

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Косенок Сергей Михайлович

Должность: ректор

Дата подписания: 19.06.2024 12:30:08

Уникальный программный ключ:

e3a68f3ea1c62c74b54f4998099d7d6bf4cf836

#### Лабораторная работа № 4

### ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ И НЕЙРОКОМПЬЮТЕРЫ

Цель работы:

Обучаемый должен знать:

1. Основные теории строения нейронных сетей (НС).
2. Основы компартментной модели НС.
3. Основы работы искусственных НС.

Обучаемый должен уметь:

1. Объяснить основы работы НС.
2. Объяснить основы моделирования НС и распознавания типа НС по результатам расчетов.
3. Проводить обучение НС и анализ значимости признаков НС используя в качестве инструментария нейросетевой имитатор "Multineuron 2.0" или Neuro-pro.

#### Практическое значение

Разработка вычислительных машин с использованием принципов построения биологических нейронных сетей позволяет обрабатывать неполные наборы данных и придавать работе машин свойства адаптивности, присущие живому. Это повышает общую скорость работы и позволяет применить их в областях с низкой алгоритмизацией задач и большим переменным количеством информации.

#### Литература

1. Биофизика сенсорных систем. / Под ред. В.О. Самойлова. – СПб.: ИнформМед, 2007 – 288 с.
2. Галушкин А.А. Нейронные сети. Основы теории. / Изд-во: Горячая Линия - Телеком, 2012, 496 с.
3. Еськов В.М., Мишина Е.А., Филатов М.А., Филатова Д.Ю., Анализ психофизиологических функций человека управляющего сложными автоматизированными системами с помощью искусственных нейронных сетей. // Ученые Заметки ТОГУ. Приложение к журналу «Информатика и системы управления». – 2010. – Т1, № 1 – С.1-4.
4. Еськов В.М., Еськов В.В., Филатова О.Е., Хадарцев А.А. Особые свойства биосистем и их моделирование. // Вестник новых медицинских технологий – 2011 – Т. XVIII, №3 – С.331-332.
5. Комарцова Л.Г., Максимов А.В. Нейрокомпьютеры. М., Изд-во МГТУ им. Баумана, 2004.
6. Ричард М. Кроновер. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. М, Техносфера, 2006.
7. Сложность. Разум. Постнеклассика. <http://cmp.esrae.ru/issue/>

8. Соколовский А. Р., Соколовская И. Ю. Подготовка данных для построения нейросетевых моделей при малом количестве экспериментов. <http://ej.kubagro.ru/2010/08/pdf/27.pdf>
9. Тадеусевич Р., Боровик Б, Гончаж Т., Леппер Б. Элементарное введение в технологию нейронных сетей с примерами программ. / Изд-во: Горячая Линия - Телеком, 2011, 408 С.
10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. 2-е изд. М., "Вильямс", 2006.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО 1- МУ ЭТАПУ

"Самоподготовка"

#### Цель этапа.

1. Повторить исходную информацию из школьного курса.
2. Изучить и проверить свои знания по новой информации из лекционного курса.

Для изучения темы необходимо возобновить старые знания, связанные с понятиями о нервной ткани и высшей нервной деятельности (ВНД), а так же выучить новый материал, используя конспект лекций и вспомогательную литературу.

Для самоконтроля необходимо ответить на вопросы:

1. Обозначить круг задач решаемых искусственными НС. Привести несколько примеров.
2. Указать сходные и отличительные признаки биологического и искусственного нейронов.
3. Указать назначение обучающей выборки.
4. Назначение внешней выборки. Может ли она выполнять функции обучающей?
5. Что понимается под значимостью обучаемых параметров (вопросов)?
6. В чем смысл расчета значимости?
7. Чем нужно руководствоваться при начальном отборе признаков?

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО 2-МУ ЭТАПУ

"Выполнение работы"

Для работы программы требуется следующая конфигурация компьютера:

- Процессор Intel 80486 или совместимый
- Монитор SVGA с разрешением не менее 800\*600 точек
- Microsoft Windows 95 или Microsoft Windows NT 4.0, Windows XP, Windows 7.

Для установки программы необходимо запустить программу-инсталлятор Setup.exe. Будет произведено копирование следующих файлов:

- ReadMe.txt - этот файл
- History.txt - изменения и дополнения по сравнению с предыдущей версией
- NeuroPro.exe - исполняемый файл
- NeuroPro.hlp - файл справки
- NeuroPro.cnt - служебный файл справки

- Readme.doc - краткое описание программы (Microsoft Word 6.0)
- UserGuide.doc - руководство пользователя (Microsoft Word 6.0)
- Boltz.db - демонстрационный файл данных
- Election.db - демонстрационный файл данных
- Распространяемые файлы Borland Database Engine v.4.51

#### Возможности программы NeuroPro 0.25:

1. Чтение, запись, редактирование, конвертирование файлов данных, представленных в форматах dbf (СУБД dBase, FoxPro, Clipper) и db (СУБД Paradox).
2. Создание слоистых нейронных сетей для решения задач прогнозирования и классификации:
  - Число слоев нейронов - до 10.
  - Число нейронов в слое - до 100. Число нейронов в слое может задаваться отдельно для каждого слоя нейронов.
  - Нейроны - сигмоидные с нелинейной функцией  $f(A)=A/(|A|+c)$ , крутизна сигмоиды может задаваться отдельно для каждого слоя нейронов.
  - Работа с количественными (непрерывными) и качественными (дискретнозначными, от 2 до 20 дискретных состояний для признака) входными признаками.
  - Решение задач прогнозирования (предсказания значений количественных выходных признаков) и классификации (предсказание состояний качественных выходных признаков)
  - Нейросеть может иметь несколько выходных сигналов (решать одновременно несколько задач прогнозирования и классификации); для каждого из выходных сигналов могут быть установлены свои требования к точности решения задачи.
3. Обучение нейронной сети с применением одного из следующих методов оптимизации (градиент вычисляется по принципу двойственного функционирования):
  - Градиентный спуск.
  - Модифицированный РапТап-метод.
  - Метод сопряженных градиентов.
  - Квазиньютоновский BFGS-метод.
4. Тестирование нейронной сети, получение статистической информации о точности решения задачи.
5. Вычисление и отображение значимости входных сигналов сети, сохранение значений показателей значимости в файле на диске.
6. Внесение случайных возмущений в веса синапсов сети.
7. Упрощение (контрастирование) нейронной сети:
  - Сокращение числа входных сигналов сети.
  - Сокращение числа нейронов сети.
  - Равномерное прореживание структуры синапсов сети.
  - Сокращение числа синапсов сети.
  - Сокращение числа неоднородных входов (порогов) нейронов сети.

- Бинаризация весов синапсов сети (приведение весов синапсов и пороговых входов к конечному набору выделенных значений). Возможен выбор из 4-х наборов выделенных значений.

8. Генерация вербального описания нейронной сети. Вербальное описание может редактироваться и сохраняться в файле на диске.

Рассмотрим один из примеров применения НС для решения задачи классификации. В качестве инструментария будет использован нейросетевой имитатор **NeuroPro 0.25**.

В качестве стартовой обучающей выборки мы использовали результаты проведенных тестов на предмет состояния психофизиологических функций, которые регистрировали с помощью РТЕСТ (см. литература).

Всего было обследовано 146 учащихся (в условиях широтных перемещений с севера на юг РФ и обратно) 1-7-х классов школ г. Сургута и Сургутского района в четыре этапа: "до отъезда", "после приезда" в санаторий (время пребывания в санатории – 2 недели), "перед отъездом" из него и "по приезду" в Сургут на предмет исследования влияния широтных перемещений на сенсомоторные психофизиологические функции.

В рамках применения нейро-ЭВМ были поставлены задачи, например, чем отличаются дети (мальчики и девочки) до отъезда в санаторий «Юный Нефтяник» и после приезда в г. Сургут. Подобные задачи имеют два общих признака: у БДС должно быть  $dx/dt = 0$  (хотя бы на малом интервале времени  $\tau$ ), и они должны образовывать разные группы объектов (испытуемых). Например, эти группы испытуемых могут отличаться по полу, возрасту, наличию других болезней или вообще различаться по условиям пребывания в экосреде. В любом случае мы как бы имеем дело со стационарными условиями (стационарными группами), но эти группы имеют отличия существенные или даже не существенные, но методы хаоса и теории самоорганизации могут выделить эти отличия и даже дать им количественную оценку.

Работа с нейронными сетями возможна только в рамках некоторого нейропроекта. Для того чтобы создать нейропроект, необходимо выбрать пункт меню "Файл/Создать" или нажать кнопку "Создать" в панели кнопок, при этом появляется окно следующего вида (рис.4.1).

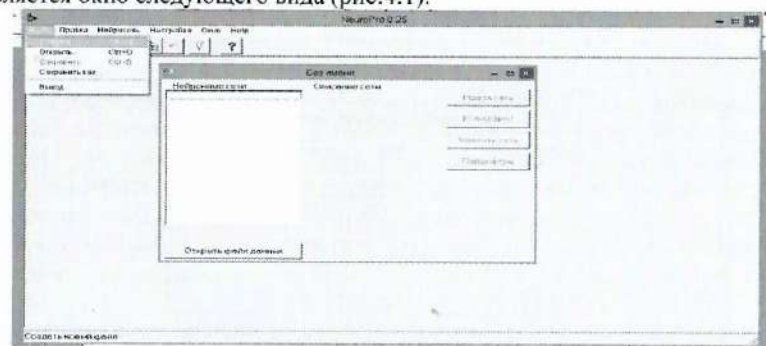


Рис.4.1. Вид окна после выбора “Файл/Создать”

Создание нейропроекта. Для создания новой нейронной сети необходимо нажать кнопку “Новая сеть” в окне нейропроекта и заполнить окно для создания нейронной сети.

Вам предлагаются уже готовые файлы в формате \*.dbf, в которых уже заложены обучающие выборки. Когда Вы откроете файл с помощью **NeuroPro 0.25**, то увидите набор параметров состояния психофизиологических функций.

В частности, в данном случае у нас две выборки. В первом столбце (выходное поле) значение переменной является пол (1 – мужской, 2- женский). Следующие столбцы означают параметры изучаемых функций.

После создания нейропроекта в него можно вставлять нейронные сети с помощью кнопки “Открыть файл данных” и работать с ними. Созданный нейропроект может быть сохранен при помощи команды меню “Файл/Сохранить”, “Файл/Сохранить как” или нажатием на кнопку “Сохранить” на панели инструментов. В дальнейшем возможна работа с сохраненными файлами нейропроекта. Для этого необходимо выбрать пункт меню “Файл-Открыть” или нажать кнопку “Открыть” и выбрать в открывшемся диалоговом окне имя желаемого проекта. Созданную нейронную сеть можно далее обучать, тестировать, упрощать и сохранять на диске вместе с нейропроектом.

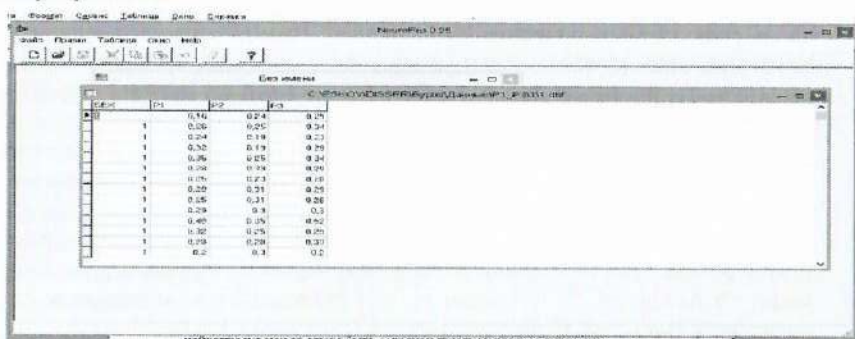


Рис. 4.2. Загрузка файла со стартовой обучающей выборкой в нейросеть.

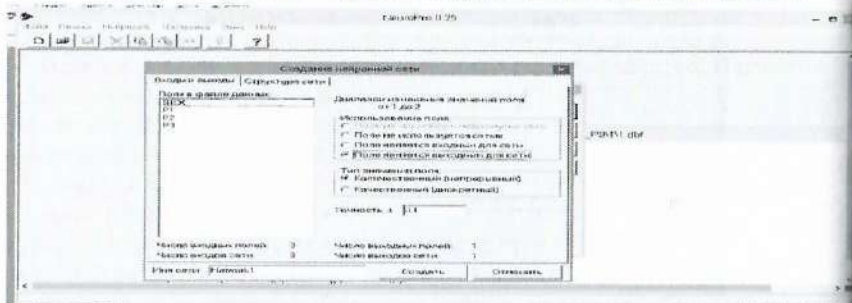


Рис. 4.3. Создание нейронной сети

Для обучения активной в данный момент в нейропроекте нейронной сети необходимо выбрать пункт меню “Нейросеть-Обучение”. Если в файле данных имеются все необходимые поля и он не пустой, то запускается процесс обучения сети. При этом на экран выводится “Окно обучения”, где пользователь имеет возможность наблюдать процесс обучения и при необходимости самостоятельно завершить обучение нажатием кнопки “Завершить” (рис. ).

Обучение прекращается при достижении нулевого значения средней оценки на задачнике, в случае невозможности дальнейшего улучшения оценки, либо при аварийных ситуациях (нулевой или бесконечный шаг в направлении оптимизации).

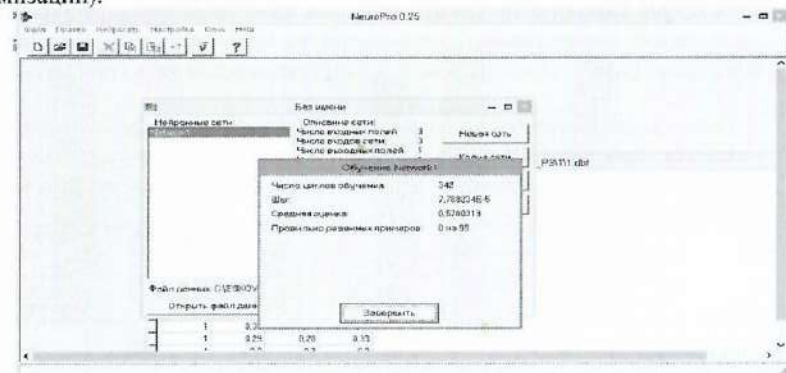


Рис. 4.4. Процесс обучения нейросети.

Имея нейронную сеть, можно посмотреть, насколько точно она прогнозирует значения выходных полей в файле данных. Для тестирования нейронной сети выбираем пункт меню “Нейросеть/Тестирование”. Результат тестирования сети выводится в “Окно тестирования сети” ухудшения точности решения задачи. При проведении процесса упрощения сети сокращается число входных сигналов сети. В тех случаях, когда можно правильно решить задачу на основе меньшего набора входных данных, это может в дальнейшем сократить временные и материальные затраты на сбор информации.

После упрощения нейронная сеть может приобрести логически прозрачную структуру и ее возможно будет более просто реализовать на аппаратной платформе. Известно, что почти невозможно понять, как обученная нейронная сеть решает задачу. После упрощения нейронная сеть становится достаточно обозримой и можно попытаться построить алгоритм решения задачи сетью на основе графического представления или словесного описания структуры сети. Для упрощения нейронной сети имеются следующие операции в меню “Нейросеть”:

1. Сокращение числа нейронов – удаление наименее значимых нейронов сети.
2. Сокращение числа синапсов – удаление наименее значимых синапсов сети.

3. Сокращение числа неоднородных входов – удаление наименее значимых неоднородных входов нейронов сети.
4. Равномерное упрощение сети – сокращение числа приходящих на нейроны сети сигналов до количества, задаваемого пользователем.
5. Бинаризация синапсов сети – приведение значений весов синапсов и неоднородных входов нейронов к выделенным значениям.

Таким образом, нейро-ЭВМ может идентифицировать значимость параметров координат вектора состояний организма человека в условиях широтных перемещений. При этом нейроэмулятор обеспечивает идентификацию диагностических признаков при гендерных различиях и при различиях между разными этапами исследований.

Следует подчеркнуть, что используемая нами нейропрограмма (нейроэмулятор) обеспечивает распознавание диагностических признаков при проведении сравнений при разных размерностях фазового пространства различных групп испытуемых.

Таблица 4.1

Результаты 30-ти обучений нейронной сети параметров сенсомоторных функций учащихся при сравнении двух групп (класс 1- мальчики, класс 2- девочки) учащихся в условиях широтных перемещений. Здесь: А – до отъезда в санаторий; Б – приезд в Сургут.

P1	P2	P3
0,95	0,16	1
1	0,18	0,77
0,72	0,23	1
1	0,57	0,69
1	0,19	0,74
1	0,2	0,58
1	0,18	0,81
0,71	0,51	1
0,99	0,25	1
0,54	0,44	1
1	0,21	0,62
0,84	0,3	1
1	0,22	0,83
0,96	0,32	1
1	0,21	0,65
1	0,18	0,71
1	0,37	0,96
1	0,11	0,66
0,93	0,25	1
1	0,23	0,93
0,71	0,28	1
1	0,37	0,96
0,73	0,33	1
0,32	0,31	1
1	0,25	0,63
0,81	0,13	1
1	0,21	0,73
1	0,17	0,7
1	0,16	0,88
1	0,24	0,9
0,9±0,02	0,25±0,01	0,85±0,02

А

P1	P2	P3
0,41	0,96	1
0,35	0,45	1
0,3	1	0,88
0,33	0,51	1
0,43	0,54	1
0,61	0,64	1
0,48	0,62	1
0,46	1	0,68
0,41	1	0,78
0,32	1	0,64
0,4	0,78	1
0,37	0,52	1
0,25	1	0,55
0,35	1	0,69
0,57	1	0,69
0,62	0,99	1
0,53	0,58	1
0,53	1	0,92
0,15	0,29	1
0,16	0,55	1
0,43	0,99	1
0,36	1	0,73
0,58	0,66	1
0,56	0,45	1
0,38	1	0,93
0,53	0,74	1
0,29	0,73	1
0,15	1	0,2
0,48	0,5	1
0,51	0,59	1
0,41±0,02	0,76±0,04	0,89±0,03

Б

Примечание. P1 – латентный период (ЛП) реакции на включение квадрата в постоянном

месте экрана, (с); P2 – ЛП реакции на звуковой сигнал, (с); P3 – ЛП реакции на появление квадрата в произвольном месте экрана, (с).

Для наглядного примера обработки результатов представим результаты 30-ти кратного обучения нейросети. В таблице 4.1и на рис. 4.5 и представлены тридцать итераций обучения в нейро-ЭВМ параметров сенсомоторных функций. Как видно из таблицы при каждом обучении нейросеть выдает различные результаты значимости параметров сенсомоторных функций. Итог этих действий – рис. 4.5.

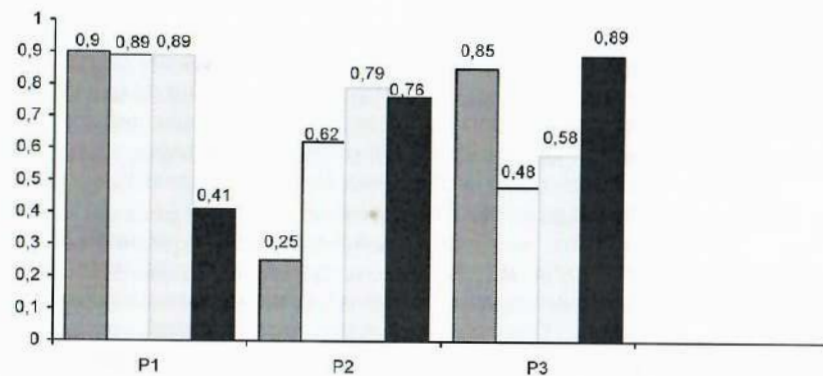


Рис. 4.5. Средние значения весов диагностических признаков нейронной сети параметров сенсомоторных (P1-P3) реакций учащихся в условиях широтных перемещений (столбцы соответствуют порядку этапов тестирования)

Как видно из таблицы, динамика изменения весовых коэффициентов колеблется в интервале 0,15-1. На рис. 4.5 представлены интегративные результаты настройки нейросети (30 обучений) простых сенсомоторных реакций мальчиков и девочек всех 4-х этапов.

#### Основные понятия и свойства нейронных сетей (НС).

В последние несколько лет мы наблюдаем большой интерес к нейронным сетям, которые успешно применяются в самых различных областях - биологии, медицине, физике, технике, геологии, бизнесе. Нейронные сети вошли в практику везде, где нужно решать задачи прогнозирования, классификации или управления. Такой впечатляющий успех определяется несколькими причинами:

1. Большие возможности. Нейронные сети - исключительно мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить чрезвычайно сложные зависимости. В частности, нейронные сети *нелинейны* по своей природе (смысл этого понятия подробно разъясняется далее). На протяжении многих лет линейное моделирование было основным методом моделирования в

большинстве областей, поскольку для него хорошо разработаны процедуры оптимизации. В задачах, где линейная аппроксимация неудовлетворительна (а таких достаточно много), линейные модели работают плохо. Кроме того, нейронные сети справляются с "проклятием размерности", которое не позволяет моделировать линейные зависимости в случае большого числа переменных

2. Простота в использовании. Нейронные сети учатся на примерах. Пользователь нейронной сети подбирает представительные данные, а затем запускает алгоритм обучения, который автоматически воспринимает структуру данных. При этом от пользователя, конечно, требуется какой-то набор эвристических знаний о том, как следует отбирать и подготавливать данные, выбирать нужную архитектуру сети и интерпретировать результаты, однако уровень знаний, необходимый для успешного применения нейронных сетей, гораздо скромнее, чем, например, при использовании традиционных методов статистики. Нейронные сети привлекательны с интуитивной точки зрения, ибо они основаны на примитивной биологической модели нервных систем. В будущем развитие таких нейро-биологических моделей может привести к созданию действительно мыслящих компьютеров.

Нейронные сети возникли из исследований в области искусственного интеллекта, а именно, из попыток воспроизвести способность биологических нервных систем обучаться и исправлять ошибки, моделируя низкоуровневую структуру мозга. Основной областью исследований по искусственному интеллекту в 60-е - 80-е годы были экспертные системы. Такие системы основывались на высокоуровневом моделировании процесса мышления (в частности, на представлении, что процесс нашего мышления построен на манипуляциях с символами). Скоро стало ясно, что подобные системы, хотя и могут принести пользу в некоторых областях, не ухватывают некоторые ключевые аспекты человеческого интеллекта. Согласно одной из точек зрения, причина этого состоит в том, что они не в состоянии воспроизвести структуру мозга. Чтобы создать искусственный интеллект, необходимо построить систему с похожей архитектурой.

