предложена Е. М. Хейсиным. Согласно методике стандартные промеры, употребляемые при описании и определении видов брюхоногих моллюсков – это диаметр раковины, ширина устья, высота устья, высота раковины (рисунок 1).

Морфометрия моллюсков – результат взаимодействия генетических факторов и факторов окружающей среды, среди которых ключевую роль играют гидрологические условия, химический состав воды, температура, соленость и доступность пищи, которые могут значительно влиять на морфологические размеры раковины моллюсков.



АБ – диаметр раковины, ВГ – высота раковины,
ДЖ – высота устья, БЕ – ширина устья

Рисунок 1 – Схема измерения раковины *Planorbis corneus*

В быстрых реках моллюски часто имеют более плоские и прочные раковины, чтобы противостоять течению, в то время как в стоячих водах раковины могут быть более округлыми и хрупкими. Глубина водоема влияет на размер раковины, в глубоких водоемах моллюски испытывают большее давление. Важным компонентом раковин моллюсков является кальций, его недостаток ведет к уменьшению размера раковины и ее истончению. Низкий уровень кислорода в воде замедляет рост моллюсков, и приводит к деформации раковин.

Используя наборы данных (таблица 5) для раковин *Planorbarius planorbis* и *Planorbis corneus*, постройте вариационные ряды и оцените соответствие рядов закону нормального распределения:

1. Упорядочьте и пронумеруйте по возрастанию значения.
2. Определите диапазоны интервалов, используйте формулу Стерджеса:

$$H = 1 + 3,32 \times \lg(n), \quad (11)$$

где n – объем выборки.

3. Определите абсолютную (наблюдаемая частота), относительную и накопленную частоты.

4. Определите ожидаемую (для нормального распределения) частоту.

5. Определите критерий χ -квадрат и достоверную вероятность значения для степени свободы df :

$$df = (r - 1) \times (c - 1), \quad (12)$$

где r – количество строк;

c – количество столбцов.

6. Сравните p -значение с уровнем значимости 0,05 – если p -значение $< 0,05$, распределение отличается от нормального, если p -значение $> 0,05$ распределение не отличается от нормального и подчиняется закону Гауса.

Таблица 5 – Данные морфометрии

<i>Planorbarius planorbis</i>	<i>Planorbarius corneus</i>
Высота ВГ, см: 1,75, 1,85, 1,90, 1,95, 2,00, 2,00, 2,20, 2,20, 2,20, 2,30, 2,30, 2,30, 2,40, 2,40, 2,40, 2,44, 2,45, 2,50, 2,50, 2,60, 2,60, 2,60, 2,60, 2,65, 2,67, 2,69, 2,70, 2,75, 2,78, 2,80, 2,95, 2,98, 2,98, 3,00, 3,05, 3,05, 3,06, 3,10, 3,26, 3,27, 3,27, 3,28, 3,35, 3,50, 2,05, 2,15	Высота ВГ, см: 4,10, 4,20, 4,30, 4,50, 4,50, 4,50, 4,60, 4,60, 4,60, 4,60, 4,70, 4,70, 4,75, 4,80, 4,85, 4,90, 4,90, 5,00, 5,05, 5,10, 5,10, 5,10, 5,10, 5,15, 5,20, 5,20, 5,20, 5,30, 5,30, 5,30, 5,30, 5,30, 5,30, 5,35, 5,40, 5,40, 5,40, 5,40, 5,40, 5,40, 5,50, 5,70, 5,70, 5,75, 5,80, 6,20
Диаметр, АБ, см: 2,45, 2,50, 2,60, 2,70, 2,70, 2,70, 2,75, 2,80, 2,80, 2,85, 2,90, 2,90, 2,90, 2,90, 2,93, 2,93, 2,93, 2,93, 3,10, 3,10, 3,10, 3,16, 3,16, 3,15, 3,14, 3,20, 3,20, 3,20, 3,20, 3,20, 3,25, 3,30, 3,30, 3,56, 3,56, 3,50, 3,50, 3,60, 3,62, 3,65, 3,65, 3,65, 3,70, 3,70, 3,75, 3,82	Диаметр, АБ, см: 1,10, 1,30, 1,40, 1,40, 1,50, 1,54, 1,55, 1,65, 1,70, 1,70, 1,70, 1,70, 1,70, 1,74, 1,79, 1,80, 1,80, 1,80, 1,83, 1,85, 1,90, 1,90, 1,90, 1,94, 2,00, 2,00, 2,05, 2,05, 2,10, 2,10, 2,19, 2,26, 2,30, 2,30, 2,30, 2,35, 2,35, 2,35, 2,38, 2,40, 2,40, 2,45, 2,50, 2,55, 2,60, 2,70
Масса, г: 4,20, 4,30, 4,35, 4,40, 4,80, 5,00, 5,10, 5,20, 5,30, 5,50, 5,80, 6,10, 6,10, 6,20, 6,25, 6,25, 6,30, 6,45, 6,46, 6,55, 6,60, 6,65, 6,80, 6,90, 6,90, 7,10, 7,60, 7,70, 7,70, 7,70, 7,80, 8,20, 8,20, 8,26, 8,26, 8,26, 8,40, 8,70, 8,86, 8,95, 9,00, 9,05, 9,30, 9,35, 9,36, 9,45	Масса, г 4,20, 5,50, 6,80, 7,04, 7,06, 7,30, 7,42, 7,50, 7,50, 7,60, 7,60, 7,60, 7,67, 7,75, 7,85, 8,00, 8,05, 8,10, 8,25, 8,28, 8,30, 8,30, 8,35, 8,36, 8,45, 8,45, 8,50, 8,54, 8,65, 8,65, 8,80, 8,90, 8,90, 9,05, 9,10, 9,10, 9,15, 9,25, 9,30, 9,40, 9,48, 9,75, 9,96, 10,20, 10,40, 12,00

