

**ВЕСТНИК МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
УНИВЕРСИТЕТА ЛЕСА**

**ЛЕСНОЙ ВЕСТНИК**

**СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК**

**I МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«СЛАБЫЕ И СИЛЬНЫЕ ПОЛЯ И ИЗЛУЧЕНИЯ»  
Часть 1**

Научно-информационный журнал

2005 г. № 4(40)

Координационный совет журнала

Главный редактор  
Зам. главного редактора

А.Н. ОБЛИВИН  
В.Д. НИКИШОВ

Члены совета

Н.И. КОЖУХОВ  
О.Н. НОВОСЕЛОВ  
А.К. РЕДЬКИН  
Е.И. МАЙОРОВА  
О.А. ХАРИН  
В.С. ШАЛАЕВ  
А.С. ЩЕРБАКОВ  
С.Н. РЫКУНИН

Ответственный секретарь

Е.А. РАСЕВА



Номер подготовили:

Ответственный секретарь  
Редактор

Е.А. РАСЕВА  
Т.Г. КРАПОТИНА

Набор и верстка

М.А. ЗВЕРЕВ

Оригинал-макет подготовлен в редакторе Microsoft Word 2000.

Журнал зарегистрирован Министерством РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации журнала «Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник» ПИ № 77-12923 от 17.06.2002.

Перепечатка и воспроизведение полностью или частично текстов и фотографий журнала «Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник» – только с письменного разрешения издательства.

© Московский государственный университет леса, 2005

---

Подписано к печати 24.06.2005.  
Объем 19 п. л.

Тираж 500 экз.  
Заказ №

---

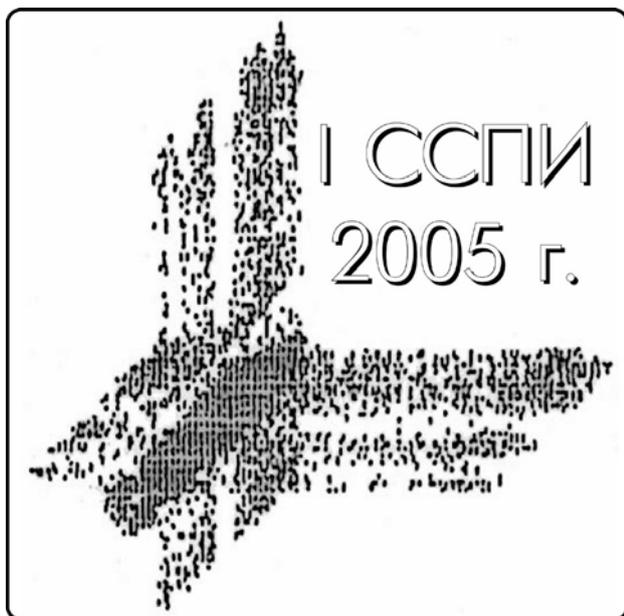
Издательство Московского государственного университета леса.  
141005, Мытищи-5, Московская обл., 1-я Институтская, 1, МГУЛ.  
Телефоны: (095) 588-57-62, 588-53-48, 588-54-15, факс (095) 588-51-09

## СОДЕРЖАНИЕ

Садовничий В.А., Александров В.В., Лебедев А.В., Лемак С.С., Поздняков С.С., Розгачева И.К.	<i>Максиминное тестирование качества визуального управления устройством спасения космонавта</i>	6
Розгачева И.К., Кувшинова И.Б.	<i>Топология Вселенной и калибровочная инвариантность электродинамики</i>	11
Гончаренко А.И., Коноплев А.О.	<i>Фрактальная структура межгалактической среды в скоплениях галактик</i>	14
Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Сигаева Е.А.	<i>Сопряженные связи сердца</i>	21
Корольков А.В., Сапожников В.Б.	<i>Применение вейвлет-анализа для поиска скоплений галактик по данным каталога 2DFRGS</i>	29
Натяганов В.Л.	<i>Связь вариаций потока тепловых нейтронов вблизи земной коры с геодинамикой и процессами в космическом пространстве</i>	39
Гончаренко А.И., Гончаренко С.А.	<i>Имитационная модель изменения формы газового пузыря в жидкости в условиях реального космического полета</i>	51
Короткина М.Р., Бурлаков А.Б.	<i>Неординарные явления атмосферного электричества</i>	53
Короткина М.Р.	<i>Кавитационная гемодинамика</i>	63
Воейков В.Л., Чалкин С.Ф., Асфарамов Р.Р.	<i>Биоторсионные поля</i>	74
Сизов А.Д.	<i>Дискретность пространства и времени</i>	79
Колесниченко А.В., Колесниченко И.П.	<i>Инициирование свечения влажного воздуха УФ-фотонами</i>	88
Бурков В.Д., Крапивин В.Ф.	<i>Некоторые аспекты космофизических корреляций</i>	94
Головачев С.П., Крапивин В.Ф., Чухланцев А.А., Шутко А.М.	<i>Нейронные сети</i>	107
Ступаченко Е.В.	<i>ГИМС-технология в мониторинге растительных покровов</i>	117
Овсянникова Е.Ю.	<i>Основанный на ГИМС-технологии метод микроволнового мониторинга растительности</i>	122
	<i>О свойствах кодирования на основе турбопроизведений</i>	127
	<i>Свойства регистров сдвига с двумя обратными связями</i>	138