Мозг состоит из очень большого числа (приблизительно 10,000,000,000) нейронов, соединенных многочисленными связями (в среднем несколько тысяч связей на один нейрон, однако это число может сильно колебаться). Нейроны - это специальная клетки, способные распространять электрохимические сигналы. Нейрон имеет разветвленную структуру ввода информации (дендриты), ядро и разветвляющийся выход (аксон). Аксоны клетки соединяются с дендритами других клеток с помощью синапсов. При активации нейрон посылает электрохимический сигнал по своему аксону. Через синапсы этот сигнал достигает других нейронов, которые могут в свою очередь активироваться. Нейрон активируется тогда, когда суммарный уровень сигналов, пришедших в его ядро из дендритов, превысит определенный уровень (порог активации).

Интенсивность сигнала, получаемого нейроном (возможность его активации), сильно зависит от активности синапсов. Каждый синапс имеет протяженность, и

специальные химические вещества передают сигнал вдоль него. Один из самых авторитетных исследователей нейросистем, Дональд Хебб, высказал постулат, что обучение заключается в первую очередь в изменениях "силы" синаптических связей. Например, в классическом опыте Павлова, каждый раз непосредственно перед кормлением собаки звонил колокольчик, и собака быстро научилась связывать звонок колокольчика с пищей. Синаптические связи между участками коры головного мозга, ответственными за слух, и слюнными железами усилились, и при возбуждении коры звуком колокольчика у собаки начиналось слюноотделение.

Таким образом, будучи построен из очень большого числа совсем простых элементов (каждый из которых берет взвешенную сумму входных сигналов и в случае, если суммарный вход превышает определенный уровень, передает дальше двоичный сигнал), мозг способен решать чрезвычайно сложные задачи. Разумеется, мы не затронули здесь многих сложных аспектов устройства мозга, однако интересно то, что искусственные нейронные сети способны достичь замечательных результатов, используя модель, которая ненамного сложнее, чем описанная выше.

Чтобы отразить суть биологических нейронных систем, определение искусственного нейрона дается следующим образом:

- Он получает входные сигналы (исходные данные либо выходные сигналы других нейронов нейронной сети) через несколько входных каналов. Каждый входной сигнал проходит через соединение, имеющее определенную интенсивность (или вес); этот вес соответствует синаптической активности биологического нейрона. С каждым нейроном связано определенное пороговое значение. Вычисляется взвешенная сумма входов, из нее вычитается пороговое значение и в результате получается величина активации нейрона (она также называется постсинаптическим потенциалом нейрона).
- Сигнал активации преобразуется с помощью функции активации (или передаточной функции) и в результате получается выходной сигнал нейрона.

Если при этом использовать ступенчатую функцию активации (т.е., выход нейрона равен нулю, если вход отрицательный, и единице, если вход нулевой или положительный), то такой нейрон будет работать точно так же, как описанный выше естественный нейрон (вычесть пороговое значение из взвешенной суммы и сравнить результат с нулем - это то же самое, что сравнить взвешенную сумму с пороговым значением). В действительности, пороговые функции редко используются в искусственных нейронных сетях. Необходимо учитывать, что веса могут быть отрицательными, - это значит, что синапс оказывает на нейрон не возбуждающее, а тормозящее воздействие (в мозге присутствуют тормозящие нейроны).



Рис. 4.6. Схема нейрона.

Из рис.4.6 видно, что искусственный нейрон, так же, как и живой, состоит из синапсов, связывающих входы нейрона с ядром. Ядро нейрона осуществляет обработку входных сигналов и аксона, который связывает нейрон с нейронами следующего слоя. Каждый синапс имеет вес, который определяет, насколько соответствующий вход нейрона влияет на его состояние. Состояние нейрона определяется по формуле

$$S = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (4.1)$$

где

- $n$  – число входов нейрона
- $x_i$  – значение  $i$ -го входа нейрона
- $w_i$  – вес  $i$ -го синапса

Затем определяется значение аксона нейрона по формуле

$$Y = f(S) \quad (4.2)$$

Где  $f$  – некоторая функция, которая называется *активационной*. Наиболее часто в качестве активационной функции используется так называемый *сигмоид*, который имеет следующий вид:

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (4.3)$$

Основное достоинство этой функции в том, что она дифференцируема на всей оси абсцисс и имеет очень простую производную:

$$f'(x) = \alpha f(x)(1 - f(x)) \quad (4.4)$$

При уменьшении параметра  $a$  сигмоид становится более пологим, вырождаясь в горизонтальную линию на уровне 0,5 при  $a=0$ . При увеличении  $a$  сигмоид все больше приближается к функции единичного скачка. Это было описание отдельного нейрона. Теперь возникает вопрос: как соединять нейроны друг с другом? Если сеть предполагается для чего-то использовать, то у нее должны быть входы (принимающие значения интересующих нас переменных из внешнего мира) и выходы (прогнозы или управляющие сигналы). Входы и выходы соответствуют сенсорным и двигательным нервам - например,

соответственно, идущим от глаз и к руке. Кроме этого в сети может быть еще много промежуточных (скрытых) нейронов, выполняющих внутренние функции. Входные, скрытые и выходные нейроны должны быть связаны между собой.

Ключевой вопрос здесь - обратная связь. Простейшая сеть имеет структуру прямой передачи сигнала: Сигналы проходят от входов через скрытые элементы и в конце концов приходят на выходные элементы. Такая структура имеет устойчивое поведение. Если же сеть рекуррентная (т.е. содержит связи, ведущие назад от более дальних к более ближним нейронам), то она может быть неустойчива и иметь очень сложную динамику поведения. Рекуррентные сети представляют большой интерес для исследователей в области нейронных сетей, однако при решении практических задач, по крайней мере до сих пор, наиболее полезными оказались структуры прямой передачи. Типичный пример сети с прямой передачей сигнала показан на рисунке 4.6. Нейроны регулярным образом организованы в слои. Входной слой служит просто для ввода значений входных переменных. Каждый из скрытых и выходных нейронов соединен со всеми элементами предыдущего слоя. Можно было бы рассматривать сети, в которых нейроны связаны только с некоторыми из нейронов предыдущего слоя; однако, для большинства приложений сети с полной системой связей предпочтительнее. При работе (использовании) сети на входные элементы подаются значения входных переменных, затем последовательно обрабатывают нейроны промежуточных и выходного слоев. Каждый из них вычисляет свое значение активации, беря взвешенную сумму выходов элементов предыдущего слоя и вычитая из нее пороговое значение. Затем значение активации преобразуется с помощью функции активации, и в результате получается выход нейрона. После того, как вся сеть отработает, выходные значения элементов выходного слоя принимаются за выход всей сети в целом.

Таким образом, легко заметны различия в выполнении расчетного задания человеком и ЭВМ: человек способен уяснить задачу и самостоятельно выбрать оптимальный алгоритм решения, учтя и исправив все промежуточные ошибки; ЭВМ выполнит расчет с огромной скоростью, но требует предварительного введения подробного и абсолютно однозначного порядка её решения, если допущена какая-то ошибка или просто допускается двойственность толкования, результат не может быть получен в лучшем случае или будет ошибочен и приведет к недопустимым последствиям в худшем, что случается чаще. Очень часто требуется анализировать неполные наборы данных или данные, не позволяющие однозначного толкования, мозг человека способен справляться и здесь, хотя и медленно, а ЭВМ такие задачи не решает в принципе. Кроме того, усложнение электронных машин неизбежно снижает их надежность, как системы, а биологический мозг работает очень надежно, несмотря на его гигантскую сложность и принципиально низкую устойчивость, определяемую составляющими его органическими молекулами и тканями. Идеальным вариантом и целью многих исследований является создание неорганических систем способных проявлять адаптивность и устойчивость в решении задач,

проявляемые пока только животным мозгом, устройство которого служит образцом для создания таких вычислительных устройств.

Несмотря на огромное разнообразие и особенности (вариации) морфологических типов НС все они имеют ряд общих свойств, которые положены в основу организации различных математических, физических, технических и физико-химических моделей НС, существующих в настоящее время. Рассмотрим эти свойства в порядке их значимости для моделирования НС и частоты встречаемости их описаний в тех или иных научных работах. Первое и главное свойство нейрона - это способность возбуждаться, генерировать потенциал действия (ПД), т.е. переходить из неактивного состояния в активное. Причем по истечении некоторого времени (или в результате специальных тормозных воздействий) Н возвращается в исходное пассивное состояние.

Следует отметить, что термин "пассивное состояние" весьма условный, т.к. при этом на мембранах нейронов активно поддерживается с помощью калий-натриевых молекулярных "насосов" некоторая разность потенциалов. Это так называемый потенциал покоя (ПП), который является характерным примером различных существующих биоэлектрических потенциалов (БП). В модельных нейронах ПП обычно не учитывается, но именно он и механизм переноса ионов  $K^+$  и  $Na^+$  и обеспечивает пороговое свойство нейронов. Последнее реализует известный принцип (закон) "все или ничего", который постулирует генерацию ПД при достижении определенной величины деполяризации мембраны (т.е. падения ПП до критического уровня от исходного отрицательного значения).

Справедливости ради надо отметить, что отмеченная величина деполяризации в реальной ситуации бывает очень разной в зависимости от фактического функционального состояния нейрона в данный момент времени, поэтому понятие порога носит скорее качественный характер и не характеризуется строгой количественной величиной в общем случае.

Итак, два базовых свойства любого нейрона (возбудимость и пороговые свойства) обязательно учитываются практически во всех моделях НС. При желании более подробно познакомиться со свойствами биологических нейронов в указанном аспекте можно порекомендовать обратиться к многочисленным работам классиков отечественной и зарубежной электрофизиологии.

Весьма важным свойством нейронов является свойство передачи импульсов с возможным преобразованием (или запоминанием на молекулярном уровне внутри указанных выше трех структурных элементов) и передаче на другие, контактирующие нервные клетки. В последнем случае такая передача осуществляется посредством специальных структурных элементов - синапсов, имеющих сложную структуру и как правило, использующих специальные химические вещества - медиаторы (посредники). В общем случае синапсы осуществляют как передачу возбуждения в НС, так и осуществляют тормозные процессы между нейронами. Последнее может обеспечивать очень важное свойство адаптации НС к постоянным (длящимся) и периодическим сигналам. Выделяют специальный класс НС с адаптацией, когда пришедший извне сигнал

на НС неизбежно должен затухать в такой адаптивной НС. Свойство адаптации может быть обусловлено не только специальными (тормозными) связями между нейронами НС, но и за счет свойства аккомодации отдельных нейронов, составляющих эту сеть. Свойством аккомодации (затуханием возбуждения, падением потенциалов на мембране нейрона) обладают в той или иной степени многие нейроны и это часто учитывается при создании модельных НС.

Описывая наличие синаптических передач (как отдельного свойства НС) мы не затронули еще одно свойство любого нейрона, связанного с синапсами - это свойство суммации сигналов, поступающих через посредство синаптических передач. Два сигнала, поступающие на один нейрон от двух разных источников сигналов, суммируются (в ряде моделей интегрируются во времени), обеспечивая тем самым формально важную математическую операцию. Известно, что существующие ЭВМ (цифровые) выполняют только арифметические действия и суммирование (казалось бы!) приближает НС к ныне действующим алгоритмическим машинам, но это кажущееся совпадение, т.к. и в работе мозга и в работе нейро-ЭВМ (как мы увидим ниже) операция суммации играет определенную роль, но далеко не главную. Именно синапсы, их ассоциативность являются главенствующими элементами в работе любой НС и мозга в целом.

И последнее (но не в смысле значения) свойство нейронов и НС - это способность к запоминанию на молекулярном, клеточном и нейросетевом (в виде архитектуры синаптических связей и их весовых значений) уровнях. Феноменальные свойства НС кроются в организации связей между нейронами и их количественной (синаптической) характеристике, которая представляется весом связи синапса и реализует реальный вклад каждого отдельного синапса в поступающие на суммируемый нейрон сигналы. Именно изменяя эти веса связей и всю архитектуру межнейронных взаимодействий мы можем подстраивать модельные НС к внешним сигналам, устраняя при этом неопределенность между входом и выходом любой модельной или реальной (биологической) НС.

Излагая основные свойства нейронов и НС в целом, мы подошли к важным понятиям памяти в НС, запоминанию (некоторой подстроечной процедуре) - как процессу и процедуре устранения неопределенности между входом (до поступления сигнала на НС) и выходом в НС и новому для нас понятию - обучению НС. Последнее тоже является свойством любой НС, т.к. даже отдельный нейрон оставляет следовые изменения, которые можно рассматривать как память, а сам такой процесс - как обучение.

Свойство памяти в НС является фундаментальным и наименее изученным в настоящее время. Существует много доктрин этой важной функции мозга и некоторые из них стоит перечислить для дальнейшего понимания работы НС. В хронологическом и взаимоисключающем порядке это: идея эквипотенциальности (каждая часть переднего мозга может заменить другую) и альтернативная ей идея локализации (в идеале - каждое сенсорное впечатление имеет собственную клетку в мозге); идея детерминистской модели мозга (все процессы сводятся к последовательным элементарным актам) и стохастической

(когда возможны различные воспроизводимые комбинации и вспоминаются наиболее вероятные). Стохастическая организация памяти и работы мозга в целом наиболее признана в настоящее время и лежит в основе работы модельных НС (в том числе и компьютерных, математических моделей НС).

Функции мозга (и в частности, память) могут рассматриваться с позиций полевых (например, когерентных) взаимодействий, где в локальных участках имеются максимумы или минимумы силовых характеристик электромагнитных (или других) полей. В этой связи следует отметить голографический подход к работе мозга (и памяти, в частности). Противоположная точка зрения на описываемые процессы лежит в представлениях теории коннективизма, когда память как функция мозга основана на указании определенных путей распространения возбуждения и выхода сигнала с НС. Как мы увидим, это свойство действительно имеет место и положено в основу работы различных НС, используемых уже на практике в настоящее время.

Перечисление свойств НС и мозга в целом будет не полным, если мы не упомянем работы Е. Маковски, который утверждал, что живой мозг состоит из двух форм материи - биоструктурированной и молекулярной. Наличие биоструктуры характерно только для живого и распадается с гибелью организма, когда максимизируется энтропия и организм устремляется к хаосу. В то же время молекулы входят в состав биоструктуры и могут существовать независимо от биоструктуры. В этой связи уместно напомнить, что детерминированные структуры нейро-ЭВМ все же следует рассматривать как гигантские флуктуации упорядочивания, каковыми являются НС и мозг в целом.

По Е. Маковски мозг - это четырехмерная система (четвертая координата - время), которая присуща только живым организмам. Однако это не значит, что все перечисленные выше свойства нейрона, НС и мозга в целом невозможно моделировать.

Выборочно фиксировать и сохранять во времени следы внешних и внутренних воздействий системы и при некоторых условиях воспроизводить эти следы (под этим мы понимаем *память*) могут различные технические, физические или химические системы. Это же может реализоваться и в виде математических моделей, где указанные следы воздействий представляются так называемыми начальными условиями для данной модельной системы (в виде обыкновенных дифференциальных уравнений, уравнений в частных производных, разностных уравнений, интегро-дифференциальных и др. уравнений). Рассмотрим на конкретном примере математические модели НС.

Представим кратко основные виды математических моделей НС в рамках подхода, который реализует выше перечисленные свойства нейрона и НС и рассмотрим основные проблемы в архитектуре различных НС и их математических аналогов. В качестве такого подхода мы выбираем компартментный или пуловый подход в моделировании НС, как наиболее полно разработанный в настоящее время и обладающий определенной завершенностью. Сразу оговоримся что, как всякая абстрактная наука, математическая теория НС требует формализации указанных выше свойств

нейрона и НС и введения некоторых абстракций. Отметим, что в НС, используемых в нейрокомпьютерах, формализация НС гораздо жестче и примитивней (несмотря на выдающиеся практические результаты) и в этом смысле теория НС (или нейродинамика) - наука более приближенная к реальному биологическому объекту. Она выполняет некоторые посреднические роли в исследованиях между субстратом (например, мозгом) и нейромашинной (искусственным мозгом, интеллектом).

Итак, пусть  $x_i$  - мембранный потенциал некоторого  $i$ -го нейрона,  $\tau$  - постоянная времени нейрона, которая характеризует процесс затухания этого потенциала после некоторого его изменения (например, после нанесения внешнего раздражения),  $a_{ij}$  - весовой коэффициент синаптической связи между данным  $i$ -м и некоторым произвольным  $j$ -м нейроном из рассматриваемого нейронного пула. Пусть, наконец,

$$\sum a_{ij} \bar{x}_j \quad (i \neq j) \quad (4.5)$$

будет некоторым суммарным входом, генерируемым всей нейронной сетью на рассматриваемый  $i$ -й нейрон. Тогда простейшая математическая модель формализованного нейрона, входящего в компартментную (состоящую из блоков, частей, пулов выполняющих сходные функции и проявляющих сходную активность) нейронную сеть примет вид:

$$\tau \frac{\partial x_i}{\partial t} + x_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \quad (i, j = 1, 2, \dots, n), \quad (4.6)$$

причем  $a_{ij} < 0$ , если имеет место тормозный процесс и  $a_{ij} > 0$ , если процесс межнейронного взаимодействия имеет возбуждающий характер. Отметим, что выход  $j$ -го нейрона  $\bar{x}_j$  - является пороговой функцией, т.е.  $\bar{x}_j = \max\{c, x_j\}$  ( $j = 1, \dots, n$ ), где  $c$  - некоторая константа.

Математическая модель некоторой усредненной активности нейронного пула (компартамента), очевидно, должна не только содержать основные элементы модели (1.1.6), но и иметь ряд особенностей, характерных для кооперативных систем. В первую очередь будем пренебрегать пороговыми свойствами нейронного пула, поскольку активность нейронов не синхронизирована а порог отдельно взятого нейрона пренебрежимо мал в сравнении с суммарной активностью всего пула. Следует отметить, что эти приближения не столь грубые, как приближения по моделированию пороговых функций в модели (4.6). В действительности величина порога является функцией состояния нейрона и, например, в рефрактерный период значение порога в несколько раз превышает исходную величину (т.е. - это фактически переменная величина).

Итак, при построении компартментных нейронных сетей будем пренебрегать пороговыми свойствами отдельных нейронов и считать, что нейронный пул состоит из однородных нейронов, обладающих приблизительно одинаковыми свойствами. Будем представлять нейронный пул НС, как некоторый компартмент общей компартментной модели. Постулируем наличие пре- и постсинаптических тормозных или возбуждающих взаимодействий



между этими нейронными пулами (компартаментами). Поскольку внешние управляющие воздействия - драйвы играют главенствующую роль в работе всей НС, то будем также их учитывать во всех этих моделях, как некоторое входное воздействие.

Тогда представим, что  $i$ -й компартимент имеет некоторую непрерывную, мгновенно усредненную во времени биоэлектрическую активность  $x_i$ . Интегрированная активность (фактически это выход) всей нейронной сети в этом случае будет представлена формулой:

$$y = \sum_{i=1}^m c_i x_i \quad (4.7)$$

где  $c_i$  - весовые коэффициенты ( $i = 1, \dots, m$ ) а  $m$  - общее число компартиментов, входящих в исследуемую нейронную сеть. Заметим, что именно у наиболее легко измеряемая в эксперименте величина. Это может быть регистрируемая активность, (например, для дыхательных НС) афферентных дыхательных нервов, например, диафрагмального или межреберных, и именно с этой величиной экспериментаторы работают при идентификации НС.

Будем предполагать существование возбуждающих (энергетических) связей между компартаментами, что подтверждается большим количеством экспериментальных работ и уже рассмотренными выше математическими построениями. Пусть передача возбуждения между компартаментами определяется коэффициентами  $a_{ij} \geq 0$  ( $i \neq j$ ), а тормозные процессы будут зависеть от интегральной активности НС.

Как отмечалось в ряде работ, прямых экспериментальных доказательств наличия тормозных взаимодействий между нейронами многих классов может и не существовать (см. выше). С другой стороны не вызывает сомнений огромная роль тормозных процессов в работе любой НС. Поэтому в этой ситуации разумно будет учитывать тормозные процессы не как результат прямого межнейронного взаимодействия (например, полагать  $a_{ij} \leq 0$  при  $i \neq j$ ), а через посредство некоторой функции, зависящей от  $x_j$ . При этом конкретный вид этой функции можно не задавать а ограничиться только некоторыми ее свойствами, имеющими существенное, экспериментально доказанное, биологическое значение. Например, торможение в компартиментных сетях будет влиять на процессы передачи возбуждения от  $j$ -го пула на  $i$ -й путем ослабления этой передачи в  $p_j(y)$  раз. Таким образом передача возбуждения будет определяться величиной  $a_{ij} p_j(y)$ .

Следующее важное свойство нейронного пула, который является компартиментом в моделях НС, связано с диссипацией энергии в нем. Фактически, как и в случае с моделированием отдельного нейрона, вводится некоторый коэффициент затухания возбуждения -  $b$ . Он определяется величинами коэффициентов диссипации возбуждения нейронов данного пула (в модели (4.6) это была величина  $\frac{1}{\tau}$ ), но он является некоторым обобщенным показателем. Для упрощения рассмотрения моделей будем пренебрегать

различиями между пулами и считать величину  $b$  одинаковой для всех пулов. Тогда по принципу соответствия, предложенному выше, простейшая компартиментная модель НС с учетом обратной отрицательной связи и внешнего управляющего драйва (УД) примет вид:

$$dx/dt = \sum_{j=1}^m a_{ij} p_j(y) - bx_i + u d_i \quad (i=1, \dots, m) \quad (4.8)$$

где  $u d_i$  учитывает управляющий драйв (УД) на  $i$ -й компартимент, причем  $d_i$  ( $i=1, \dots, m$ ) является весовым коэффициентом УД, а  $u \geq 0$  - некоторый скалярный фактор. Эту модель можно переписать в векторно-матричной форме

$$\begin{aligned} dx/dt &= AP(y) - bx + ud \\ y &= c^T x \end{aligned} \quad (4.9)$$

где

$$\begin{aligned} x, d \in R^m, \quad A = \{a_{ij}\}_{i,j=1}^m, \quad a_{ij} > 0 \text{ при } i \neq j \quad (i, j = 1, \dots, m) \\ P = \text{diag}\{p_i(y)\}_{i=1}^m, \quad c^T = (c_1, c_2, \dots, c_m), \quad y \in R^1 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Для случая циклических нейронных сетей, как наиболее распространенных в природе и лучше изученных на различных моделях, достаточно положить  $a_{ij} = 0$  исключая  $a_{im} > 0, a_{1j} > 0$  ( $i = 1, \dots, m-1$ )

$$(4.11)$$

Если интегральная активность НС  $y$  влияет на тормозный процесс передачи возбуждения только к одному (например, первому) компартименту, то

$$p_i = p_i(y) \quad \text{и} \quad p_i = 1 \quad (i \geq 2) \quad (4.12)$$

Это простейший случай циклической НС. Другой крайний случай возникает, когда  $y$  влияет на тормозный процесс передачи возбуждения сразу на все компартименты (для простоты одинаковым образом). Тогда

$$p_i = p(y) \quad (i = 1, \dots, m).$$

Влияние УД на динамику поведения НС так же может быть различным. Если только один пул будет чувствительным к УД, то

$$d = (1, 0, \dots, 0)^T. \quad (4.13)$$

Если же все пулы будут чувствительны к УД одинаковым образом, то

$$d = (1, \dots, 1)^T. \quad (4.14)$$

Вектор весовых коэффициентов  $c$  в (1.1.5) определяет вклад отдельного пула в интегральную активность всей НС. Поэтому, если у формируется активностью только одного нейрона, то

$$c = (0, \dots, 0, 1)^T, \quad (4.15)$$

а если всех нейронов одинаково, то

$$c = (1, \dots, 1)^T. \quad (4.16)$$

Полагаем, что возбуждение является энергетической характеристикой РНС и оно определяет суммарный электрический потенциал, генерируемый на выходе НС. Последний, как уже отмечалось, регистрируется в эфферентных нервах и является объектом идентификации любой нейронной сети.