7. Используйте образцы раковин неизвестных видов, измерьте диаметр, высоту и массу раковин, определите, с какой вероятностью можно отнести предложенные образцы к одному из видов *Planorbarius planorbis* или *Planorbis corneus*. Для этого используйте функцию НОРМРАСП (х, среднее; стандартное_откл; интегральный=0) табличный редактор *Microsoft Excel*.

По результатам работы сделайте вывод.

Контрольные вопросы

1. Что такое генеральная совокупность?
2. Что такое выборка? Какую выборку можно считать репрезентативной?
3. Что такое вариационный ряд?
4. Что такое нормальное распределение?
5. Какие условия требует метод χ -квадрат?
6. Что такое эксцесс и асимметрия?
7. Как определить стандартное отклонение вариационного ряда?
8. Что такое уровень значимости?
9. Что такое достоверная вероятность?

ЛИТЕРАТУРА

1. Артюхов, В. Г. Биофизика / В. Г. Артюхов, В. П. Шмелева. – Воронеж : Изд. Воронежского университета, 1994. – 366 с.
2. Антонов, В. Ф. Биофизика / В. Ф. Антонов. – М. : Гум. издат. центр «Владос», 2002. – 288 с.
3. Рубин, А. Б. Лекции по биофизике / А. Б. Рубин. – М. : Изд-во Московского ун-та, 1994. – 160 с.
4. Костюк, П. Г. Биофизика / П. Г. Костюк. – Киев : Выща школа, 1988. – 504 с.
5. Конев, С. В. Фотобиология / С. В. Конев, И. Д. Волотовский. – Минск : Изд-во Белорусского ун-та, 1979. – 383 с.
6. Антонов, В. Ф. Физика и биофизика: курс лекций для студентов медицинских вузов : учебное пособие / В. Ф. Антонов, А. В. Коржуев. – М. : Гум. издат. центр «Владос» 2004. – 240 с.
7. Ремизов, А. Н. Медицинская и биологическая физика / А. Н. Ремизов. – М. : Медицина, 1987. – 560 с.
8. Кантор, Ч. Биофизическая химия / Ч. Кантор, П. Шиммел. – М. : Мир, 1984. – Т. 1. – 336 с.
9. Кантор, Ч. Биофизическая химия / Ч. Кантор, П. Шиммел. – М. : Мир, 1984. – Т. 2. – 496 с.
10. Кантор, Ч. Биофизическая химия / Ч. Кантор, П. Шиммел. – М. : Мир, 1985. – Т. 3. – 536 с.
11. Уильямс, В. Физическая химия для биологов / В. Уильямс, Х. Уильямс. – М. : Мир, 1976. – 600 с.
12. Плонси, Р. Биоэлектричество. Количественный подход / Р. Плонси, Р. Барр. – М. : Мир, 1992. – 366 с.

Производственно-практическое издание

**Дроздов Денис Николаевич,
Гулаков Андрей Владимирович**

БИОФИЗИКА

Практическое пособие

Редактор Е. С. Балашова
Корректор В. В. Калугина

Подписано в печать 10.11.2025. Формат 60х84 1/16.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 2,03.

Тираж 10 экз. Заказ 637.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования

«Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины».

Специальное разрешение (лицензия) № 02330 / 450 от 18.12.2013 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий в качестве:

издателя печатных изданий № 1/87 от 18.11.2013 г.;

распространителя печатных изданий № 3/1452 от 17.04.2017 г.

Ул. Советская, 104, 246028, Гомель.