Математические модели компартментных разложимых нейронных сетей, т.е. имеющих иерархическую структуру, описываются моделями, сходными с векторно-матричным уравнением (4.18), однако матрица  $A$  имеет в этом случае блочно-треугольный вид. Например:

$$A = \begin{pmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ A_{21} & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix}, \quad (4.17)$$

где  $A_{ij}$  — некоторые матрицы, описывающие межпуловые (межкомпаратментные) связи. Отметим, что матрицы  $A_{21}$ ,  $A_{31}$ ,  $A_{32}$  описывают связи между отдельными нейронными сетями (так называемыми кластерами) а, в целом, матрица (4.17) представляет трехкластерную НС с двумя уровнями иерархии. Нейронные сети обычно изображаются графами. На рис.4.17 показаны графы  $m$ -мерных циклических (а) и нециклических (б) нейронных сетей. Оба графа представляют неразложимые нейронные сети, т.к. любая пара компартментов связана между собой одной связью; матрицы неразложимых НС никаким преобразованием не приводимы к блочно-треугольной форме.

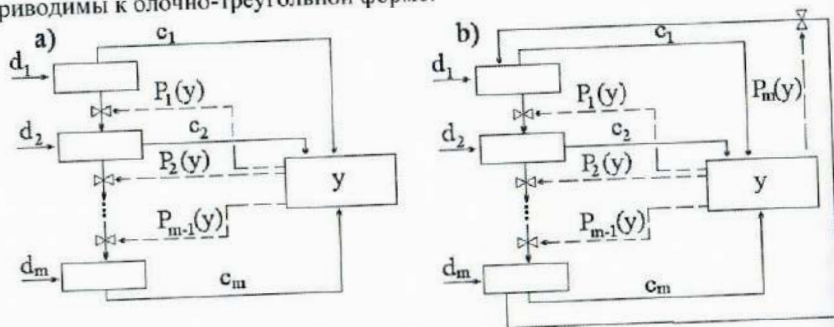


Рис.4.7. Графические структуры систем  $m$ -го порядка с отрицательными обратными связями ( $a_{im}=0$ ): а) нециклическая; б) циклическая.

На основе компартментных представлений разработаны модели респираторных нейронных сетей [2.7]. Рассмотрены наиболее часто встречающиеся модели циклических РНС, приведены случаи разложимых и неразложимых сетей, показана возможность и применение моделей с выделением подциклов, когда проявляется влияние на компартменты всех остальных. Применение фармакологических препаратов, тепловых воздействий и селективное раздражение конкретных нервных путей позволило целенаправленно исследовать возможные пути и знаки взаимодействий внутри сети. В качестве выходной функции  $y$  использованы активность межреберных и диафрагмальных нервов. Применение компартментного подхода позволяет получать колебательные решения моделей РНС без применения предположений о специальном управлении дыхательным ритмом, только из внутренних свойств модели. Сравнение реальных биологических фактов и результатов моделирования позволяет отнести различные модели к конкретным типам дыхания.

В целом, любая область знаний ставит перед исследователями множество задач, часть которых успешно решается с помощью ЭВМ. Привычный процесс решения задачи компьютером можно разделить на 3 основных этапа:

1. Человек согласно условиям задачи вводит исходные данные в компьютер.
2. ЭВМ, используя введенные данные, проводит вычисления по *заранее установленному алгоритму*.
3. ЭВМ выводит результаты вычислений.

Основная работа по решению задачи в таком случае все равно возложена на человека, а именно: поиск *формального алгоритма решения задачи*. Многие задачи в настоящее время решаются в рамках указанных этапов. Но существует целый класс задач, не поддающихся формальному описанию, для решения которых человек использует не четкие правила, а *опыт*. Наличие опыта предусматривает возможное правильное решение и в том случае, если данная ситуация прежде не встречалась. Опытный врач верно поставит диагноз, даже если искажена симптоматика заболевания и ранее он такую никогда не наблюдал.

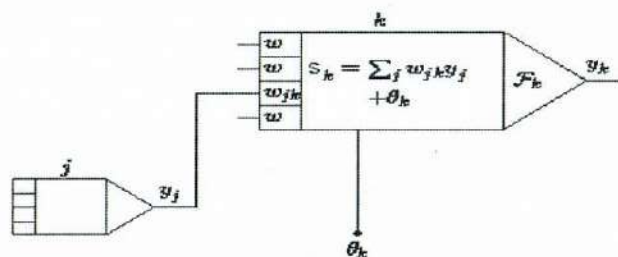
Многие науки и отрасли знания оперируют задачами, для решения которых используется весь ранее накопленный опыт. Это биология, медицина, социология, юриспруденция, криминалистика. Поиски алгоритмов, позволяющих автоматически накапливать и затем использовать опыт, привели к появлению новой области деятельности — нейроинформатики.

Основой работы самообучающихся нейропрограмм является искусственная нейронная сеть, представляющая собой совокупность нейронов — элементов, связанных между собой определенным образом. Нейроны и межнейронные связи задаются программно. Функционирование нейрона в нейрокомпьютере или нейропрограмме отдаленно напоминает работу биологического нейрона.

В основу искусственных нейронных сетей (НС) положены следующие черты биологических нейронных сетей, позволяющие им хорошо справляться с нерегулярными задачами:

- простой обрабатывающий элемент - нейрон;
- очень большое число нейронов участвует в обработке информации;
- один нейрон связан с большим числом других нейронов (глобальные связи);
- изменяющиеся по весу связи между нейронами;
- массивная параллельность обработки информации.

Упрощенно можно считать, что нейрон устроен и действует следующим образом. Биологический нейрон имеет тело, совокупность отростков – дендритов, по которым в нейрон поступают сигналы, и отросток – аксон, передающий выходные сигналы другим нейронам. Точка соединения дендрита и аксона называется синапсом. Синапс выполняет функции весового коэффициента, усиливая или ослабляя входной сигнал. Нейрон получает от дендритов набор входных сигналов. В теле нейрона значения входных сигналов суммируются.



Простейший элемент искусственной нейронной сети (нейрон)

- $y_j$  - сигнал поступающий от нейрона  $j$
- $s_k$  - скалярное произведение вектора входных сигналов и вектора весов
- $F_k$  - функция возбуждения
- $y_k$  - выходной сигнал нейрона  $k$

Рис. 4.8. Простейший элемент искусственной нейронной сети.

Однако, влияние входов не равнозначно, а определяется весовыми коэффициентами, которые характеризуют важность поступающей по данному входу информации. В искусственном нейроне вычисляется скалярное произведение вектора входных сигналов и вектора весовых коэффициентов. Затем нейрон формирует выходной сигнал, интенсивность которого зависит от значения вычисленного скалярного произведения. Выходной сигнал поступает на аксон, а через него передается дендритам других нейронов.

Поведение нейронной сети зависит как от весовых коэффициентов, так и от формы функции возбуждения. Наиболее часто используются: пороговая, линейная, полулинейная и сигмоидальная. Из этих функций сигмоидальная наиболее близка к биологическому аналогу (см. рис. 4.9)



Разные функции возбуждения для нейрона

Рис. 4.9. Вид функции возбуждения для нейрона

На основе знаний о работе биологических сетей создают машины имитирующие работу мозга и способные проявлять при этом свойства, обычно присущие живому. Выделяют системы классификаторы (выделяют известные классы явлений по предварительно представленной обучающей выборке) и предикторы (по предварительно обучающей выборке способны вместо жестко определенного класса выдавать число имеющее реальное значение). Такие системы могут применяться в управлении промышленными процессами, технологическими и природными объектами, переработке недостаточно четкой информации и многих других областях знаний.

Создается сеть из формальных нейронов, где выделяют нейроны входа и выхода и нейроны внутренних слоев (рис. 4.10). Первоначально устанавливается, что все нейроны входа подают выходы на все нейроны прилегающего внутреннего слоя со значимостью 1, и также нейроны первого внутреннего слоя передают сигнал на последующий слой, а нейроны последнего внутреннего слоя передают сигналы на нейроны выхода каждый на все со значимостью 1. В ходе итерационного процесса идет настраивание новых значений значимости выходов всех нейронов сети, многие выходы в ходе её получают значимость 0. Каждому методу создания нейронной сети присущи свои аппроксимирующие функции нейронов. Целевой функцией для сети является минимизация ошибки результата (расхождение реального и предсказанного сетью результатов), а путем достижения результата становится настройка статистических весов выходов нейронов в искусственной сети в ходе обработки результатов обучающей выборки с целью приближения рассчитанного значения по аппроксимирующей функции к реальному результату. Обычно создавая сеть количество нейронов в ней задают равным количеству выходов.

Классификаторы в оценке данных принципиально ограничены в выборе количеством классов в обучающей выборке, неверная задача количества классов резко осложняет обучение сети. В [1] описано обучение сети для распознавания иммунодефицитных состояний. Первоначально задали 2 класса (здоровые и больные), сеть точно распознавала здоровых, но некоторых больных путала со здоровыми. Обучающая выборка была изменена исходя из сетевых ошибок, класс больных разбили на 2 сильно отличных от друг друга и здоровых по уровню метаболизма лимфоцитов. Новая выборка позволила обучить сеть безошибочному распознаванию всех примеров. Таким образом, нейросеть фактически распознала ошибку, незамеченную человеком. Кроме того,

классификаторы позволяют по результатам обучения обнаружить параметры, наименее значимые для результата. Их постепенное исключение с промежуточной проверкой результата позволяет выделить из большого набора параметров действительно значимые, которые дают достаточный набор для точного результата. Классификаторы могут использовать данные как в закодированном виде (да - нет), так и в цифровом (данные анализов), но на выходе они всегда дают отнесение к определенному классу, представленному в обучающей выборке. Часто возникает необходимость ответа в виде какого-то числа, например доза радиации или токсина. Такие задачи решают программы - предикторы.

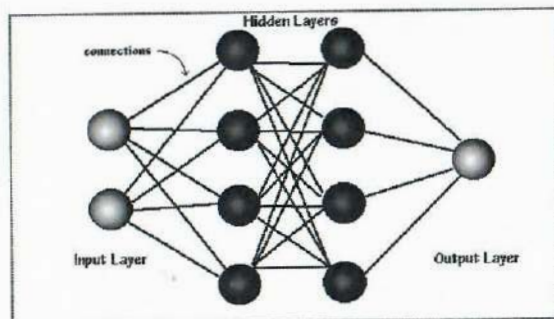


Рис. 4.10. Схема искусственной нейронной сети

Например, по данным клинических анализов надо узнать накопленную дозу радиации работниками АЭС [1]. В случае одномерном, мы получаем ответ формально мало отличный от ответа классификатора, но конкретная цифра, указанная нейросетью, позволяет уточнить многие действия для данного человека и на будущее для остальных. Векторные предикторы дают в качестве ответа цифровой вектор в многомерном пространстве, т.е. позволяет учесть из прошлого и предсказать для будущего возможные ошибки и пути их нейтрализации.

В принципе, нейронные сети могут решать любую задачу, имеющую решение, иными словами, делать все, что могут делать традиционные компьютеры.

На практике, для того, чтобы применение нейронной сети было оправдано, необходимо, чтобы задача обладала следующими признаками:

- отсутствует алгоритм или не известны принципы решения задач, но накоплено достаточное число примеров;
- проблема характеризуется большими объемами входной информации;
- данные неполны или избыточны, зашумлены, частично противоречивы.

Таким образом, ИНС хорошо подходят для распознавания образов и решения задач классификации, оптимизации и прогнозирования.

Используя основные принципы функционирования ИНС, можно конструировать искусственные нейронные сети, которые получили название

"Нейрокомпьютеры" - НЭВМ. Последние имеют ряд существенных преимуществ в сравнении с существующими алгоритмируемыми ЭВМ. Вот краткое перечисление этих преимуществ:

1. Высокая надежность (вспомним, что мозг человека в старости теряет миллионы нейронов без существенной потери памяти и мышления) и быстрое действие (до 20 и триллионов операций в секунду на сегодняшний день!). Отметим, что высоконадёжная НЭВМ может собираться из ненадёжных элементов-нейронов и это тоже существенное преимущество.

2. Универсальность. НЭВМ даёт стандартный способ решения многих нестандартных задач. Отметим, что цифровые ЭВМ (ЦЭВМ) могут отдельные задачи решать даже лучше НЭВМ, но при этом мы каждый раз должны будем разрабатывать, создавать новую ЦЭВМ, её новый алгоритм.

3. С предыдущим свойством связана и гибкость структуры НЭВМ, когда появляется возможность на одной элементной базе (в пределах одной и той же НЭВМ) создавать принципиально различные нейрокомпьютеры. При этом человек становится нейроконструктором (криэйтором мозга).

4. На базе нейронных сетей можно создавать программное обеспечение для высокопараллельных ЭВМ, при этом минимизируется дублирование элементов ЦЭВМ.

5. Труд программиста на ЦЭВМ заменяется на обучение НЭВМ. Работающий на НЭВМ человек только формирует учебные задачки, а эта процедура значительно проще, чем алгоритмические языки и программирование ЦЭВМ.

6. С помощью НЭВМ хорошо решаются задачи, связанные с человеческой интуицией (чтение текстов, узнавание зрительных образов, поверхностей планет, перевода с одного языка на другой и т.д.). Во многих случаях до сих пор нет хороших алгоритмов для ЦЭВМ по решению таких задач.

7. Последнее преимущество связано с предыдущим - НЭВМ уже позволяет вводить информацию голосом конкретного индивидуума. Это значит, что Ваша НЭВМ будет лично Вашей и Вы (и столько!) сможете с ней общаться. Словарный запас формируется в течение 2-3 часов разговора с НЭВМ и составляет 2-3 тыс. слов!

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО 3-МУ ЭТАПУ:

##### "Получение зачета по лабораторной работе"

После выполнения 1 и 2 этапов обучаемый должен заполнить протокол и подписать его у преподавателя, а затем оформить отчет в тетради, обратив особое внимание на количественное и качественное объяснение наблюдаемых изменений ответов сетевого эмулятора и отчитаться у преподавателя за всю работу. В этом случае обучаемый получает зачет.

*Лабораторная работа № 5*  
**РЕЦЕПТОРЫ КАК БИОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ.**  
**ИЗМЕРЕНИЕ ЛАТЕНТНЫХ ПЕРИОДОВ СЕНСОМОТОРНЫХ РЕАКЦИЙ**

**Цель работы.**

Ознакомиться с основами процессов рецепции и законами их описывающими.

**Обучаемый должен знать:**

1. Свойства анализаторов и закон Вебера-Фехнера.
2. Строение и функции зрительного и слухового анализаторов.
3. Биофизические основы фоторецепции.

**Обучаемый должен уметь:**

1. Проверить закон Вебера-Фехнера для рецепторов давления.
2. Выполнить статистическую обработку результатов измерений.

**Практическое значение**

Работа фоторецепторов и рецепторов слуха дает нам основную информацию об окружающем мире. Особое значение фоторецепции для понимания единства процессов в растительном и животном мире. Биофизика анализаторов лежит в основе физиологии трудовых процессов и является фундаментом для понимания патологических процессов в психиатрии, мед. психологии, валеологии.

**Бюджет времени**

На изучение темы отводится 6 часов, из них 2 часа лекций, 2 часа лабораторные занятия и 2 часа на самоподготовку.

**Литература**

1. Биофизика. / Под ред. В.Г. Артюхова. – М.: Академический Проект; Екатеринбург: Деловая книга, 2009. – 294 с.
2. Биофизика сенсорных систем. / Под ред. В.О. Самойлова. – СПб.: ИнформМед, 2007 – 288 с.
3. Джаксон М.Б. Молекулярная и клеточная биофизика. – М.: Мир, 2009. – 551 с.
4. Присный А.А. Биофизика: курс лекций. – Белгород, 2008. – 146 с.
5. Присный А.А. Биофизика: учебно-методический комплекс для бакалавров. – М.: НОУДПО «Институт АйТи», 2011. – 160 с.
6. Самойлов В.О. Медицинская биофизика. – СПб: СпецЛит, 2007. – 560 с.
7. Сложность. Разум. Постнеклассика. <http://cmp.esrae.ru/issue/>

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО I ЭТАПУ  
“САМОПОДГОТОВКА”

**Цель этапа.**

Теоретически изучить строение и функции основных анализаторов. Изучить свойства и механизмы функционирования зрительных рецепторов и тактильных рецепторов.

Для самоконтроля ответьте на вопросы:

1. Что такое раздражимость и раздражители? Каковы их параметры?
2. Охарактеризуйте 3-х компартментную схему анализатора.
3. Какие методы изучения анализаторов Вы знаете?
4. Охарактеризуйте свойства анализаторов.
5. Сформулируйте закон Вебера-Фехнера.
6. Охарактеризуйте особенности фоторецепции.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО II ЭТАПУ:  
“Выполнение лабораторной работы”

**Цель этапа.**

Проверить закон Вебера-Фехнера для тактильного анализатора.

Для достижения цели необходимо:

1. Положить на тыльную сторону ладони пластинку №1 (массой  $m_1$ ) и, последовательно меняя и увеличивая величину тестирующего груза  $\Delta m$  (брать пинцетом!), зафиксировать пороговое значение  $\Delta m_1$  для груза  $m_1$  (когда возникнут четкие ощущения).

2. Взять вторую пластинку  $m_2$  ( $m_1 = m_2$ ), положить на первую  $m_1$  и повторить опыт с измерением  $\Delta m_2$ . Убедиться, что  $\Delta m_2 \approx 2\Delta m_1$ .

3. Повторить опыт и измерения с пластиной  $m_3 = m_1$  и проверить- будет ли  $\Delta m_3 \approx 3\Delta m_1$  или нет?

4. Рассчитать с какой абсолютной и относительной погрешностью выполняется закон Вебера-Фехнера для тактильного анализатора,

$$\Delta m_1/m_1 \approx \Delta m_2/(\Delta m_1 + m_2) \approx \Delta m_3/(m_1 + m_2 + m_3).$$

Аналогичные измерения можно произвести и для слухового анализатора, причем  $\Delta I$  необходимо задавать с помощью ручки регулятора громкости. В этой связи вопрос: почему хорошую музыку не рекомендуют слушать громко? Подтвердите это законом Вебера для слухового анализатора.

**Блок информации**

Для любого живого организма характерно свойство раздражимости, т.е. способность отвечать на раздражение. Последнее обеспечивается адекватными для данного рецепторного аппарата раздражителями (световые, механические, электрические, химические и т.д.). Любое раздражение имеет свои основные параметры (интенсивность, длительность, градиент и т.д.), которые оцениваются (проявляются) в деятельности анализаторов. В свою очередь анализатор (как система) состоит из 3-х частей (звеньев)- периферический конец, проводник и корковый конец.

Первое звено- рецепторы- обеспечивает восприятие специфических форм энергии, которые для рецептора являются адекватными раздражителями. Например, для рецепторов уха- это механические колебания от 16 до 25 000 Гц. Второе звено- проводниковое- обеспечивается работой афферентных нервов. Корковое звено- это третья часть анализаторов, в которой возникают ощущения и восприятия. То, что корковая часть- это в определенном смысле самостоятельная часть анализатора подтверждается фактом, когда ощущения

могут возникать и без раздражения (обусловлены изменениями в окружающей рецептор среде) и без возбуждения (оно обуславливается обменом веществ в организме вследствие раздражения), например во сне или при галлюцинациях. Известно также, что возможна работа периферического звена без коркового звена (жизнь без сознания).

Существуют различные методы исследования анализаторов и, в частности, рецепторного звена. Это методы условных рефлексов, хирургические методы, электрофизиологические методы, анализ косвенных реакций (детектор лжи), сравнительно- физиологический метод, клинический метод, биохимические и биофизические методы и т.д.

К основным свойствам анализаторов относятся: чувствительность (возбудимость) - характеризует способность анализатора реагировать на раздражение (при возбудимости может быть реакция ниже порога чувствительности). Отметим, что порог  $T$  и чувствительность  $S$  связаны соотношением  $S=1/T$ . Далее, реактивность живой системы проявляется в ответах на раздражения до возникновения распространяющегося возбуждения. Возбудимость проявляется в возникновении распространяющегося возбуждения, а адекватность- в избирательности внешних стимулов (раздражений). Наконец, эффективность оценивается конечным эффектом работы анализатора (например, количеством слюны).

Биофизический метод в исследованиях анализаторов позволяет установить ряд количественных закономерностей. В 1834г. Э.Вебер установил для ряда анализаторов закон постоянства отношения  $\Delta I/I$ , где  $\Delta I$ - минимальный воспринимаемый прирост раздражения к его исходной величине. Позже Фехнер доказал, что минимальный прирост ощущения  $dS$  зависит от соотношения величин раздражения  $R$  по формуле

$$dS=CdR/R,$$

где  $C$ - константа пропорциональности. Отсюда, после интегрирования получим

$$S=K \ln R/r,$$

где  $r$ - величина раздражения, равная абсолютному порогу. Отметим, что при  $R=r$  имеем  $S=0$ . Если принять  $r$  за единицу измерения, то

$$S=K \ln R.$$

Рассмотрим строение и функционирование ряда рецепторов. Одни из наиболее интересных в эволюционном плане- это фоторецепторы. Они уже сравнительно хорошо изучены в настоящее время. В частности, недавно открыт в пурпурной мембране (ПМ) галофильных бактерий бактериородопсин (Бр) с молекулярной массой 26 000- объект весьма пристального внимания ученых (В. Стокениус, 1971г.). Каждая молекула Бр содержит один хромофор- ретиналь (полиеновый альдегид) в комплексе с белком (опсином), который преобразует энергию  $h\nu$  в перемещение  $H^+$  через мембрану и синтезируется АТФ. Все это ионные и ферментативные процессы, они сходны с фотосинтезом.

Пурпурные мембраны (ПМ) содержат: 75% белка, 25% - это липиды (фосфо- и гликолипиды). Причем существенно, что хромофор белка- ретиналь

содержится в соотношении с белком 1:1. Важно, что максимум поглощения сдвигается после освещения светом от 560нм к 570нм с переносом протона через мембрану посредством 6-ти промежуточных состояний с участием ионового кольца.



При освещении  $H^+$  освобождается и выходит во внешнюю среду. Причем поглощение света обеспечивает сдвиг электронной плотности и поляризацию белкового окружения ретиналя. Существенно, что выброс протона происходит на внешней стороне ПМ, а захват- на цитоплазматической. Таким образом внешняя среда закисляется и роль протонной помпы выполняет Бр. Одновременно установлено, что при освещении суспензии галобактерий увеличивается содержание АТФ в клетках и тормозится дыхание. Фотоиндуцированный перенос протонов через ПМ сопровождается электрогенезом, т.е. образованием на мембране фотопотенциала.

Фоторецепция позвоночных имеет определенные особенности. В частности, трансформация энергии света в фоторецепторный сигнал у позвоночных происходит в палочках и колбочках. Палочки способны генерировать сигнал в ответ на 1 квант света. Они состоят из дисков (до 1500 шт.), разделенных мембранами толщиной 15- 16нм. Мембрана образована фосфолипидным бислоем со встроенным родопсином.

Палочки обеспечивают сумеречное зрение! Родопсин- хромопротеин ( $M=40\ 000$ ), гидрофобный фрагмент которого находится внутри рецепторной мембраны, а гидрофильный компонент ( $12\ 000$ )- снаружи. Хромофор родопсина тоже ретиналь- половина молекулы  $\beta$ - каротина. При освещении родопсин обесцвечивается и максимум сдвигается с 500нм в коротковолновую область, в отличие от бактериородопсина.

В наружном сегменте много ненасыщенных жирных кислот, поэтому необходима защита от перекисного окисления с помощью  $\alpha$ - токоферола. Его недостаток приводит к образованию перекисей. При освещении родопсин переходит в изородопсин (9- цис) и далее наблюдается обратное восстановление за счет биохимических реакций.

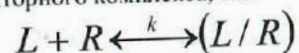
В фоторецепторной клетке на один поглощенный родопсином квант  $h\nu$  в плазматической мембране блокируется 100- 300  $Na^+$ - каналов (время открытия канала 200- 300мс). Одновременно внутриклеточно выделяется медиатор в цитоплазме наружного сегмента вследствие чего блокируются  $Na^+$ - каналы. Предполагается, что существуют посредники (например  $Ca^{2+}$  и циклические нуклеотиды), которые при освещении выбрасываются изнутри фоторецепторных дисков, блокируют  $Na^+$ - каналы а затем активно

"закачиваются" внутрь. По другой гипотезе нуклеотид цГМФ в темноте поддерживает  $\text{Na}^+$ - каналы открытыми, а при освещении их закрывает. Возможный медиатор — фосфоинозитол.

Следует отметить, что во многих случаях рецепция осуществляется за счет химических посредников. Это в частности, могут быть гормоны, регуляторные пептиды. При этом важно появление этих веществ и их доставка (транспорт) к специальным клеточным структурам- рецепторам. На втором этапе происходит "узнавание" этих молекул специальными механизмами. Наконец 3-й этап завершается определенным действием рецепторного органа- или генерацией электросигнала (например, при хеморецепции) или выработкой секретируемого продукта.

Г. Адамс и М. Дельбрюк (1968г.) показали, что скорость транспорта может ускориться в зависимости от области пространства (размеров) и размера мишени  $a$ , например, по закону  $\tau = b^3 / (3aD)$ , где  $D$ - коэффициент диффузии,  $\tau$ -среднее время диффузии молекулы переносчика.

Процессы связывания молекулы лиганда (гормона, пахучего вещества, нейромедиатора) с рецептором подчиняется обычным законам химкинекии с образованием лиганд- рецепторного комплекса, т.е.



где  $k=1/K_{\text{дис}}$  величина обратная равновесной константе диссоциации. Для гормон- рецепторных комплексов константы сродства лежат в интервале  $10^8 - 10^{11} \text{ M}^{-1}$ .

Существует также гормональная рецепция. Отметим, что многие рецепторы гормонов находятся в плазматической мембране клеток. Исключением из этого правила являются стероидные гормоны, рецепторы которых находятся внутри клетки. Многие пептидные гормоны и котехоламины преобразуются в процессе активации мембранного фермента аденилатциклазы. Этот фермент катализирует синтез регуляторного нуклеотида- циклического АМФ (цАМФ). В клетках эукариот цАМФ активизирует его зависимые протеинкиназы, которые фосфорилируют функциональные или структурные протеины. Как результат- ингибируется или активизируется синтез специфических биомолекул. Последние могут изменять транспорт ионов, механическую активность клеток и вызывать другие ответные реакции. Сигнал гормона в сигнал цАМФ преобразуется в плазматической мембране за счет взаимодействия рецептора, регуляторного N- белка и аденилатциклазы (N- белок влияет на активность Ац) по схеме:



При этом происходит попарное образование Р- N и N- Ац. Существенно, что состояние липидного бислоя влияет на скорость этих реакций образования.

Например, действие лазера существенно влияет на коэффициенты латеральной диффузии рецепторов, вызывая фотоокисление. Установлено, что коэффициент диффузии  $D$ , входящий в уравнение Фика  $\partial c / \partial t = D \nabla^2 c$  зависит от радиуса лазерного луча  $R$  по закону  $D = (R^2 / 4\tau) \gamma$ , где  $\tau$ - время полувосстановления флуоресценции,  $\gamma$ - параметр.

Восприятие запаха осуществляется обонятельной выстилкой полости носа у высших позвоночных и обонятельными клетками у низших. Разделяют жгутиковые клетки (все наземные и многие первичноводные) и микровилярные (хрящевые и двоякодышащие рыбы). Первые типы клеток заканчиваются утолщениями- булавами, содержащими трубчатые фибриллы или микроворсинки с сократимыми трубочками. Считается, что на них и располагаются белковые молекулы, ответственные за восприятие. По теории Райта запах обусловлен избирательным восприятием электромагнитных колебаний молекул пахучих веществ. Дж. Эймур выделил 7 первичных запахов (камфорный, острый, эфирный, цветочный, мятный, мускусный и гнилостный) и рассчитал размеры рецепторных лунок, воспринимающих эти запахи. Показано, что острый запах дают молекулы с большим сродством к электрону, гнилостный- нуклеофильные соединения и т.д. Если молекула может попасть в несколько специфических лунок, то получаем смешанный запах. Эймур синтезировал молекулы с заранее предсказанным запахом. Результаты взаимодействия молекулы с рецептором- генерация ЭП (регистрируется электроольфактограмма, olfacto- обоняю).

Вкусовая рецепция обеспечивается вкусовыми луковицами. У рыб эти рецепторы находятся на поверхности тела, а у нас во рту, на губах, пищеводе и т.д. На концах этих клеток находятся микроворсинки, содержащие специфические белки. Эти белки- рецепторы формируют у нас 4-е основных вкуса: горькое, соленое, сладкое, кислое. Сейчас выделены белки и рецепторы сладкого (монеллин, тиуматин и миракулин) и их антагонисты (гимнемовые кислоты и зизифин). Монеллин (белок,  $M = 10\,000$ ) в 3000 раз слаще сахарозы, способен вызывать электрический сигнал на мембране вкусовой луковицы.

В настоящей работе Вам предлагается изучить некоторые закономерности функционирования тактильного анализатора, который можно представить как обычную 3-х компартментную систему (периферическое звено- рецептор с проводящей системой, центральное звено и эфферентный компартмент).

Проверку закона Вебера- Фехнера можно проводить и при механическом раздражении кожи. Например, таким образом: стеклянная пластинка, согретая до температуры тела, укладывается на кисть руки, предплечье или спину. Исследуемый не должен на неё смотреть и вообще не должен знать о действиях экспериментатора. На пластинку осторожно накладывается гиря  $1g$ , к ней добавляются разновесы по  $0,1g$  и исследуемый должен сообщить, когда почувствует изменение давления. После отыскания минимального воспринимаемого прироста отягощения  $\Delta l$  исходный груз  $1g$  заменяют другим, повторяют те же наблюдения для ряда  $l$ , например, 1, 2, 10, 50,

100,500,1000,2000 и 3000г. Полученные данные сводятся в таблицу. Для каждого случая вычисляют  $\frac{\Delta R}{R}$  и сравнивают.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО III ЭТАПУ: "Получение зачета по лабораторной работе"

Перед выполнением работы обучающийся должен изучить все методические указания, ответить на вопросы из раздела "Самоподготовка".

После выполнения III этапа необходимо оформить протокол работы и подписать у преподавателя, а затем приступить к оформлению работы в тетради. Обратите особое внимание на параметры, влияющие на рецепцию.

Работа считается выполненной после сдачи преподавателю отчета по теоретическому и практическому разделам работы.

#### Измерение латентных периодов сенсомоторных реакций.

##### Цель работы.

Ознакомиться с основами процессов рецепции и законами их описывающими.

##### Обучаемый должен знать:

1. Свойства анализаторов и закон Вебера-Фехнера.
2. Строение и функции зрительного и слухового анализаторов.
3. Биофизические основы фоторецепции.

##### Обучаемый должен уметь:

1. Измерять латентные периоды сенсомоторных реакций.
2. Выполнить статистическую обработку результатов измерений.

#### Практическое значение

Работа фоторецепторов и рецепторов слуха дает нам основную информацию об окружающем мире. Особое значение фоторецепции для понимания единства процессов в растительном и животном мире. Биофизика анализаторов лежит в основе физиологии трудовых процессов и является фундаментом для понимания патологических процессов в психиатрии, медицинской психологии, валеологии.

#### Бюджет времени

На изучение темы отводится 6 часов, из них 2 часа лекций, 2 часа лабораторные занятия и 2 часа на самоподготовку.

#### Литература

1. Макаров П.О. Практикум по физиологии и биофизике органов чувств-анализаторов.- М.: Высшая школа, 1973.- 304с.
2. Кейдель В.Д. Физиология органов чувств.- М.: Медицина, 1975.- 216с.
3. Владимиров В.А. и др. Биофизика.- М.: Медицина, 1983.- С. 244- 252.
4. Рубин А.Б. Биофизика. В 2-х т.- М.: Высшая школа, 1987.- Т.2, с. 187- 292.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО I ЭТАПУ "САМОПОДГОТОВКА"

##### Цель этапа.

Теоретически изучить строение и функции основных анализаторов. Изучить свойства и механизмы функционирования зрительных рецепторов.

Для достижения цели использовать блок информации из предыдущей работы.

Ответьте на вопросы:

1. Чем отличается фоторецепция бактерий от фоторецепции человека?
2. Охарактеризуйте основные блоки гормональной рецепции.
3. Механизмы восприятия запаха.
4. Охарактеризуйте 3-х компартментную систему сенсомоторной рецепции.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО II ЭТАПУ:

##### "Выполнение лабораторной работы"

##### Цель этапа.

Определить время латентных периодов зрительного и слухового анализаторов.

Для достижения цели необходимо:

- I. С помощью ЭВМ войти в файл Р-тест и внимательно ознакомиться с прилагаемыми инструкциями для выполнения измерений длительности сенсомоторных реакций. Выполнить 10 измерений латентных периодов аудиомоторных реакций и зрительно- моторных реакций у одного и того же испытуемого. Сравнить полученные данные для одного испытуемого и затем для 2-х разных испытуемых. Сделать выводы по результатам экспериментов.

II. Оформить протокол наблюдений и подписать его у преподавателя.

В целом в настоящей работе Вам предлагается изучить некоторые закономерности функционирования зрительного анализатора, который можно представить как обычную 3-х компартментную систему (периферическое звено-рецептор с проводящей системой, центральное звено и эфферентный компартмент). Вам предлагается изучить статистические закономерности сенсомоторных реакций зрительного и звукового анализаторов, когда на вход системы мы подаем зрительный или слуховой сигнал, а на выходе регистрируем моторную реакцию (нажатие клавиши на ЭВМ). В целом, предлагается выполнить по 10 опытов отдельно для зрительного и слухового анализатора и сравнить их латентные периоды с доверительными интервалами. Сделайте выводы о скоростях реакций.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО III ЭТАПУ:

##### "Получение зачета по лабораторной работе"

Перед выполнением работы обучающийся должен изучить все методические указания, ответить на вопросы из раздела "Самоподготовка".

После выполнения II этапа необходимо оформить протокол работы и подписать у преподавателя, а затем приступить к оформлению работы в тетради. Обратите особое внимание на параметры, влияющие на рецепцию.

Работа считается зачтенной после сдачи преподавателю отчета по теоретическому и практическому разделам работы.



## ДЕЙСТВИЕ СВЕТА НА БИОСИСТЕМЫ. ПРОЦЕССЫ ФОТОСИНТЕЗА ЗЕЛЕННЫХ РАСТЕНИЙ

### Цель работы.

#### Обучаемый должен знать:

1. Механизмы поглощения света и трансформации энергии фотонов в химическую энергию биоструктур.
2. Основные этапы фотосинтеза световой и темновой фазы. Основные процессы, протекающие на мембранах гран хлоропластов.
3. Общебиологическое значение фотосинтеза в развитии биосферы на Земле.

#### Обучаемый должен уметь:

1. Экспериментально регистрировать процесс фотолиза воды.
2. Изучать влияние абиотических факторов (температуры и освещенности) на скорость фотосинтеза зеленых растений.

### Практическое значение

Процесс фотосинтеза обеспечивает усвоение солнечной энергии для синтеза органических соединений растений. Животные способны использовать только энергию, уже связанную в органические соединения, т.е. процесс фотосинтеза обеспечивает все энергетические потребности всех живых организмов Земли. Кроме того, кислород, выделяющийся при фотосинтезе, поддерживает состав атмосферы Земли.

**Оборудование:** лабораторная посуда, химические реактивы: растворы  $Ba(OH)_2$  (гидроксид бария),  $HCl$  (соляная кислота), 4%  $CuSO_4$  (медный купорос), 1%  $K_2Cr_2O_7$  (Дихромат калия),  $KMnO_4$  (перманганат калия), раствор фенолфталеина, часы, листы черной бумаги.

**Объект исследования:** веточки комнатных зеленых растений, веточки аквариумных растений – элодеи или валлиснерии.

### Бюджет времени

На изучение темы отводится 4 часов, из них 2 часа лабораторные занятия и 2 часа на самоподготовку.

### Литература

1. Биофизика. / Под ред. В.Г. Артюхова. – М.: Академический Проект, Екатеринбург: Деловая книга, 2009. – 294 с.
2. Джексон М.Б. Молекулярная и клеточная биофизика. – М.: Мир, 2009. – 551 с.
3. Кудряшов Ю.Б., Перов Ю.Ф., Рубин А.Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 184 с.
4. Присный А.А. Биофизика: курс лекций. – Белгород, 2008. – 146 с.

5. Присный А.А. Биофизика: учебно-методический комплекс для бакалавров. – М.: НОУДПО «Институт АйТи», 2011. – 160 с.
6. Самойлов В.О. Медицинская биофизика. – СПб: СпецЛит, 2007. – 560 с.

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО I ЭТАПУ “САМОПОДГОТОВКА”

### Цель этапа.

Повторить исходную информацию, необходимую для понимания изучаемой темы. Проверить качество усвоения новой информации (понятия и законы) перед выполнением работы.

#### I. Исходный уровень знаний.

Для изучения темы необходимо повторить:

1. Понятие фотосинтеза растительного и бактериального типа.
2. Понятие электронно-транспортной цепи.

II. Изучив блок информации и учебную литературу, обучающийся для самоконтроля должен ответить на следующие вопросы:

1. Дайте характеристику процессу фотосинтеза.
2. Объясните роль фотосинтеза в глобальных преобразованиях биосферы.
3. Какие факторы регулируют интенсивность и продуктивность фотосинтеза?
4. Каковы особенности фотосинтеза различных растений (водные и наземные)?

## МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО II ЭТАПУ: “Выполнение лабораторной работы”

### Цель этапа.

Изучить зависимость интенсивности процессов фотосинтеза от различных факторов окружающей среды (освещенность, спектральный состав света).

Для достижения цели необходимо:

#### I. Исследование влияния различной освещенности на интенсивность фотосинтеза.

Возьмите две конические колбы, предварительно выдержанные открытыми в течение 20 – 30 минут в одинаковых условиях для заполнения воздухом. Срежьте веточку комнатного зеленого растения и поставьте ее в пробирку с водой, эту пробирку опустите в первую колбу (назовем ее опытной), а вторую колбу (назовем ее контрольной) оставьте пустой, затем обе колбы практически одновременно плотно закройте пробкой. Выставьте колбы на хорошо освещенное и теплое место. Время экспозиции 60 минут.

По окончании опыта извлеките растения из обеих колб одновременно, быстро закройте каждую колбу вновь пробкой с трубочкой. Налейте в каждую колбу по 20 мл раствора  $Ba(OH)_2$  и добавьте по 2 капли раствора фенолфталеина. Оттитруйте полученные растворы в колбах раствором  $HCl$ . Интенсивность фотосинтеза определите по формуле:

$$F = \frac{(A-B) \cdot K \cdot 0,55 \cdot 60}{S_x \cdot t}$$

где А - количество НСІ в опытной колбе, В - количество НСІ в контрольной колбе, К - поправка к титру НСІ, 0,55 - стандартная величина, S<sub>x</sub> - площадь листа, t - продолжительность опыта в минутах, 60 - коэффициент перевода минут в часы.

Повторите опыт, но задайте иные условия освещенности. Например: поместите колбы в плохо освещенное, холодное место. Сравните полученные результаты и сделайте вывод о влиянии освещенности на интенсивность фотосинтеза.

### II. Изучение влияния света на возможность фотосинтеза.

Возьмите три пробирки. В каждую налейте по 2 мл баритовой воды подкрашенной фенолфталеином. В две пробирки поместите веточку комнатного зеленого растения, третью оставьте контрольной. Все пробирки плотно закройте пробками. Одну изолируйте от света, плотно завернув в черную бумагу.

Время экспозиции 40 минут. По истечении времени возьмите пробирки в руку и хорошо встряхните их до тех пор, пока станут заметными изменения окраски раствора. Какие изменения произошли в двух опытных пробирках? Опишите эти изменения в тетради и объясните возможные причины этих событий.

### III. Изучение влияния внешних условий на интенсивность фотосинтеза водных растений.

Привяжите веточку живой элодеи или валиснерии ниткой к стеклянной палочке и поместите ее в пробирку с водой. Добавьте в воду щепотку соды. Из срезанного листа водного растения начнут выделяться пузырьки воздуха, при подсчете которых судите об интенсивности фотосинтеза за определенный интервал времени. Подсчитайте количество пузырьков, выделившихся за 30 минут и запишите эти сведения в тетрадь.

Повторите опыт, но задайте при этом иные условия. Например, поместите пробирку в плохо или в хорошо освещенное место, подкрасьте воду 4% раствором CuSO<sub>4</sub> в синий цвет или в красно-розовый 1% раствором дихромата или перманганата калия. Сравните полученные результаты и дайте им грамотное объяснение.

### Блок информации

Первоисточником энергии для экосистем Земли служит Солнце. Эта энергия распространяется в космическом пространстве в виде электромагнитных волн, и небольшая часть ее, составляющая примерно  $70,3 \cdot 10^5$  кДж/м<sup>2</sup> в год, захватывается Землей. Около 40% отражается обратно от облаков, атмосферной пыли и поверхности Земли. Еще 15% поглощается атмосферой и превращается в тепловую энергию или расходуется на испарение воды. Оставшиеся 45% поглощаются зелеными растениями или земной поверхностью. Ежегодно в процессе фотосинтеза связывается около  $8 \cdot 10^{10}$  т углерода, образуется примерно  $1,8 \cdot 10^{11}$  т сухой биомассы растениями суши и почти столько же растениями Мирового океана. Именно фотосинтез является исключительным источником кислорода в атмосфере Земли, только протекание его в зеленых растениях

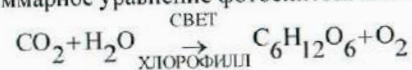
поддерживает постоянство состава атмосферы. Развитие фотосинтетического аппарата растений сделало возможным нынешнее направление эволюционного развития и стало причиной самой глобальной революции в развитии Земли: смена бескислородной (восстановительной) атмосферы Земли на кислородсодержащую (окислительную) стало причиной появления и доминирования на Земле аэробных организмов, анаэробный путь синтеза биовещества (хемосинтез) может обеспечить жизнедеятельность только отдельных микроорганизмов.

Не менее глобальным следствием появления кислородной атмосферы Земли стал выход жизни из океана на сушу: пока в атмосфере не появился озон (O<sub>3</sub>, аллотропное соединение кислорода), жесткий ультрафиолет достигал поверхности Земли беспрепятственно и сохранял способность повреждать органические молекулы. Защитное действие озона определяется совпадением диапазона максимального поглощения (230- 290 нм) с таковым для клеток живых организмов и повреждающее действие УФ на клеточный метаболизм сводится к минимуму.

Зеленым растениям свет нужен для осуществления процесса фотосинтеза, благодаря которому энергия солнечного излучения улавливается, превращается и аккумулируется на Земле. Только связанная растениями солнечная энергия становится доступной для потребления остальными организмами.

Фотосинтез может протекать не только в растениях, но и некоторых бактериях. Бактериальный фотосинтез связан с более сильными восстановителями, чем вода (H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>), и может использовать ближнее ИК-излучение (до 1000 нм). Он не вносит существенного вклада в общий процесс запасаения солнечной энергии, но локально может оказаться очень важен: в Черном море на многих участках количества хлорофилла и бактериохлорофилла в столбе воды вполне сравнимы.

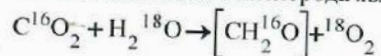
Фотосинтез – это уникальный процесс образования богатых энергией органических веществ в клетках зеленых растений под действием видимого света (400- 700 нм). Суммарное уравнение фотосинтеза имеет вид:



Процессы фотосинтеза пространственно и во времени можно разделить на 2 сравнительно самостоятельных процесса: световую стадию окисления воды и темновую стадию восстановления углекислого газа. Обе стадии протекают у высших растений и водорослей в специализированных органеллах клеток-хлоропластах (исключение синезеленые бактерии (цианобактерии), у которых аппарат фотосинтеза не обособлен от цитоплазматических мембран).

Первый этап фотосинтеза – это поглощение энергии света молекулами пигментов: различных видов хлорофилла. Молекулы пигментов упакованы в мембраны тилакоидов хлоропластов. Свет, поглощенный молекулами хлорофилла, поднимает их электроны на более высокий энергетический уровень. Энергия, выделяемая в световых реакциях, запасается в виде молекул АТФ, НАДФ-Н<sub>2</sub>, побочным продуктом световых реакций фотосинтеза является

молекулярный кислород, свободно диффундирующий в окружающую среду. Не все фотосинтетические реакции требуют света. Серия реакций протекает без участия света- темновая стадия фотосинтеза. Темновые реакции осуществляются в жидком содержимом (строме) хлоропласта. Их результатом является восстановление двуокси углерода через цикл промежуточных углеводородных форм до молекулы углевода- глюкозы. С использованием изотопных меток показано, что источником всего свободного кислорода является вода



Для фотосинтетических реакций растения используют только видимую часть спектра света. Причем водные и наземные растения в процессе эволюции приспособились улавливать различные излучения видимого света. Так глубоководные растения способны улавливать длинноволновую часть спектра-красный свет, растения поверхностных слоев океана улавливают коротковолновый синий свет.

Исход фотосинтеза, его продуктивность определяется условиями окружающей среды, в которых он осуществляется. Главную роль способны сыграть следующие факторы среды: уровень освещенности, температура, влажность воздуха и почвы. Немаловажную роль имеет общий уровень жизнеспособности самого растительного организма, особенности его метаболизма и морфологии.

Рассмотрим более подробно механизм фотосинтеза. Важнейшую роль играют электронно-конформационные взаимодействия (ЭКВ). Именно поэтому большая часть стадий процесса протекает практически необратимо. Можно выделить 3 основные фазы трансформации энергии: поглощение света фотосинтетическими пигментами и передача энергии на реакционные центры (РЦ) фотосинтеза; первичное разделение зарядов и трансформация энергии в РЦ; перенос электронов по электронно- транспортным цепям (ЭТЦ) и сопряженные процессы, приводящие к образованию первичных стабильных продуктов (НАДФ и АТФ), используемых в дальнейших темновых реакциях фиксации  $CO_2$  и образования конечных продуктов фотосинтеза.

Поглощение света в листьях происходит на системе пигментов, основными из которых являются хлорофиллы **a** и **b**, различающиеся спектрами поглощения (рис. 6.1). Хлорофилл **a** служит основой 2 отдельных подсистем, способных утилизировать фотоэнергию: фотосистемы I (ФС I) и фотосистемы II (ФС II). Часть вспомогательных пигментов, спектрально близких хлорофиллу **a** (хлорофилл **b**, каротиноиды и т.д.), непосредственно окружают РЦ, образуя так называемые антенны. На одну молекулу фотоактивного хлорофилла работают несколько десятков молекул вспомогательных пигментов. Организация их в антенны позволяет максимально полно использовать энергию фотонов и перенос энергии со вспомогательных пигментов на хлорофилл РЦ подтверждается присутствием в спектре люминесценции неповрежденных зеленых клеток только линий хлорофилла **a**. Следует заметить, что свойства хлорофилла **a** зависят от того, входит он в состав РЦ или антенный набор пигментов. Фотосистемы

различаются поглощаемым излучением: ФС I использует излучение с  $\lambda \leq 710$  нм, а ФС II с  $\lambda \leq 680$  нм. В мембранах тилакоида центры ФС I и ФС II пространственно разделены и сопряжение достигается последовательной передачей электрона в цепи различных молекул (ЭТЦ) (рис. 6.2).



Усвоение энергии начинается с поглощения электрона в ФС II с образованием синглетно возбужденного хлорофилла **a** (P680\*), который передает электрон через промежуточный акцептор молекуле феофитина (безмагнийевый аналог хлорофилла), образуя его анион- радикал (F). Анион-радикал служит донором электрона для связанного пластохинона (PQ), координированного с ионом  $Fe^{3+}$ . Далее электрон переходит к молекуле свободного пластохинона, присутствующего в избытке по отношению к прочим компонентам цепи, затем цитохромы *b<sub>6</sub>* и *f* ( $Cyt_{b_6/f}$ ), образующие комплекс с железосернистым центром, передают электрон через медьсодержащий белок пластоцианин (PC) к реакционному центру ФС I.

Центры P680\* быстро восстанавливаются, принимая электроны через ряд переносчиков от воды. Образование  $O_2$  требует четырехкратного возбуждения реакционного центра и катализируется мембранным комплексом, содержащим Mn. Очевидно, что эти центры- сильные окислители.

Хлорофилл в ФС I отдает электрон через цепь переносчиков растворимому белку ферредоксину (fd), восстанавливаемому с помощью фермента ферредоксин- НАДФ- редуктазы НАДФ до НАДФН. Катион- радикал P700\* восстанавливается пластоцианином. Центры ФС II- сильные восстановители.

В зрелых хлоропластах содержатся граны (стопки тиллакоидов), в мембранах которых содержится полный набор ЭТЦ, и так называемые агранальные тиллакоиды, содержащие только ФС I. Имеются различия биохимических их ролей.



Рис.6.2.

В общем случае перенос электронов пластохиноном порождает разность потенциалов на мембране (плюс- внутри, минус- снаружи мембраны). Следствием этого становится движение протонов снаружи тилакоида внутрь. Перенос протонов сопрягается синтезом АТФ из АДФ и неорганического фосфата. Предполагают, что обратный транспорт протонов из тилакоидов в строму посредством белкового сопрягающего фактора ( $H^+$ - АТФ- синтетазы) также сопровождается синтезом АТФ. Центры ФС I способны работать автономно, без контакта с ФС II (пунктир на рис.6.2). В этом случае вся энергия запасается в виде АТФ.

Важность присутствия в растениях обоих ФС становится понятна на основании эффектов Эмерсона. Первый состоит в резком падении интенсивности фотосинтеза при  $\lambda \geq 700$  нм (красное падение), второй состоит в неаддитивном усилении фотосинтеза при добавлении света низкой интенсивности  $\lambda = 650$  нм к дальнему красному свету (эффект усиления). Таким образом, показано существование двух отдельно организованных, но взаимосвязанных ФС и иницирующая роль в фотосинтезе ФС, использующей коротковолновое излучение (ФС II,  $\lambda \leq 680$  нм).

Из сказанного, видна прочная и взаимообусловленная связь всех участников процесса связывания солнечной энергии. Уже первые стадии (поглощение фотона с образованием возбужденных молекул) без участия следующих участников (пластохинонов), способных эффективно снять возбуждение и передающих энергию дальше в цепь, были бы практически полностью обратимыми или же, что значительно хуже, возбужденные молекулы

повреждались. Белки, включенные в ЭТЦ, выполняют роль электронных насосов, причем перекачка идет не за счет движения молекул, как целого, а за счет конформационных движений внутри молекул (мгновенный заряд образуется в одной части молекулы и переходит в другую за счет изгибов и колебаний внутренних связей), присутствие в них металлов легко меняющих валентность (Fe и Cu) и облегчает подобный перенос.

Описанные процессы составляют световые стадии запасаания энергии. Темновые стадии энергию потребляют: за счет АТФ и НАДФН связывается углекислый газ в глюкозу и далее, а АДФ возвращается в цикл запасаания энергии.

Связывание  $CO_2$  происходит в так называемом цикле Кальвина (рис.6.3). Начинается он с фосфорилированного сахара пентозы рибулозо-1,5- дифосфата. К нему присоединяется молекула углекислого газа, а полученная молекула распадается на две молекулы 3- фосфоглицериновой кислоты. Каждая из них реагирует с молекулой АТФ, получаются две молекулы 3- фосфоглицерофосфата, которые в свою очередь реагируют с НАДФН и восстанавливаются до глицеральдегид- 3-фосфата. Образовавшийся трехуглеродный альдегид ферментативно вовлекается в цепь реакций, где из гексозы и триоз получают три пентозы ксилулозо- 5-фосфатов. Они изомеризуются в рибулозо- 5-фосфат, который реагирует с АТФ, давая рибулозо- 1,5-дифосфат и замыкая цикл. Таким образом на фиксацию одного углеродного атома уходит 3 молекулы АТФ и 2 НАДФН. Посчитав энергию фотонов и образованных связей, получаем к.п.д. фотосинтеза около 30%.

Глицеральдегид- 3-фосфат далее может быть превращен в глюкозо- 6-фосфат и далее превратиться в крахмал или в 3-глицерофосфат и далее в липиды.

Несмотря на формальную независимость протекания реакций световой и темновой стадий, существуют механизмы их взаимовлияния. Фермент, катализирующий стадию превращения рибулозодифосфата в фосфоглицериновую кислоту, сильно увеличивает свою активность на свету. Установлены следующие механизмы влияния:

1. НАДФН образуется в световых стадиях процесса и служит аллостерическим активатором фермента.
2. Скорость реакции растет при защелачивании среды. На свету идет перекачка протонов из стромы в полость тилакоидов и рН стромы, где и происходит фиксация углерода.
3. Фермент активизируется в присутствии  $Mg^{2+}$ . На свету ионы  $Mg^{2+}$  выбрасываются из полостей тилакоидов в строму взамен  $H^+$  по механизму антипорта.

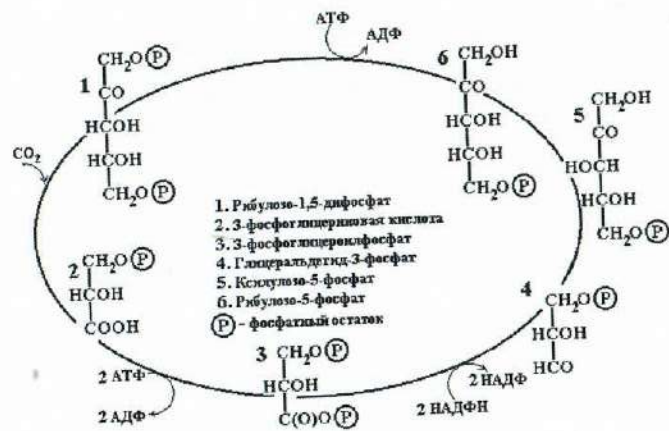


Рис.6.3. Цикл Кальвина. Пояснения в тексте.

Кроме основного цикла Кальвина в тропических растениях углерод связывается по так называемому C<sub>4</sub>-пути. Прежде чем попасть в цикл синтеза сахаров и далее, углерод накапливается в четырехуглеродных кислотных аспарагинат ((COO-C(NH<sub>2</sub>)H-CH<sub>2</sub>-COO)<sup>2-</sup>)- и малат ((COO-C(OH)H-CH<sub>2</sub>-COO)<sup>2-</sup>)- остатках. Для условий избытка солнечной энергии именно концентрация CO<sub>2</sub> становится лимитирующей полную скорость фотосинтеза и промежуточное связывание, даже с затратой энергии, окупается повышением общей интенсивности процесса.

Так можно описать фиксацию углерода в фотосинтезе в самом общем виде. Рассмотрим организацию процессов в связи с прочими системами, присутствующими в живых организмах.

Все компоненты фотосинтетических систем присутствуют в мембране тиллакоида (рис. 6.4). Обозначения II и I означают соответствующие фотосистемы, интересен блок обозначенный III. Обнаружено, что он во многих деталях повторяет дыхательные цепи в дыхательных митохондриях растительных и животных клеток. В его состав входят электронтранспортные белки: цитохромы (содержат гемовые группировки) и негемовые белки, обозначаемые FeS. Цитохромы- белки очень древнего происхождения, многие из них с минимальными вариациями состава присутствуют в различных растительных и животных клетках, цитохромы *c*, возникнув почти 1,5 млрд. лет назад, входят в различные эукариотические клетки, не изменившись, и реагируют в качественных реакциях абсолютно стандартно. Сходны их спектры и окислительно-восстановительные потенциалы. Таким образом видно, что выполнение сходной функции (фосфорилирование) в разных организмах обеспечивает стандартный набор качеств и состава. Кроме того, доказано что фото- и окислительное фосфорилирование процесс запускается созданием градиента pH.

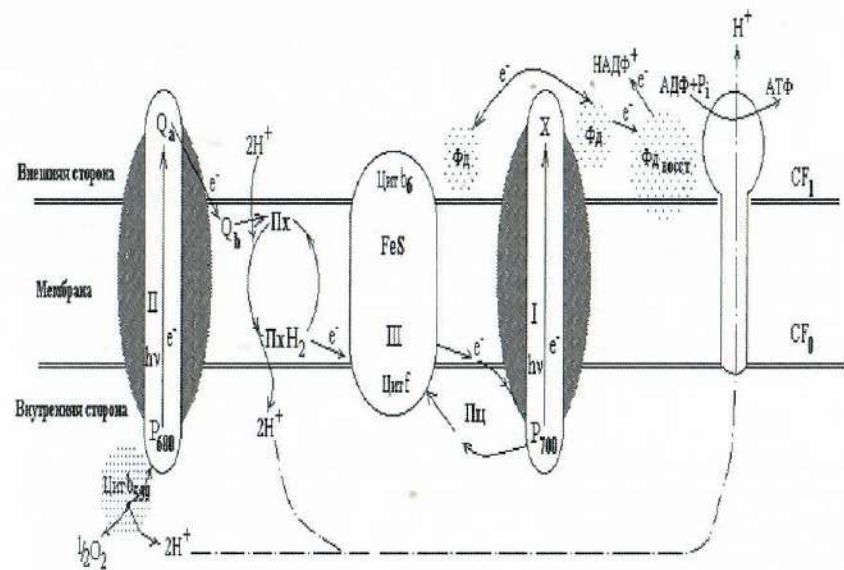


Рис.6.4. Размещение компонентов фотосинтетической цепи в мембране тиллакоида.

Изучение других природных фотопроцессов (зрение, фоточувствительность галофильных бактерий) показывает тоже сходство базовых комплексов с фотосинтезом. В этих процессах светочувствительность обеспечивают белки родопсин и бактериородопсин, соответственно. В молекулах выделяют две составные части: белок опсин и полиненасыщенный альдегид ретиналь. При фотовозбуждении бактериородопсина образуются несколько форм молекул и с течением времени практически все могут быть переведены в исходную, но образование одной из них, обозначаемой M<sub>412</sub> (по полосе поглощения), сопровождается переносом протона через мембрану и это делает процесс необратимым. Процесс включает цис- транс- изомеризацию и образование депротонированной формы молекул. Для родопсина стадии процесса в основном подобны, но одной из стадий является фотораспад на опсин и транс-ретиналь, для замыкания цикла требуется поставка ретиналя уже в форме 11-цис. Процесс зрения информационный, ретиналь уходит, но белок остается и происходит фиксация каждого фотона. Для более полной фиксации фотоэнергии все фотосистемы, кроме непосредственно фиксирующих энергию молекул, обязательно включают молекулы-сенсibilизаторы, повышающие чувствительность. У фотосинтетических систем это каротины и прочие пигменты, в фоторецепции-транс-ретиналь. Таким образом, очевиден общий план организации систем со сходными функциями.

В настоящей работе Вы можете пронаблюдать самые основные закономерности процесса фотосинтеза в различных условиях окружающей среды. Произведя все необходимые наблюдения и расчеты, сделайте выводы из наблюдаемых фактов.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО III ЭТАПУ:

“Получение зачета по лабораторной работе”

Перед выполнением работы обучающийся должен изучить все методические указания, ответить на вопросы из раздела “Самоподготовка”. После выполнения II этапа необходимо оформить протокол работы и подписать у преподавателя, а затем приступить к оформлению работы в тетради. Обратите особое внимание на влияние различных параметров на интенсивность фотосинтеза. Работа считается зачтенной после сдачи преподавателю отчета по теоретическому и практическому разделам работы.

### Лабораторная работа №7 ФИЗИКА И БИОФИЗИКА ИЗЛУЧЕНИЙ. ЭФФЕКТЫ ДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ НА БИОСИСТЕМЫ

#### Цель работы.

**Обучаемый должен знать:**

1. Основные методы регистрации радиоактивных излучений (РИ) и частиц. Классификацию этих излучений.
2. Методы защиты биообъектов от радионизлучения. Основные единицы и дозы облучения и поглощения.

**Обучаемый должен уметь:**

1. Пользоваться средствами дозиметрического контроля.
2. Производить расчет радиационной защиты и объективно интерпретировать полученные результаты.

#### Практическое значение

Знание основных понятий радиационной биофизики в настоящее время необходимы любому специалисту медико-биологического профиля. Достаточно перечислить только несколько основных методов и технических устройств, используемых в биологии и медицине, что бы понять важность изучаемой темы. Это использование установок для облучения семян растений перед посадкой (радиация, как мутагенный фактор), при длительном хранении сельскохозяйственной продукции, с целью повышения сроков хранения, стерилизации вредителей с/х посевов с целью подавления их популяций, различные изотопные методы для изучения распределения веществ в организмах или особях на некоторой территории, лучевая терапия и т.д.

#### Литература

1. Биофизика. / Под ред. В.Г. Арнохова. – М.: Академический Проект; Екатеринбург: Деловая книга, 2009. – 294 с.
2. Блохина М.Е., Эссаулова И.А., Мансурова Г.В. Руководство к лабораторным работам по медицинской и биологической физике. – М.: Дрофа, 2001. – 288 с.
3. Кудряшов Ю.Б. Радиационная биофизика (ионизирующие излучения). – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 448 с.
4. Кудряшов Ю.Б., Перов Ю.Ф., Рубин А.Б. Радиационная биофизика: радиочастотные и микроволновые электромагнитные излучения. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 184 с.
5. Присный А.А. Биофизика: курс лекций. – Белгород, 2008. – 146 с.
6. Присный А.А. Биофизика: учебно-методический комплекс для бакалавров. – М.: НОУДПО «Институт АйТи», 2011. – 160 с.
7. Самойлов В.О. Медицинская биофизика. – СПб: СпецЛит, 2007. – 560 с.
8. Сложность. Разум. Постнеклассика. <http://cmp.esrae.ru/issue/>

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО I ЭТАПУ:  
"Самоподготовка"

I. Исходный уровень знаний.

Для изучения темы необходимо повторить:

1. Постулаты Бора, модель водородоподобного атома по Бору, вычисление энергии, необходимой для перехода электрона с одного уровня на другой и энергии, необходимой для ионизации атома, т.е. полного отрыва электрона от атома, виды разрядов в газах;
2. Движение заряженных частиц в перпендикулярных электрических и магнитных полях, сила Лоренца. Для самоконтроля решить следующие задачи для проверки исходного уровня знаний:
3. Какова величина энергии электрона, находящихся на уровне с  $n=2$  в водородоподобном атоме с зарядом ядра  $+2e$ ? Каков радиус этой орбиты?
4. Расстояние между плоскими электродами в ионизационной камере  $d=2\text{см}$ , разность потенциалов  $200\text{ В}$ , диаметр молекул газа  $c=2\cdot 10^{-8}\text{ см}$ ,  $n_0=10^{18}$  молекул/см<sup>3</sup>. Найти кинетическую энергию образовавшегося при ионизации электрона. Возможна ли ударная ионизация молекулы газа, если энергию получает электрон, находящийся в состоянии  $2p$  ( $L$ -слой)?
5. По данным предыдущей задачи рассчитать необходимую разность потенциалов  $U$  для начала ударной ионизации.
6.  $\beta$ -частицы в камере Вильсона отклонились на  $\Delta y=2\text{ мм}$  в перпендикулярном направлении, пройдя путь по горизонтали  $x=10\text{ см}$ . Напряженность электрического поля, перпендикулярного вектору скорости  $\vec{v}$  равна  $E=10^4\text{ в/м}$ . Найти горизонтальную (собственную) скорость  $\beta$ -частиц.
7. Радиус кривизны траектории  $\alpha$ -частицы в пузырьковой камере  $R$ , скорость её движения  $v$ . Найти массу частицы  $m$ , если величина магнитной индукции  $B$ , а  $\sin\alpha=1$ .

II. Вопросы для самоконтроля к данной работе (новый материал):

1. Где используются элементы ядерной биофизики в биологии и медицине?
2. Каковы основные принципы классификации элементарных частиц?
3. Объяснить принцип работы ионизационной камеры.
4. Каково устройство и принцип работы СГМ?
5. Что такое фоновая активность и как она определяется в данном исследовании?
6. Что такое счетная характеристика СГМ?
7. Каков принцип работы камеры Вильсона?
8. Для чего используются толстослойные пластинки и пузырьковые камеры? Каков принцип их работы?
9. В чем сущность теории "мишени"?
10. Каковы основные механизмы патогенного и лечебного действия РИ на организм животных и растений?
11. Каковы основные методы защиты от радиоизлучений?
12. Как идентифицировать кривую роста численности дрожжевых клеток с помощью математических моделей?

13. Составьте дифференциальное уравнение, описывающее процесс поглощения веществом электромагнитного излучения. Каково его решение?
14. Как определяется  $x$ - толщина слоя вещества, который ослабляет интенсивность излучения в  $n$  раз?
15. Какие виды взаимодействия электромагнитного излучения с веществом Вы знаете?
16. Что такое внутренний фотоэффект?
17. Может ли фотон поглощаться свободным электроном?
18. Что такое Комптон- эффект?
19. Каковы условия рождения электронно- позитронных пар?
20. Вычислите значение  $\nu_{min}$ - минимальной частоты  $\gamma$ -кванта, при которой рождается позитрон?
21. От чего зависит интенсивность комптоновского рассеяния?
22. Что такое поглощенная доза? Какова единица измерения этой дозы?
23. Что такое доза излучения и в каких единицах она измеряется?

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО II ЭТАПУ:  
"Выполнение работы"

Цель этапа.

1. Снятие радиоактивной характеристики ряда технических и пищевых продуктов.
2. Определение фона счетчика Гейгера- Мюллера.
3. Изучить количественные характеристики действия жесткого УФ-излучения на дрожжевые клетки.

Порядок выполнения

1. Проверить правильность работы основных элементов блок- схемы (рис.7.1), составляющих устройство для измерения радиоактивности.

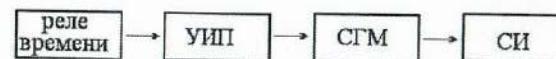


Рис.7.1. Блок- схема измерительной установки:  
УИП- универсальный источник питания, СГМ- счетчик Гейгера- Мюллера,  
СИ- счетчик импульсов

Для этого надо включить универсальный источник питания (УИП) со счетчиком импульсов (СИ). Выждать 1 мин. для прогрева прибора. Открыть радиоактивный препарат. Внимание! Реле времени установлено в положение, соответствующее времени измерения  $t=1\text{ мин}$ . Сделать пробный пуск. Убедиться в нормальной работе схемы. Перед началом пуска нажать кнопку "Сброс" на панели СИ.

Измерить 5 раз значение фона РИ. Результаты занести в таблицу 7.1 и провести статобработку результатов для доверительного интервала

Таблица 7.1

	№ измерения					$\bar{N}_\Phi \pm \Delta N_\Phi$
	1	2	3	4	5	
Результат						

2. Открыть свинцовую крышку радиоактивного препарата. Измерить 5 раз значение активности препарата ( $N_n$ ). Произвести первичную статистическую обработку результатов измерений (найти  $\bar{N}_n \pm \Delta N_n$ ). Сделать заключение об активности препарата.

### Блок информации

Во всех этих случаях необходимо знать методы измерения и регистрации радиоактивного излучения, принципы работы используемых технических устройств с целью обеспечения правильной их эксплуатации и безопасной работы обслуживающего персонала, а так же возможности таких устройств для терапевтического и мутагенного воздействия.

В настоящее время существует большой спектр специальных устройств регистрации различных частиц, которые получаются как при радиоактивном распаде атомов, так и при действии внешнего, космического излучения. Все эти частицы различаются наличием или отсутствием спина (собственного спинового момента), заряда, массы, энергии. Частицы с полуцелым спином (фермионы) подчиняются статистике Ферми- Дирака, для них справедливо правило Паули- в системе фермионов не может быть одинаковых частиц. Частицы с целым спином (бозоны) подчиняются статистике Бозе- Эйнштейна, их число в данном состоянии произвольно. Из всех известных науке элементарных частиц (их число свыше 6 тысяч) пока только фотоны ( $\gamma$ -кванты) являются представителями устойчивых природных бозонов, остальные частицы- фермионы с разными зарядами, массами, энергиями.

Различные регистрирующие устройства позволяют изучать в основном заряженные частицы, которые вызывают ионизацию среды, т.е. при соударении вырывают электрон из атомов частиц среды, сообщая ему энергию ионизации  $E_i$ . Однако незаряженные частицы, особенно с большой энергией также могут взаимодействовать с электронами атомов или ядрами и, в конечном итоге, могут быть зарегистрированы.

Рассмотрим основные методы и устройства регистрации частиц.

Ионизационная камера. Это герметичный сосуд с двумя электродами, заполненный газом (воздух, водород, азот и др.) при пониженном давлении (рис.7.2). Между электродами создается разность потенциалов в пределах 100-1500 В. *Регистрируемая частица*, попадая в счетчик, вызывает ионизацию газа и появление тока в цепи. Камера работает в режиме насыщения- все электроны и

ионы, образуемые частицей, достигают электродов, поэтому величина тока  $I$  пропорциональна числу частиц (интенсивности излучения)  $N$ , т.е.  $I=kN$ . Кроме того, различные частицы могут образовывать разное число пар ионов ( $\alpha$ -частица

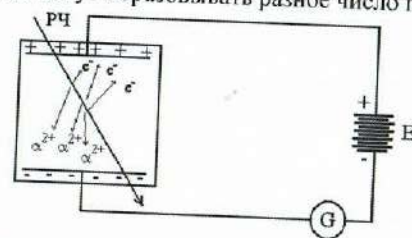


Рис.7.2 Схема с ионизационной камерой: G- гальванометр, E- источник питания, PC- регистрируемая частица

создает десятки тысяч пар ионов, быстрая космическая частица- несколько пар), поэтому при одинаковом числе  $N$  ток  $I$  зависит и от вида частиц. Это явление используют для идентификации частиц.

Если увеличить межэлектродный потенциал, то образовавшиеся ионы и электроны ускоряются внешним полем  $E$  и на длине свободного пробега  $\lambda$  (которая определяется диаметром молекул  $\sigma$  и их числом в единице объема  $n_0$  по формуле  $\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}n_0\sigma}$ ) приобретают энергию

$$\frac{mv^2}{2} = qU = qE\lambda,$$

где  $E$ - напряженность электрического поля между электродами. Этой энергии может быть достаточно для вторичной ионизации молекул газа, в результате вместо образовавшихся  $m$  ионов получим  $m \cdot n$  ионов, где  $n$ - коэффициент газового усиления ( $n \leq 10^7$ ).

Отсутствие или наличие ударной ионизации влияет только на величину тока  $I$ , которая в любом случае зависит от количества частиц  $N$ . Однако если и дальше увеличивать разность потенциалов, то мы попадаем в область самостоятельного разряда, который вызывается внешней частицей, но не прекращается при последующем отсутствии частиц и нужны специальные устройства для его гашения.

Счетчик Гейгера- Мюллера (СГМ). В основе его работы- самостоятельный газовый разряд. Конструктивно СГМ выполнен в виде стеклянной трубки, покрытой изнутри тонким слоем меди (катод) и центральной вольфрамовой нити (анод) (рис.7.3).



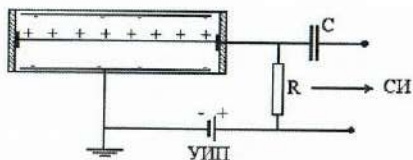


Рис.7.3. Схема со счетчиком Гейгера- Мюллера: СИ- счетчик импульсов, УИП- универсальный источник питания.

Частицы высоких энергий ( $\beta$ ,  $\gamma$  и др.) проникают через стенку датчика, для  $\alpha$ -частиц в торце счетчика делают окошко из алюминиевой фольги или слюды. Возникающий самостоятельный разряд кратковременный, т.к. разрядный ток создает падение напряжения на сопротивлении  $R$ , которое велико ( $R \sim 10^9 \text{ Ом}$ ) и напряжение между электродами счетчика (соответственно и  $E$ ) уменьшается настолько, что энергии электронов или ионов  $qE\lambda$  уже недостаточно для ионизации встречных молекул. Происходит быстрая рекомбинация электронов и ионов, газовый разряд прекращается. Счетчик приходит в исходное состояние и может регистрировать следующую частицу. Таким образом каждая частица, попадая в счетчик, дает импульс тока и скачок напряжения на  $R$ , который можно регистрировать любым счетчиком импульсов. Длительность импульса напряжения исчисляется  $\tau = 10^{-4} - 10^{-6} \text{ с}$ , следовательно, за 1 сек можно зарегистрировать до  $10^6$  импульсов (это максимально возможное число). Если мощность излучения больше, то счетчик не успевает срабатывать и надо воспользоваться ионизационной камерой, в которой  $I = kN$ . Следует отметить, что величина  $\tau$  зависит от наличия добавок (этилена, паров эфира) в среде счетчика, которые ускоряют гашение разрядов и уменьшают  $\tau$ .

При измерении числа импульсов (частиц) в минуту  $N$  с помощью счетчика Гейгера- Мюллера необходимо учитывать наличие фона, который обусловлен космическим излучением, радиоактивным загрязнением среды. Поэтому получаемое значение  $N = N_{\text{и}} + N_{\text{ф}}$ , где  $N$  - измеренное число импульсов в единицу времени,  $N_{\text{и}}$  - активность источника,  $N_{\text{ф}}$  - фоновая активность. Если источник отсутствует, то  $N = N_{\text{ф}}$ . Величина  $N_{\text{ф}}$  зависит от времени года, места нахождения установки и т.д. и должна определяться каждый раз перед измерениями.

Следует отметить, что при постоянных  $N_{\text{и}}$  и  $N_{\text{ф}}$  величина  $N$  будет зависеть от приложенного напряжения  $U$  между электродами.

График зависимости  $N(U)$  называется счетной характеристикой счетчика Гейгера- Мюллера (рис.7.4).

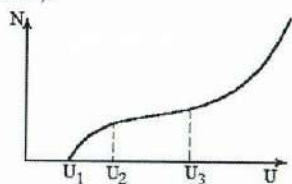


Рис.7.4. Счетная характеристика счетчика Гейгера- Мюллера

Напряжение  $U_1$  соответствует началу ударной ионизации, переходящей в самостоятельный разряд, но не для всех частиц, попадающих в счетчик. В интервале  $U_2 - U_3$  (участок плато) практически любая частица, попавшая в счетчик будет зарегистрирована. Эта область относительной независимости числа импульсов от напряжения соответствует устойчивому режиму работы счетчика и в центре этой области рекомендуется работать. При увеличении  $U > U_3$  в счетчике начинается непрерывный газовый разряд, соответствующий пробое диэлектрика и счетчик становится непригодным для работы, поэтому в эту область желательно не попадать, в противном случае необходимо немедленно отключить питание СГМ.

Камера Вильсона. Принцип её работы основан на конденсации пересыщенных паров воды или спирта на цепочке ионов, образующихся вдоль траектории движения регистрируемых частиц. Чаще всего камера выполнена в виде цилиндра с черным подвижным дном и стеклянным верхом. Внутри её находятся пары спирта или воды в смеси с аргоном или другим инертным газом. При резком сжатии пары становятся пересыщенными и образующийся трек снимают на черном фоне. Действуя электрическими или магнитными полями в перпендикулярном вектору скорости частиц  $\vec{v}$  направлении ( $\vec{v} \perp (\vec{E}, \vec{B})$ ), можно изменить траекторию и по её радиусу судить о скорости движения частиц, их массе. В этом случае центробежной силой может являться сила Лоренца ( $F_s = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$ ) или сила электростатического взаимодействия ( $F_s = q \cdot E$ ).

Толстослойные пластинки. Способ регистрации основан на действии заряженных частиц или их продуктов распада (взаимодействия с веществом подобно квантам света) при попадании в фотоэмульсию. Так как плотность последней велика, то длина треков частиц невелика (около 1 мм) и обычно такие пластинки обследуют при поперечном срезе под микроскопом.

Пузырьковая камера. Рабочее тело - перегретый жидкий водород (или другое тело), в котором регистрируемые частицы создают центры парообразования в виде треков. Как и в камере Вильсона возможно действие поперечных магнитных ( $B$ ) и электрических ( $E$ ) полей.

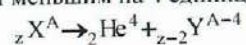
В настоящее время существует целый ряд других специальных методов регистрации и изучения частиц, получаемых при ядерных реакциях или космического происхождения, которые мы не изучаем в данной работе.

Изучив методы регистрации радиоизлучений, важно теперь понять причины возникновения радиации на Земле. Они бывают эндогенные (земного происхождения) и экзогенные (например, космической природы). Для нас (с учетом возросшего числа атомных станций и ядерных ракет) особый интерес представляют источники радиации земного происхождения. Следует отметить, что радиоизотопы буквально окружают нас. Это и тяжелая вода ( $D_2O$ ), и изотопы  $K$  и  $Na$  в пищевой соли, и газ радон в бытовых помещениях и т.д. Важно только, какова их концентрация и активность. На этом и следует сейчас остановить своё внимание обучаемому.

В современной физике под радиоактивностью понимают спонтанное

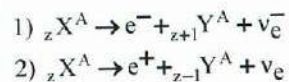
(самопроизвольное) превращение неустойчивого изотопа химического элемента в другой изотоп, при этом самопроизвольно изменяется состав атомного ядра, сопровождаемый испусканием ядрами элементарных частиц или других ядер (например, ядер He-  $\alpha$ -частиц). Эти процессы являются результатом либо *сильных взаимодействий* (ядерных сил), для которых характерно наличие потенциальных барьеров (кулоновского и центробежного), либо *слабых взаимодействий* (например, для  $\beta$ -распада). Испускание ядром *гамма-излучения* обусловлено квантовыми переходами между различными состояниями одного и того же ядра и не приводит к изменению состава ядер, поэтому его не относят к числу радиоактивных превращений.

При  $\alpha$ -распаде из ядра  $X$  вылетает  $\alpha$ -частица (двукратно ионизированный атом He-  ${}^4_2\text{He}$ ) при этом образуется новое ядро  $Y$  с зарядом  $z$  меньшим на 2 единицы и массовым числом  $A$  меньшим на 4 единицы, т.е.

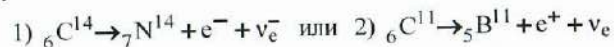


Образуется ядро химического элемента, расположенного в таблице Менделеева левее на 2 клетки от исходного  $X$  (смещение влево). Кинетическая энергия вылетающей  $\alpha$ -частицы определяется массами ядер  $X$ ,  $Y$  и  $\alpha$ -частицы, при этом энергетический спектр  $\alpha$ -частицы дискретный. Известно более 200  $\alpha$ -активных ядер, в основном, в конце периодической таблицы и 20  $\alpha$ -активных изотопов редкоземельных элементов, которые дают  $\alpha$ -частицы с энергиями 4-9 Мэв и 2-4,5 Мэв соответственно.

При  $\beta$ -распаде происходит самопроизвольное испускание или поглощение электронов ( $e^-$ ) или позитронов ( $e^+$ ), нейтрино ( $\nu_e$ ) или антинейтрино ( $\bar{\nu}_e$ ), обусловленное взаимным превращением нейтронов и протонов внутри ядра. При этом образуется новое ядро  $Y$  химического элемента, расположенное в таблице Менделеева на одну клетку правее исходного или левее (позитронный распад), т.е.



Например:



Так как масса  $\beta$ -частицы много меньше массы составных частиц ядра протонов ( $p$ ) и нейтронов ( $n$ ), то мы ее не учитываем в наших реакциях. Далее, появление нейтрино при  $\beta$ -распаде было предсказано теоретически на основании закона сохранения энергии и спина, и только в 1956 г. удалось экспериментально зарегистрировать эту частицу, которая не имеет заряда, с массой покоя равной нулю, но обладает полущелым спином, как все фермионы. При  $\beta$ -распаде массовое число  $A$  не изменяется, поэтому общее число протонов и нейтронов тоже сохраняется, значит должны происходить превращения  $n \rightarrow p$  и  $p \rightarrow n$  согласно реакциям:



Энергетический спектр образующихся  $\beta$  частиц непрерывный с выраженным максимумом, характерным для данного радиоактивного ядра. На рис.7.5 по вертикали отложено число частиц, образовавшихся при радиоактивном распаде за некоторый интервал  $t$ , по горизонтали-энергия этих частиц

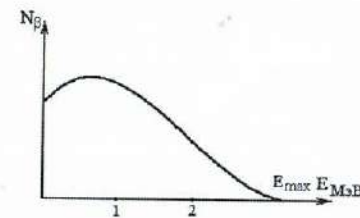


Рис.7.5

*Гамма-лучи* испускаются ядрами в возбужденном состоянии. В этих состояниях (метастабильных) ядра могут существовать, в зависимости от свойств данного энергетического уровня и уровня, на который переходит ядро после излучения (спин, четность, энергия), от  $10^{-10}$  сек. до нескольких лет. Довольно часто возбужденное ядро, не излучая  $\gamma$ -квантов, передает свою избыточную энергию электронной оболочке при этом вылетает один электрон из атома и возникает вторичное излучение рентгеновского или оптического диапазонов. Такой процесс называется внутренней электронной конверсией.

Во всех рассмотренных случаях ядерные процессы и последующие излучения являются случайными (стохастическими) процессами, описываемые законами теории вероятности. Если для данного числа ядер процесс распада в интервале  $(t, t + \Delta t)$  не зависит от предшествующих событий, а вероятность процесса за малый интервал времени  $dt$  пропорциональна этому интервалу и равна  $\lambda dt$ , где  $\lambda$ - некоторая величина, равная среднему числу распадов ядер за время  $dt$  при общем количестве ядер  $N$  к моменту времени  $t$ , то такой процесс подчиняется закону Пуассона. При этом мы считаем вероятность наступления 2-х и более событий (распадов) за  $dt$  близкой к нулю (практически невозможное событие).

Тогда вероятность того, что за время от 0 до  $t + dt$  не произойдет ни одного распада ( $m=0$ ) определится из дифференциального уравнения следующего вида:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) \quad (\text{см. примечание})^1$$

<sup>1</sup> Примечание: Вероятность того, что за интервал  $(0, t)$  не произойдет ни одного распада  $P_0(t)$ , а вероятность  $P_0(t + dt)$  отсутствия распада в интервале  $(0, t + dt)$  равна произведению:  $P_0(t + dt) = P_0(t) \cdot (1 - \lambda dt)$  (второй сомножитель равен вероятности того, что за  $dt$  не будет распада). Отсюда

$$\frac{P_0(t + dt) - P_0(t)}{dt} = -\lambda P_0(t) = \frac{dP_0(t)}{dt}$$

Его решением является:

$$P(t) = P_0 e^{-\lambda t}$$

В общем случае вероятность наступления  $m$  событий за интервал  $(0, t)$  равна

$$P_m(t) = \frac{\lambda t^m}{m!} e^{-\lambda t}$$

У этого распределения математическое ожидание равно дисперсии и имеет вид:

$$M[X] = \lambda t = D[X]$$

Для определения константы  $\lambda$  можно взять малый промежуток времени  $\Delta t$ , в течение которого происходит 3-5 распадов (в среднем) и построить статистическую функцию распределения Пуассона  $P_m^*(\Delta t) = k/n$ , где  $k$  - число испытаний, в которых за  $\Delta t$  зарегистрировано  $m$  распадов,  $n$  - общее число испытаний. Для большей точности  $n$  берут побольше, тогда  $P_m^*(\Delta t) \rightarrow P_m(t)$ . Значение  $\lambda$  определяем из формулы

$$\lambda \Delta t = M^*[X] = \sum_{i=1}^n m_i P_{m_i}^*(\Delta t) = \sum_{i=1}^n m_i \frac{k_i}{n}$$

В нашей работе  $n=20$ ,  $\Delta t=10$  сек, а  $\Delta m$  изменяется от 0 до некоторого максимального числа, которое определяется обучающимся практически.

Однако вычисленное значение  $\lambda$  определяет среднее значение распадов данного числа ядер за  $\Delta t$  для данного вещества. Это значит, что для разных моментов времени  $t_1$  и  $t_2$  среднее число распавшихся ядер за  $dt$  ( $dN(t_1)$  и  $dN(t_2)$  соответственно) будет различным. Конкретно, это число должно с течением времени уменьшаться вследствие уменьшения числа оставшихся ядер  $N=N(t)$  (не распавшихся). Тогда можно аппроксимировать зависимость  $\lambda=\lambda(N)$  линейно- $\lambda=\lambda_0 N$  и среднее число распавшихся ядер  $dN$  за интервал  $dt$  определяется из уравнения  $dN=-\lambda_0 N dt$ , где  $\lambda_0$  - физическая константа, которая не зависит от  $N$ , а определяется внутренними физическими процессами (устойчивость ядер). Для некоторых видов изотопов, используемых в биологии, значения приведены в таблице 7.2 (см. приложение).

Знак "-" соответствует тому, что общее число оставшихся ядер с течением времени уменьшается, тогда

$$\frac{dN}{N} = -\lambda_0 dt \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda_0 t}$$

где  $N_0$  - число ядер в начальный момент времени  $t=0$ .

Величину  $\lambda_0$  для данного вещества можно определить различными способами. Простейший из них заключается в знании  $\lambda$  (см. выше) и  $N$  - числа нераспавшихся ядер ко времени  $t$ , тогда  $\lambda_0=\lambda/N$ . Обычно  $N$  определяют из массы навески радиопрепарата  $M$  и процентного содержания радиоактивных ядер  $C_x\%$

$$N = \frac{M \cdot C_x\%}{A \cdot 100\%} N_A$$

где  $A$  - атомная масса исследуемого элемента, а  $N_A$  - число Авогадро.

Для вещества, используемого в работе,  $M=0,12$ , ( $C_x=2\%$ ,  $A=235$ ?),  $C_x$  и  $A$  задается преподавателем.

Второй способ требует знания

$$dN(t_1) = -\lambda_0 N_0 e^{-\lambda t_1} dt \quad \text{и} \quad dN(t_2) = -\lambda_0 N_0 e^{-\lambda t_2} dt,$$

тогда

$$\frac{dN(t_1)}{dN(t_2)} = e^{\lambda(t_2-t_1)} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln dN(t_1) - \ln dN(t_2)}{t_2 - t_1}$$

Значение  $dN(t_i)$  задается преподавателем из данных предыдущих исследований, а  $dN(t_2)$  вычисляется в настоящей работе экспериментатором.

Однако, если мы имеем дело с изотопом, у которого период полураспада (время  $T$ , за которое половина ядер от исходного числа распадается, т.е.  $N(T)=N_0/2=N_0 e^{-\lambda T}$ , отсюда  $T=\ln 2/\lambda$ ) велик (например,  $U_{235}$ ), то использовать указанный метод на практике сложно ( $t_2-t_1$  очень велико!). Тем не менее, для короткоживущих изотопов он вполне применим.

В заключение заметим, что в биологии и медицине для различных целей используют различные изотопы, в основном короткоживущие (почему?). Количество таких веществ принято характеризовать не весом, а активностью (количеством превращений за единицу времени). В настоящее время приняты две единицы измерения активности:

- 1) кюри- такое количество вещества, которое испытывает в секунду  $3,7 \cdot 10^{10}$  распадов, т.е. 1 кюри =  $3,7 \cdot 10^{10}$  распад/сек (такова активность 1г. радия);
- 2) резерфорд- 1 Рд =  $10^6$  распад/сек.

Зная  $\lambda_0$  и активность препарата можно определить его количество в данный момент времени (как?).

Представленные в этой части исследования можно использовать на практике для идентификации активности изотопов, которые используются в радиологии (медицине) и как мутагенный фактор в генетике. Однако в учебных целях такую процедуру мы проводить не будем и эту часть материала каждый обучаемый изучает только теоретически.

Особенный интерес для биофизики представляют возможные механизмы взаимодействия излучения с веществом. Изучение этих механизмов - одна из базовых задач радиационной биофизики. Особые проблемы возникают при изучении взаимодействия фотонов с различными биомолекулярными комплексами. Однако эти проблемы лежат в общем контексте радиационной биофизики. Ознакомимся с ними.

Как известно, при радиоактивном распаде образуются различные продукты распада ( $\gamma$ -кванты, электроны, позитроны, нейтроны, протоны и т.д.), которые могут в дальнейшем взаимодействовать с окружающим веществом. Характер взаимодействия может быть различным (о чем мы скажем ниже), однако для

этих взаимодействий существует общий математический закон - закон взаимодействия излучения с веществом. Пусть интенсивность излучения, прошедшего через вещество, первоначально равна  $I_0$ . Будем считать, что слой вещества толщиной  $dx$  уменьшает интенсивность излучения на  $dI$  вследствие взаимодействия, т.е.

$$dI = -\mu dx,$$

где  $\mu$  - физическая константа, коэффициент поглощения веществом данного излучения, а  $I$  - интенсивность излучения, падающего на слой толщиной  $dx$ . После разделения переменных и интегрирования с выбором константы интегрирования  $I_0$ , получим следующее решение:

$$I = I_0 e^{-\mu x}.$$

Легко видеть, что при  $x=0$  у нас  $I=I_0$  (начальные условия).

Этот экспоненциальный закон поглощения хорошо описывает взаимодействие, например, рентгеновского или  $\gamma$ -излучения с веществом.

Из этой формулы можно определить толщину слоя вещества  $x$ , который ослабляет интенсивность излучения в  $n$  раз:

$$n = \frac{I_0}{I} = e^{\mu x} \Rightarrow \ln(n) = \mu x \Rightarrow x = \frac{\ln(n)}{\mu}.$$

Отсюда, зная активности препарата  $I_1$  и  $I_2$  при накрывании его пластинами толщиной  $x_1$  и  $x_2$ , можно найти коэффициент поглощения данного вещества  $\mu$ :

$$I_1 = I_0 e^{-\mu x_1}, \quad I_2 = I_0 e^{-\mu x_2}, \quad \frac{I_1}{I_2} = e^{\mu(x_2 - x_1)} \Rightarrow \mu = \frac{\ln \frac{I_1}{I_2}}{x_2 - x_1}$$

В настоящей работе ставится задача определения коэффициентов поглощения неизвестного вещества и свинца и их сравнение ( $\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2}$ ) путем

теоретического обсчета уже полученных ранее экспериментальных кривых.

Математическая зависимость  $I=I(x)$  определяет только количественные характеристики взаимодействия излучения с веществом, не объясняя качественную, физическую сторону процесса. Следует отметить, что характер взаимодействия чрезвычайно разнообразен. Это и взаимодействие  $\beta$ -излучения с электронами и ядрами атомов, приводящее к выбиванию электронов из ядер (ионизация атомов), и образование вторичного рентгеновского или светового излучения или захват электрона ядром с последующей ядерной реакцией. Однако  $\beta$ -излучение сильно поглощается веществом и защита от него несложная. Из других видов радиоизлучения особый интерес представляют потоки  $\gamma$ -квантов и нейтронов. Последние обладают большой проникающей способностью (из-за отсутствия заряда и большой массы) и взаимодействуют, в основном, с ядрами, порождая ядерные реакции (имеет место и соударения с электронами атомов, приводящие к ионизации).

Большой проникающей способностью обладают  $\gamma$ -кванты. Причем в зависимости от их энергии можно выделить три основные компоненты коэффициента поглощения  $\mu$ , это коэффициенты поглощения, обусловленные потерей энергии квантами в явлениях фотоэффекта, комптон-эффекта и образования пар, т.е.

$$\mu = \mu_{\text{фот}} + \mu_{\text{Комп}} + \mu_{\text{пар}}$$

Как известно, *фотоэффект* - это испускание электронов веществом под действием электромагнитного излучения. Свободный электрон не может поглотить фотон, так как соблюдение законов сохранения энергии и количества движения не может иметь место одновременно. Поэтому  $\gamma$ -кванты взаимодействуют с электронами в атоме, приводя к ионизации атома (выбивание электрона с орбиты), при этом затрагивается энергия ионизации или совершению работы выхода в конденсированных средах (например, в твердом теле), где энергия поглощается электронами проводимости (в металлах) или валентными электронами (в диэлектриках и полупроводниках).

В конденсированных средах может наблюдаться фотоэлектронная эмиссия (внешний фотоэффект) или внутренний фотоэффект (изменение проводимости вещества за счет образования электронов проводимости или дырок).

Для фотоэффекта справедливо соотношение Эйнштейна

$$E = h\nu - E_{\text{ип}} (E_{\text{ип}} \text{ или } A_{\text{вых}})$$

где  $E$  - кинетическая энергия фотоэлектрона,  $h\nu$  - энергия фотона,  $h$  - постоянная Планка,  $E_{\text{ип}}$  - энергия ионизации,  $A_{\text{вых}}$  - работа выхода электрона из вещества. Если  $h\nu < E$ , то фотоэффект невозможен.

Возможен также ядерный фотоэффект - поглощение  $\gamma$ -кванта атомным ядром, приводящее к перестройке последнего (так называемые ядерные реакции). Явление такого фотоэффекта наблюдается при значениях  $h\nu$  соизмеримых с атомными энергиями связи (электронов и ядер). При больших энергиях  $\gamma$ -кванта главенствующую роль играет эффект Комптона - упругое рассеяние электромагнитного излучения на свободных электронах, сопровождающееся увеличением длины волны.

Классическая электродинамика не могла объяснить увеличения  $\lambda$ , т.к. электроны среды при взаимодействии должны колебаться с частотой электромагнитной волны и давать такое же вторичное излучение. Наблюдая впервые в 1922 г. рассеянные в парафине рентгеновские лучи, американский физик А.Комптон дал следующее объяснение этому явлению. Каждый фотон обладает энергией  $h\nu = hc/\lambda$  и импульсом  $P_\gamma$ ; при упругом столкновении  $\gamma$ -кванта с покоящимся электроном, в соответствии с законом сохранения энергии и импульса, имеет место следующая векторная диаграмма (рис.76). Здесь  $\bar{P}_\gamma$  и  $\bar{P}'_\gamma$  импульсы налетающего и рассеянного фотонов,

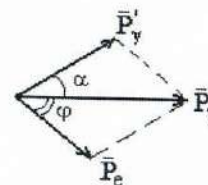


Рис.7.6.

$$\bar{p}_e = \frac{mv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

импульс электрона отдачи,  $\alpha$ - угол рассеяния фотона,  $\varphi$ - угол вылета электрона отдачи относительно направления падающего фотона.

Решение уравнения для суммарной энергии и импульса дает значение сдвига длины электромагнитной волны  $\Delta\lambda$ :

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_0(1 - \cos\alpha)$$

где  $\lambda_0 = \frac{h}{mc} = 2,426 \cdot 10^{-12} \text{ м}$ - комптоновская длина волны электрона ( $m$ - масса электрона).

Энергия электрона отдачи существенно зависит от угла  $\varphi$ , причем было получено очень хорошее опытное подтверждение теоретическим расчетам.

В реальных условиях электроны не свободны, а связаны в атомах и движутся, поэтому, если  $h\nu$  больше энергии связи электронов в атоме (рентгеновское и  $\gamma$ -излучение), то наблюдается вылет электронов отдачи из атома. В этом случае говорят о рассеянии фотонов, как на свободных электронах. В противном случае (при меньших  $h\nu$ ) фотон обменивается энергией со всем атомом, а так как масса последнего велика, то отдача практически отсутствует и фотон не изменяет свою энергию а, следовательно, и длину волны. В этом случае говорят о когерентном рассеянии  $\gamma$ -квантов.

В тяжелых атомах энергия связи периферических электронов мала, поэтому в рассеянном излучении имеются комптоновские излучения ( $\lambda' > \lambda$ ) и когерентные.

Кроме того, движение электронов в атоме приводит появлению эффекта Доплера, что накладывает дополнительные ограничения на величину  $\lambda$ . Эффект Комптона вносит основной вклад в рассеяние энергии  $\gamma$ -квантов при прохождении излучения через вещество при энергиях порядка 1-10 МэВ для тяжелых элементов (например, свинца) и в больших интервалах энергий 0,1-30 МэВ для легких элементов (алюминия).

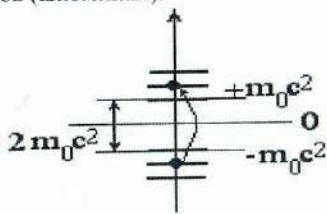


Рис. 7.7. Переход электрона с отрицательного уровня энергии на положительный (энергия перехода  $h\nu \geq m_0c^2$ )

При больших значениях энергий  $\gamma$ -квантов (свыше 10 МэВ) имеет место новый вид взаимодействия излучения с веществом-рождение пар. Теоретическое предсказание такого эффекта было впервые сделано П.Дираком. Из решения

уравнения релятивистской квантовой механики Поль Дирак получил значения энергии электрона в пределах от  $-\infty$  до  $-m_0c^2$  и от  $+m_0c^2$  до  $+\infty$  (в силу симметрии уравнений), где  $m_0$ - масса покоя электрона, а  $c$ - скорость света. В то время не были известны электроны с отрицательной энергией и Дирак предположил, что отрицательные уровни энергии полностью заполнены свободными электронами, однако обнаружить их в обычных условиях невозможно. Под действием возбуждения ( $\gamma$ -кванта с большой энергией) возможен переход электрона с отрицательного уровня энергии на положительный, при этом необходима энергия перехода  $h\nu \geq m_0c^2$ , которая превышает энергетический барьер (рис.7.7). При таком переходе в области отрицательных значений энергии обнаруживается недостаток, например, одного электрона- дырка, которая воспринимается как положительная частица-позитрон. Эта частица подобна электрону по свойствам (кроме заряда) и является его античастицей (аналогично для протона и антипротона).

Экспериментально эффект поглощения жестких  $\gamma$ -квантов вблизи ядра вещества, сопровождающийся появлением пары электрон-позитрон, наблюдался значительно позже. Следует отметить, что образовавшаяся дырка- позитрон- в области отрицательных значений энергии очень быстро ( $\tau \leq 10^{-6} \text{ с}$ ) заполняется электроном из области положительных энергий, при этом электрон и дырка аннигилируют (исчезают с образованием  $\gamma$ -квантов и последующим возбуждением атомов вещества).

В настоящее время экспериментально обнаружены очень многие античастицы, которые подтвердили теорию Дирака.

Из всего сказанного видно то многообразие видов взаимодействия излучение с веществом, приводящее, в конечном счете, к рассеянию энергии и ее поглощению. Для энергетической характеристики этого взаимодействия вводят понятие поглощенной дозы- энергии изучения, поглощенной единицей массы облучаемой среды, которая измеряется в радах. Поглощенной дозе в один рад соответствует количество поглощенной энергии в 0,01 Дж/кг.

Кроме того, существует понятия дозы облучения, которая определяется по ионизации воздуха. Для электромагнитного излучения эта доза измеряется рентгенах. Один рентген соответствует поглощению такого количества излучения, при котором образовавшееся вторичное корпускулярное излучение (электроны) производит в  $1 \text{ см}^3$  (при нормальных условиях) такое число ионов, что суммарный заряд их равен одной единице СГСЕ ( $3,3 \cdot 10^9$  Кл). Предполагается, что энергия вторичного излучения полностью идет на ионизацию. Этой дозе соответствует образование  $2,08 \cdot 10^9$  пар ионов в  $1 \text{ см}^3$  воздуха. В СИ единицей измерения экспозиционной дозы (облучение) является 1 кулон на килограмм. Между этими единицами измерения существует соотношение  $1 \text{ р} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/кг}$ . Для других видов излучений существует единица измерения- физический эквивалент рентгена - ФЭР.

При действии радиоизлучения на биологические объекты, также возникает вторичное излучение, приводящее к образованию ионов и свободных радикалов с последующим образованием перекисных соединений. Последние оказывают

неблагоприятное воздействие на биологическую клетку. Для количественной оценки дозы облучения биологических объектов вводят биологический эквивалент рентгена – БЭР. Существуют определенные нормы (санитарные нормы) дозы облучения предельно допустимые в различных производствах.

Доза облучения в 500 Р и выше считается смертельной для человека. Специалистам по эксплуатации и настройке аппаратуры, в которой используются радиоактивные излучения, необходимо знать предельно допустимые дозы облучения. Для медиков и биологов важно знать методы биологической защиты от радиации. Дело в том, что наряду с физическим методом защиты (используются вещества, сильно поглощающие РИ, в частности, Ва, В, Рb), используются вещества (антидоты), которые активно связывают перекисные соединения и выступают в качестве протекторов мембран. Таких веществ синтезировано уже значительное количество, но это все экзогенные (внешние) факторы. К эндогенным факторам следует отнести уровень витамина С в организме. Последний сильно улучшает свойства мембран и является сильным протектором не только от негативных последствий РИ, но и эффективен при заболеваниях, для задержки старения, при стрессах.

Таким образом биологическая защита от РИ (своевременно примененная) может значительно увеличить  $LD_{100}$  для млекопитающих (например человек может выдержать 1000-1500 рентген и остаться живым) и это надо учитывать при возможности действия РИ.

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО III ЭТАПУ "Получение зачета по лабораторной работе"

После выполнения контрольных заданий и самоподготовки обучаемый должен выполнить практическую часть: определить значения активности препарата при накрывании различными пластинами, построить на миллиметровой бумаге график и сделать вывод о сравнительных характеристиках активности  $N$  и  $N_c$ . Выполнив отчет по теории и практической части, обучаемый получает зачет по лабораторной работе.

Графологическая структура темы: АТОМНАЯ БИОФИЗИКА

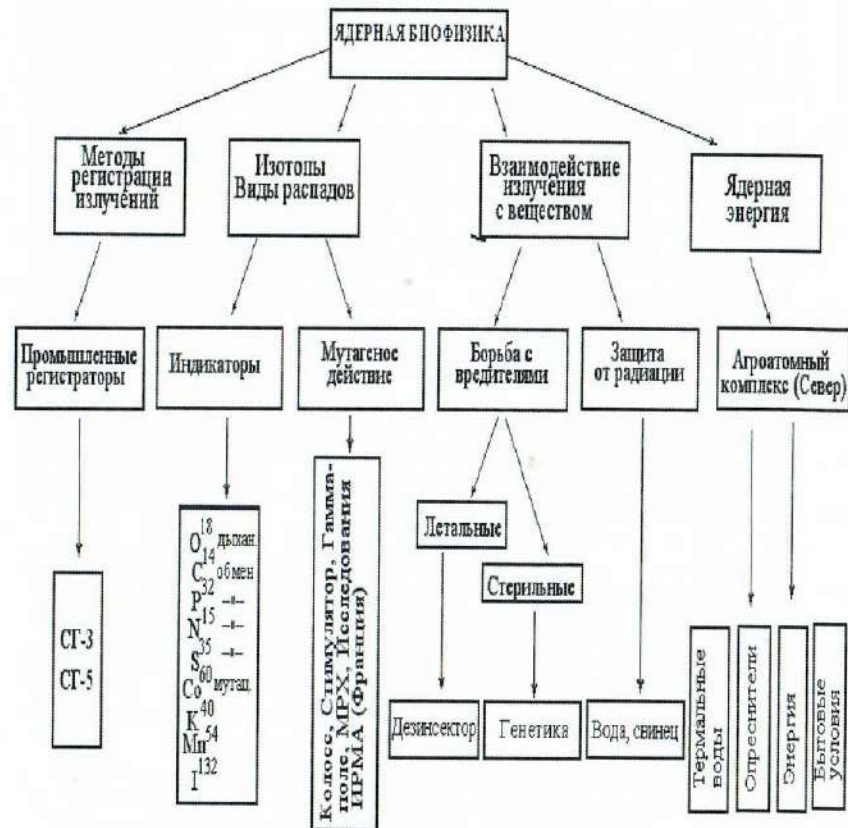


Таблица 7.2

Периоды полураспада радиоактивных изотопов

Элемент	Изотоп	Период полураспада
Галлий	${}_{31}\text{Ga}^{72}$	14,2 часа
Полоний	${}_{84}\text{Po}^{212}$	45 сек
Торий	${}_{90}\text{Th}^{232}$	$1,41 \cdot 10^{10}$ лет
Уран	${}_{92}\text{U}^{235}$	$7,13 \cdot 10^8$ лет
	${}_{92}\text{U}^{238}$	$4,51 \cdot 10^9$ лет
Нептуний	${}_{93}\text{Np}^{237}$	$2,14 \cdot 10^6$ лет
Магний	${}_{12}\text{Mg}^{27}$	10 мин
Фосфор	${}_{15}\text{P}^{32}$	14,3 суток
Кобальт	${}_{27}\text{Co}^{60}$	5,3 года
Стронций	${}_{38}\text{Sr}^{90}$	27 лет
Йод	${}_{53}\text{I}^{131}$	8 суток
Церий	${}_{58}\text{Ce}^{144}$	285 суток
Радон	${}_{86}\text{Rn}^{222}$	3,8 суток
Радий	${}_{88}\text{Ra}^{226}$	1620 лет
Актиний	${}_{89}\text{Ac}^{225}$	10 суток

Таблица 7.3  
Зависимость максимального пробега  $\beta$ -частиц  $R_\beta$  от энергии  $E_\beta$  макс.в алюминии, биологической ткани (или воде) и воздухе

Энергия $\beta$ -частиц $E_\beta$ , МэВ	Алюминий		Ткань или вода, мм	Воздух, см
	мг/см <sup>2</sup>	Мм		
0,01	0,16	0,0006	0,002	0,13
0,02	0,70	0,0026	0,008	0,52
0,03	1,50	0,0056	0,018	1,12
0,04	2,60	0,0096	0,030	1,94
0,05	3,90	0,0144	0,046	2,91
0,06	5,40	0,0200	0,063	4,03
0,07	7,10	0,0263	0,083	5,29
0,08	9,30	0,0344	0,109	6,93
0,09	11,00	0,0407	0,129	8,20
0,10	14	0,050	0,158	10,1
0,20	42	0,155	0,491	31,3
0,30	76	0,281	0,889	56,7
0,40	115	0,426	0,8	85,7
0,50	160	0,593	1,87	119
0,60	220	0,778	2,46	157
0,70	250	0,926	2,92	186
0,80	310	1,15	3,63	231
0,90	350	1,30	4,10	261
1,00	410	1,52	4,80	306
1,25	540	2,02	6,32	406
1,50	670	2,47	7,80	494
1,75	800	3,01	9,50	610
2,00	950	3,51	11,1	710
2,50	1220	4,52	14,3	910
3,00	1500	5,50	17,4	1100
3,50	1750	6,48	20,4	1300
4,00	2000	7,46	23,6	1500
4,50	2280	8,44	26,7	1700
5	2540	9,42	29,8	1900
6	3080	11,4	36,0	2300
7	3600	13,3	42,0	2700
8	4100	15,3	48,4	3100
9	4650	17,3	54,6	3500
10	5200	19,2	60,8	3900
20	10500	39,0	123	7800

Таблица 7.4

Значение коэффициента нормированных отклонений (Стьюдента)  $T_{к\beta}$ 

Число степеней свободы $k=n-1$	Доверительная вероятность $\beta$			
	0,9	0,95	0,99	0,999
1	6,31	12,7	63,66	»
2	2,92	4,3	9,93	31,60
3	2,35	3,18	5,84	12,94
4	2,13	2,78	4,60	8,61
5	2,02	2,57	4,03	6,86
6	1,94	2,45	3,71	5,96
7	1,90	2,37	3,50	5,41
8	1,86	2,31	3,36	5,04
9	1,83	2,26	3,25	4,78
10	1,81	2,23	3,17	4,59
11	1,80	2,20	3,11	4,44
12	1,78	2,18	3,06	4,32
13	1,77	2,16	3,01	4,22
14	1,76	2,15	2,98	4,14
15	1,75	2,13	2,95	4,07
16	1,75	2,12	2,92	4,02
17	1,74	2,11	2,90	3,97
18	1,73	2,10	2,88	3,92
19	1,73	2,09	2,86	3,88
20	1,73	2,09	2,85	3,85
21	1,72	2,08	2,83	3,82
22	1,72	2,07	2,82	3,79
23	1,71	2,07	2,81	3,77
24	1,71	2,06	2,80	3,75
25	1,71	2,06	2,79	3,73
26	1,71	2,06	2,78	3,71
27	1,70	2,05	2,77	3,69
28	1,70	2,05	2,76	3,67
29	1,70	2,05	2,76	3,66
30	1,70	2,04	2,75	3,65
31	1,64	1,96	2,68	3,29

*Лабораторная работа № 8*  
**БИОФИЗИКА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ В АСПЕКТЕ**  
**ТЕОРИИ ХАОСА-САМООРГАНИЗАЦИИ**

**Цель работы.**

В рамках третьей парадигмы и теории хаоса-самоорганизации представить основные методические и методологические направления в исследованиях и описании сложных биофизических систем.

**Обучаемый должен знать:**

1. Три основных метода идентификации параметров порядка для БДС.
2. Различия между детерминистским, стохастическим и хаотическими подходами в изучении биосистем.

**Обучаемый должен уметь:**

1. Рассчитывать вручную параметры квазиаттракторов.
2. Работать с новыми методами компьютерного моделирования биологических динамических систем (БДС)

**Практическое значение**

Теория хаоса и синергетики (ТХС) – новое (третье) направление в изучении биосистем разного уровня. Это наиболее правомерный и обоснованный подход – закономерное развитие естествознания на современном этапе. Знание сущности этих новых биофизических методов, их возможностей, умение применять их на практике, необходимо любому биологу или экологу. Особенно это касается Югории, где экофакторы имеют выраженный хаотический характер в динамике своего поведения.

**Бюджет времени**

На изучение темы отводится 7 часов. Из них 2 часа- лекции, 2 часа- лабораторные занятия и 3 часа- на самоподготовку.

**Литература**

1. Еськов В.М., Хадарцев А.А., Еськов В.В., Гавриленко Т.В., Филатов М.А. Complexity – особый тип биомедицинских и социальных систем //Вестник новых медицинских технологий – 2013 – Т. XX, №1 – с.17 – 22.
2. Диверсификация результатов научных открытий в медицине и биологии Том III. / Хадарцев А.А., Еськов В.М., Несмеянов А.А., Гонтарева С.Н. и др. – Тула: Изд-во ТулГУ – Белгород: Белгородская областная типография, 2012. – 186 с.
3. Диверсификация результатов научных открытий в медицине и биологии Том IV. / Еськов В.М., Хадарцев А.А., Морозов В.Н., Несмеянов А.А. и др. – Тула: Изд-во ТулГУ – Белгород: Белгородская областная типография, 2012. – 160 с.
4. Системный анализ, управление и обработка информации в биологии и медицине. Часть X. Динамика поведения вектора состояния организма жителей Югры в условиях нормы и патологии. / Под ред. – 2011. В.М.



Еськова, А.А. Хадарцева, Самара: Изд-во ООО «Офорт» (гриф РАН), 2012. – 186 с.

- Eskov V.M., Khadartsev A.A., Eskov V.V., Filatova O.E., Filatova D.U. Chaotic approach in biomedicine: Individualized medical treatment. // J. Biomedical Science and Engineering, 2013. – VI. 6, - P. 847-853.
- Сложность. Разум. Постнеклассика. <http://cmp.esrae.ru/issue/>

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО 1- МУ ЭТАПУ "Самоподготовка"

##### Цель этапа.

- В чем отличие подхода ТХС от детерминистского и стохастического?
- Что общего между детерминистским и хаотическим подходом?
- Охарактеризуйте понятия: параметры порядка (ПП), русла, области джокеров, джокеры и точки катастроф (ТК).
- Как в компартментно – кластерном подходе определяются параметры порядка и точки катастроф?
- Как используются нейросети для идентификации ПП?
- Что такое аттрактор (квазиаттрактор) и как находятся его параметры (какие именно Вы знаете)?
- Что такое фазовое пространство (ФП) и как находится его минимальная размерность?

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО 2- МУ ЭТАПУ Выполнение лабораторной работы

##### Цель этапа.

1. Выполнить статистическую обработка данных при помощи программных пакетов - «Excel MS Office-2003» и «Statistica 6.1». Соответствие структуры данных закону нормального распределения нужно оценивать на основе вычисления критерия Шапиро-Уилка (для выборок  $n < 50$ ) и критерия Лиллиефорса (для выборок  $n > 50$ ). Если полученные результаты не описываются законом нормального распределения, дальнейшие исследования искомым зависимостей нужно производить методами непараметрической статистики. Например, для выявления различий между конкретными группами (парное сравнение групп) необходимо выполнить при помощи непараметрического критерия Вилкоксона с поправкой Бонферрони (для оценки справедливости нулевой гипотезы).

2. Для выполнения второй части этапа ознакомьтесь с блоком информации и программой на ЭВМ ("Clusters") для расчета параметров квазиаттракторов. Вам предлагается несколько массивов с различной размерностью  $m$ . Например, в случае с  $m=3$  введите блок данных в 3-х мерное фазовое пространство (например, X1 – температура, X2 – атмосферное давление, X3 – частота обращаемости населения по поводу артериальной гипертензии) и получите

данные квазиаттракторов на ЭВМ для января и марта, а также июля и октября. Сравните значения общего объема параллелепипеда (ограничивающего квазиаттрактор), значения  $Z_s, \theta$  для этих месяцев и сделайте вывод о различиях.

#### Блок информации

**Простейшая схема измерений полной определенности, неполной определенности, полной неопределенности.** Когда мы говорим об определенности или неопределенности в динамике поведения сложных биосистем, то мы обычно обсуждаем ближайшее или отдаленное будущее БДС. В рамках ДСП обычно считается, что начальное состояние системы строго определено (с него начинается..., отсчет динамики), т.е.  $x(t_0)$  при  $t=t_0$  известно, а вот дальнейшее поведение биосистемы (промежуточные состояния  $x_i(t)$  при  $t < t_m$ , где  $t_m$  – конечное время наблюдения системы, конечная ее эволюция и само конечное состояние  $x(t_m)$  в детерминизме определяется строго (решается задача Коши), а в стохастике промежуточные состояния могут не определяться точно (обозначим такие состояния знаком «±»), где «+» соответствует полной определенности, а «-» полной неопределенности), а конечное состояние БДС в стохастике не определено (обозначим  $x(t_m)$  как «-»).

Таблица 8.1

Принципиальные и фундаментальные различия между детерминистским, стохастическим и синергетическим подходами

	Начальное состояние	Промежуточное состояние	Конечное состояние
	$X(t_0)$	$X(t)$	$X(t_k)$
Deterministic	+	+	+
Stochastic	+	±	-
Chaos (Пригожин И.Р.)	+	-	-
Chaos (Хакен Г.)	±	-	-
Chaos (Еськов В.М.)	-	-	-

Однако в последние годы в США говорят о «Probability indefiniteness», имея в виду, что состояние не задано, но известна функция распределения  $F(x)$  или дифференциальный закон  $f(x)$ . Последнее означает, что уже кем-то такой процесс изучался, но для данного случая (опыта) конец неизвестен (он попадает в закон распределения, известный из предыдущих опытов). Такая «частичная» определенность подразумевает такую информацию о начальном состоянии и о многократном (ранее) повторении подобных процессов. Таким образом, для детерминистских процессов мы имеем полную определенность (и знак «+» в табл. 8.1) начального состояния  $x(t_0)$ , всех промежуточных состояний  $x_i(t)$  и конечного состояния ( $x(t_m)$ ). Для стохастики имеем полную определенность  $x(t_0)$ , т.к. все стохастические процессы повторяемые или воспроизводимые, «частичную» определенность  $x_i(t)$  со знаком «±» и неопределенность (но не полную, а вероятностную) конечного состояния ( $x(t_m)$ ).

Оба типа процессов (объектов) должны в ДСП исходно ( $x(t_0)$ ), быть

определены (это требование повторяемости и воспроизводимости любого ДСП-процесса, что является стандартным требованием научности любого знания. Однако, в природе имеется огромный класс систем (в первую очередь это БДС, политические и социальные системы), которые имеют совершенно иной тип неопределенности.

#### Что можно измерять в ТХС и как такие величины интерпретировать?

Основу измерений в ТХС составляет измерение микрохаоса движения ВСС в ФПС. Параметры квазиаттракторов движения ВСС дают представление о тонкой структуре поведения БДС в ФПС. Такой подход подобен радикальным изменениям представлений о строении вещества и в физике начала 20-го века, когда мы перешли от шарика-электрона к его неопределенности состояния (координаты, импульса по соотношению неопределенности Гейзенберга, к волновой функции и т.д.). Теперь эту роль выполняют квазиаттракторы поведения ВСС в ФПС и их параметры информационно значимы. Эти параметры учитывают мерцание ВСС и возможность выхода за пределы 3-х сигм, они показывают тенденцию развития БДС, дают почву для прогноза конечного состояния БДС.

Сразу отметим, что в рамках ТХС можно работать как с отдельными элементами (человеком, как сложной системой), так и с группами элементов (группами людей с приблизительно одинаковыми нозологическими единицами, одинаковым возрастом, одинаковыми условиями работы, одинаковыми приблизительно физическими нагрузками (в спорте), одинаковыми психофизиологическими состояниями). В последнем случае надо четко определиться с некоторыми общими параметрами внешней среды (если они задают ВУВы) или внутренними свойствами элементов, если они образуют некоторую систему. Именно такие группы можно и сравнивать в рамках ТХС до воздействия ВУВов (в том числе и до заболевания) и после воздействия ВУВов. Аналогично речь может идти и о существенных внутренних перестройках в динамике поведения ВСС (пубертатный период, возрастные изменения и т.д.).

Все это сейчас активно исследуется в Сургуте и Туле в рамках ТХС. Для характеристики состояния ФСО человека существует набор координат  $x_i$  ВСОЧ. Из этих параметров с помощью алгоритма выбирались параметры порядка (ПП) и находились руслу. Исследование параметров проводится с помощью авторской программы «Identity». Исследование поведения квазиаттракторов в  $m$ -мерном фазовом пространстве позволяет анализировать динамику движения квазиаттракторов в выбранных фазовых пространствах.

Данный метод позволяет осуществить ранжирование (принцип нейро-ЭВМ) параметров различных кластеров, представляющих биологические динамические системы (БДС). К этим кластерам могут относиться одни и те же БДС, но находящиеся в разных состояниях или в разные сезоны года (например, весенний и зимний периоды).

Алгоритм выполнения процедуры основывается на следующих шагах:

Исходно в программу расчета на ЭВМ поочередно вводятся исходные компоненты ВСОЧ в виде матриц  $A$  биосистемы по каждому из  $k$  кластеров

(всего таких матриц  $P$ ). Данные могут вводиться вручную либо из текстового файла; получаем матрицу состояний для всех  $p$  кластеров в  $m$ -мерном фазовом пространстве, причем  $i$ - бегущий индекс компонента вектора  $x$  ( $i=1, \dots, m$ ), а  $j$ - номер биообъекта (испытуемого) ( $j=1, \dots, n$ ),  $k$ - бегущий индекс кластера  $k$  определяет число массивов (групп испытуемых) данных ( $k=1, \dots, p$ ), т.е. элемент такой ( $A$ ) матрицы  $a_{ij}^k$  представляет  $k$ -й кластер биосистем,  $i$ -й компонент ВСОЧ для  $j$ -го испытуемого.

Далее, производится поочередный расчет координат граней параллелепипеда объемом  $V_G$ , внутри которого находится квазиаттрактор движения ВСОЧ для всех  $j$ -х исследуемых ( $j=1, \dots, n$ ) из  $k$ -го кластера ( $k=1, \dots, p$ ); их длины  $D_i^k = x_{i(\max)} - x_{i(\min)}$ , и объема  $k$ -го параллелепипеда  $V_G^k = \prod_{i=1}^m D_i^k$ , где  $x_{i(\min)}, x_{i(\max)}$  - координаты крайних точек, совпадающих с нижней и верхней (левой и правой) границей области ФПС, внутри которой движется ВСОЧ по координате  $x_i$ . В итоге ЭВМ рассчитывает весь вектор объемов квазиаттракторов (General Value)  $V = (V_0, V_1, \dots, V_p)^T$ , ограничивающих все  $p$  квазиаттракторов, а также показатели асимметрии (Asymmetry) стохастического  $X_i^S = \alpha_{11}^S x_{12}^S \dots x_{im}^S$  и хаотического центров квазиаттракторов  $X_i^C = \alpha_{11}^C x_{12}^C \dots x_{im}^C$  для каждого  $k$ -го массива данных  $X_i^C = \alpha_{11}^C x_{12}^C \dots x_{im}^C$  и  $X_i^S = \alpha_{p1}^S x_{p2}^S \dots x_{pm}^S$ .

Отметим, что  $x_{ko}^S = \sum_{j=1}^n x_{kj} / n$  - формула для идентификации стохастического центра квазиаттрактора, который находится путем вычисления среднего арифметического одноименных (по номеру кластера - массива  $k$  и координате  $i$  ФПС) координат  $j$  точек ( $i$ -й номер обследуемого учащегося), представляющих проекции конца вектора состояния БДС на каждую из координатных осей  $i$ . Мы определили, что для любых кластеров  $x_{ij}^C = x_{i(\min)} + D_i^k / 2$  - формула для идентификации хаотического центра аттракторов,  $D_i^k$  - ширина фазовой области  $k$ -го квазиаттрактора, для  $k$ -го массива данных, в проекции на  $i$ -ую координату, т.е. ширина грани  $m$ -мерного параллелепипеда.

Затем вводили параметр  $R$ , показывающий степень изменения объема квазиаттракторов для  $k$ -го кластера данных до и после уменьшения размерности фазового пространства. В исходном приближении вычисляем  $R_0 = (V_0^1 - V_0^2) / V_0^1$ .

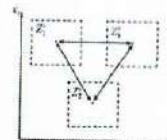
После исключения поочередно каждой из  $i$  координат вектора  $X$  (например, для двухкластерных систем) вычисляются вторые приближения параметров  $R_i = (V_i^1 - V_i^2) / V_i^1$ . Таким образом, получаем вектор  $R = (R_0, \dots, R_m)^T$ , т.е. вектор значений, по которым можно определить уменьшилась или увеличилась относительная величина квазиаттракторов  $V$  при изменении размерности фазового пространства. При уменьшении относительных размеров  $V$ , анализируются параметры системы и на основе их неизменности или малой изменчивости делается заключение о существенной (если параметры существенно меняются) или несущественной (параметры почти неизменны)

значимости конкретного, каждого  $x_i$  компонента ВСОЧ для всего вектора  $X_j^k = (x_1, x_2, \dots, x_m)^T$ , т.е. для  $j$ -го испытуемых из  $k$ -го массива данных.

Метод расчета матриц межаттракторных расстояний заключается в том (схематично представлен на рис. 8.1), что анализ лечебных или физкультурных воздействий нескольких видов (типов) проводят в отношении групп испытуемых (пациентов), находящихся в приблизительно одинаковых условиях по состоянию функций организма (например, группы людей с одинаковыми нозологическими единицами) и регистрируют параметры функций организма каждого человека из группы до воздействия и после воздействия. Эти параметры образуют наборы (компарменты) диагностических признаков в пределах одной фазовой координаты  $x_i$  — из набора всех координат  $m$ -мерного фазового пространства с одинаковыми диагностическими характеристиками, а каждый человек со своим набором признаков (компоненты вектора состояния организма данного человека — ВСОЧ) задается точкой в этом фазовом пространстве состояний так, что группа испытуемых образует некоторое “облако” (квазиаттрактор) в фазовом пространстве состояний, а разные группы (из-за разных воздействий на них) образуют разные “облака” — квазиаттракторы в ФПС. Каждая группа обследуемых на  $i$ -ой оси  $x_i$  имеет свою совокупность точек, из которой выделяются крайние левые координаты ( $x_{i, \min}^k$ ) и крайние правые координаты ( $x_{i, \max}^k$ ), разность этих величин ( $x_{i, \max}^k - x_{i, \min}^k = D_i^k$ ) образует отрезок в ФПС, а совокупность для  $k$ -ой группы обследуемых пациентов всех отрезков (граней) в  $m$ -мерном фазовом пространстве образует  $m$ -мерный параллелепипед, который представляет в ФПС определенный квазиаттрактор, внутри которого движется ВСОЧ (всех обследуемых, составляющих определенную группу или на которых действуют определенным типом воздействия (вид лекарства, вид спорта и т.д.)). Каждый такой квазиаттрактор имеет свои параметры: объем  $k$ -го квазиаттрактора  $V_g^k = \prod_{i=1}^m D_i^k$ , хаотический центр  $k$ -го квазиаттрактора с координатами в виде вектора  $X_c^k = (x_{1c}^k, x_{2c}^k, \dots, x_{mc}^k)^T$ , где  $x_{ic}^k = \frac{(x_{i, \max}^k + x_{i, \min}^k)}{2}$ , и имеются координаты стохастического центра  $x_{is}^k = \sum_{j=1}^n \frac{x_{ij}^k}{m}$ , где  $x_{ij}^k$  — значение величины диагностического признака для  $j$ -го пациента по  $i$ -ой координате из кластера  $k$  обследуемых групп, что определяет их положение в ФПС. Расстояния между центрами хаотических (или стохастических) квазиаттракторов (между  $k$ -м и  $f$ -м квазиаттракторами в ФПС) рассчитываются по формуле  $z_{kf}^c = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ic}^k - x_{ic}^f)^2}$ , т.е. берется разность между соответствующими координатами хаотического центра  $k$ -го квазиаттрактора ( $x_{ic}^k$ ) и  $f$ -го квазиаттрактора ( $x_{ic}^f$ ), возводится в квадрат, суммируется по всем  $i$ -м и из полученной суммы извлекается квадратный корень. Аналогично считаются и расстояния между статистическими центрами (статистическими

математическими ожиданиями  $x_{ic}^k$  и  $x_{ic}^f$ ), т.е.  $z_{kf}^s = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{is}^k - x_{is}^f)^2}$ . Полученные расстояния  $z_{kf}^c$  между центрами  $k$ -го и  $f$ -го квазиаттракторов или статистическими центрами ( $z_{kf}^s$  статистическими математическими ожиданиями) количественно представляют степень близости (или, наоборот, удаленности) этих 2-х сравниваемых квазиаттракторов в фазовом пространстве состояний.

### Метод расчета матриц межаттракторных расстояний



Кластеры описываются вектором состояния организма человека (ВСОЧ).

$$X^k = (x_1^k, x_2^k, \dots, x_m^k), i = 1, 2, \dots, m,$$

где  $k$  — индекс кластеров.

$$Z^c = \{z_{kq}^c\}_{k,q=1,\dots,p}, \quad (5)$$

$$Z^s = \{z_{kq}^s\}_{k,q=1,\dots,p}, \quad (6)$$

$$z_{kq}^c = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ic}^k - x_{ic}^q)^2},$$

$$z_{kq}^s = \sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{is}^k - x_{is}^q)^2},$$

где  $k, q$  — индексы кластеров.

где  $k, q$  — индексы кластеров.

Рис. 8.1 Расчет расстояний между центрами статистических  $X_s$  и геометрических  $X_c$  квазиаттракторов в фазовом пространстве состояний биосистем

Далее, поочередно исключают каждый диагностический признак  $x_i$  из всего набора  $m$  признаков и регистрируют изменение объемов  $V_g$  квазиаттракторов (до и после исключения), а также расстояний между центрами квазиаттракторов ( $z_{kf}^c$  и  $z_{kf}^s$  (до и после исключения)). Те  $x_i$ , у которых  $V_g$  и  $z_{kf}$  изменяются наиболее значимо считают параметрами порядка. Вычисленные  $x_i$  при максимальных различиях в расстояниях между хаотическими или стохастическими центрами квазиаттракторов  $z_{kf}$  движения вектора состояния разных групп испытуемых (до и после определенного воздействия), а также максимальные изменения  $V_g$  при исключении  $x_i$ , используются в качестве значимых диагностических признаков для оценки состояния организма человека.

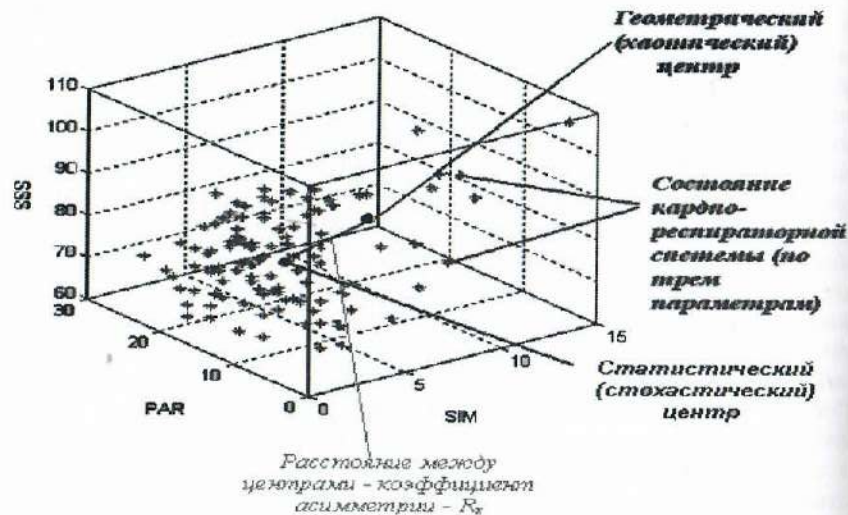


Рис. 8.2. Пример поведения вектора состояния (параметры вегетативного статуса) организма человека в трехмерном фазовом пространстве состояний

Отметим, что ТХС можно использовать и как абсолютные измерения и как относительные, что существенно ее отличает от традиционных подходов (например, определения энтропии по Шеннону, метод расхождения Кулбака-Лейблера (Kullback-Leibler divergence). В последнем случае также строятся матрицы (в нашем случае с ТХС находятся матрицы межаттракторных расстояний  $Z_{ij}$ ), которые дают количественную оценку величины смещения центров квазиаттракторов в ФПС в условиях различных воздействий.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО III ЭТАПУ:

“Получение зачета по лабораторной работе”

Перед выполнением работы обучающийся должен изучить все методические указания, ответить на вопросы из раздела “Самоподготовка”.

После выполнения III этапа необходимо оформить протокол работы и подписать у преподавателя, а затем приступить к оформлению работы в тетради.

Работа считается выполненной после сдачи преподавателю отчета по теоретическому и практическому разделам работы.

#### Знаете ли вы, что....

Перед тем как описывать количественные данные, всегда следует проводить проверку распределения. Под видом распределения понимают функцию, связывающую значения переменной случайной величины с вероятностью их появления в совокупности. В биомедицинских исследованиях чаще всего проводится «проверка распределения на нормальность». Под нормальным распределением понимают симметричное распределение колоколообразной формы, при котором около 68 % данных отличается от среднего арифметического не более чем на одно, а примерно 95 % – не более чем на два стандартных отклонения в каждую сторону. Несмотря на то, что нормальное (Гауссова) распределение встречается очень часто и играет важную роль в статистике, существуют и другие распределения данных (биномиальное, Пуассона, Максвелла, Шарлье, и др.), о которых можно прочитать в специальной литературе. Проверка распределения производится тремя способами: с помощью описательной статистики, графически и с использованием статистических критериев.

При нормальном распределении, которое симметрично, значения медианы и среднего арифметического будут одинаковы, а значения асимметрии и эксцесса равны нулю. Если средняя арифметическая больше медианы, а коэффициент асимметрии  $> 0$ , то распределение имеет правостороннюю асимметрию (скошено вправо). При левосторонней асимметрии средняя арифметическая меньше медианы, а коэффициент асимметрии  $< 0$ . По величине коэффициента эксцесса говорят об островеином ( $Kurtosis > 0$ ) или плосковершинном ( $Kurtosis < 0$ ) распределении. Однако ситуаций, когда

средняя арифметическая равна медиане, а коэффициенты асимметрии и эксцесса равны нулю, практически не встречается, поэтому необходимо решить, какие отклонения от идеального сценария допустимы для того, чтобы считать распределение полученных данных нормальным или близким к нормальному.

Для такой проверки существуют графические методы и статистические критерии. SPSS проводит проверку распределения с помощью критериев Shapiro-Wilk (для небольших выборок) и Kolmogorov-Smirnov с поправкой Lilliefors (для больших выборок). В различных версиях SPSS существуют различные алгоритмы по поводу того, какую выборку считать большой. Версия 14 по умолчанию представляет результаты критерия Shapiro-Wilk для выборок объемом до 5 000 наблюдений, хотя обычно этот критерий применяется для проверки распределения в значительно меньших выборках (до 50 наблюдений). При применении вышеупомянутых критериев за нулевую гипотезу принимается гипотеза о том, что изучаемое распределение не отличается от нормального, значит, если достигнутый уровень значимости при проверке гипотезы будет меньше, чем критический уровень значимости ( $p$ , обычно 0,05), обозначаемый SPSS как Sig. (от англ. significance), то нулевая гипотеза о сходстве распределений отвергается, значит, распределение отличается от нормального. Соответственно, если  $p > 0,05$ , то распределение не отличается от нормального [Унеурьян Т.Н., Гржибовский А.М. Краткие рекомендации по описанию, статистическому анализу и представлению данных в научных публикациях // Экология человека. – 2011. – № 5. – С. 55-60,].

Оглавление

	Стр.
1. Стохастический и хаотический подходы в изучении биомеханических систем	3
1.1 Изучение регуляции работы мышц при произвольных движениях. Регистрация механограмм, амплитудно-частотных характеристик и функций распределения $f(x)$ для фазовых координат $x_1, x_2, x_3$	3
1.2 Биомеханика с позиций теории хаоса-самоорганизации: теппинг, как произвольная произвольность (хаос в любом произвольном движении)	12
2. Термодинамический подход в изучении биосистем. Энтропия и информация в биосистемах	25
3. Элементы электродинамики биосистем	36
3.1 Определение емкости конденсаторов. Емкостные свойства биомембран	36
3.2 Регистрация биопотенциалов. Потенциалы покоя	45
3.3 Биоэлектрическая активность формального нейрона	55
4. Искусственные нейронные сети и нейрокомпьютеры	62
5. Рецепторы как биоэлектрические датчики. Измерение латентных периодов сенсомоторных реакций	86
6. Действие света на биосистемы. Процессы фотосинтеза зеленых растений	94
7. Физика и биофизика излучений. Эффекты действия ионизирующих излучений на биосистемы	105
8. Биофизика сложных систем в аспекте теории хаоса-самоорганизации	125

Еськов Валерий Валерьевич,  
Козлова Виктория Викторовна,  
Панов Юрий Михайлович,  
Филатов Михаил Александрович.

**ФИЗИЧЕСКИЕ И БИОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ  
БИОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

Учебное пособие для аспирантов и магистров биологического и  
экологического направлений подготовки

Подписано к печати 03.05.2017.  
Бумага офсетная. Формат 60x84 1/16. Гарнитура Times New Roman.  
Печать оперативная. Усл.печ. 7,85. Тираж 200 экз. Заказ № 3061

Издательство ООО «Порто-принт»:  
443041, г. Самара, ул. Садовая, 156.  
Тел.: (846) 277-17-25

Отпечатано в типографии:  
ООО «Порто-принт»