## I МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «СЛАБЫЕ И СИЛЬНЫЕ ПОЛЯ ИЗЛУЧЕНИЯ»

4–6 июля 2005 года, ЦУП, г. Королев



**И**сполнилось 250 лет МГУ. Это событие торжественно отмечалось 25 января 2005 года.

Более 75 выпускников МГУ на протяжении многих лет работают в МГУЛ на кафедрах математики, физики, прикладной математики, почвоведения, селекции, геодезии, химии. Многолетняя история связывает судьбы МГУ и МГУЛ: на кафедре высшей математики работал Н.Н. Лузин, на кафедре физики – А.Ф. Иоффе, кафедрой высшей математики заведовал Н.В. Ефимов, в разное время работали О.Ю. Шмидт, С.А. Чаплыгин. Этим историческим событиям посвящен специальный выпуск «Вестника МГУЛ – Лесной вестник» (№ 3, 2005 г.).

В 1996 году был организован и под руководством ректора МГУ Виктора Антоновича Садовниченко регулярно проводится научно-исследовательский семинар «Время,

хаос и математическое моделирование», основной целью которого является образование научных коллективов междисциплинарных областей и привлечение к этой работе молодых ученых.

В работе семинара участвуют ведущие российские ученые. Основной целью семинара также является развитие научных направлений в междисциплинарных областях, образование совместных научных коллективов между различными факультетами, привлечение студентов и аспирантов к активной работе в современных фундаментальных и прикладных областях науки всех возможных направлений.

Труды семинара регулярно издаются Институтом математических исследований.

В Институте Математических исследований сложных систем (ИМИСС) МГУ под руководством директора – ректора МГУ академика РАН В.А. Садовниченко работают известные в России и за ее пределами ученые: акад. С.В. Емельянов, акад. В.А. Ильин, Е.Н. Моисеев, С.К. Коровин, проф. И. Антониу (Бельгия) и другие.

Основной областью исследований, проводимых в ИМИСС МГУ в тесном сотрудничестве с институтом имени Сольвея (Брюссель) и рядом других европейских научных центров, является развитие идей проф. И.Р. Пригожина по созданию теории неравновесных систем.

Ведется разработка математического аппарата (спектральная теория операторов для описания динамики сложных систем). Кроме того, проводятся работы по созданию эффективных методов распознавания образов и процессов управления нелинейными динамическими системами. Ведутся ис-

следования по применению математических методов управления и контроля сложных систем в биологии (совместно с CIAM /Мексика/).

Аналогичное направление научных исследований проводится в МГУЛ. С 4 по 6 июля 2005 года в ЦУПе (г. Королев) пройдет I Международная конференция «Слабые и сильные поля и излучения». Инициаторами ее проведения являются кафедра физики (зав. кафедрой проф. В.Н. Харченко) и кафедра проектирования и технологии производства приборов (зав. кафедрой В.Д. Бурков).

МГУЛ планирует проводить конференции регулярно каждые два года с привлечением специалистов из МГУ и других вузов.

Вниманию читателей предлагается первый из номеров журнала, содержащий материалы докладов I Международной конференции «Слабые и сильные поля и излучения».

#### **Организаторы конференции**

- Российская академия наук
- Российская академия естественных наук
- Московский государственный университет  
(факультеты: механико-математический, физический, биологический, управления, мировой политики).
- Институт математических исследований сложных систем МГУ
- ГАИШ МГУ
- ВМК МГУ
- Институт механики МГУ
- Научно – исследовательский институт ядерной физики МГУ

- Московский государственный университет леса.
- Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН
- Международный институт биофизики (Германия)
- Институт радиотехники и электроники РАН.
- Институт компьютерных исследований.
- Институт органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН
- Московский педагогический государственный университет
- Институт стали и сплавов
- ИМАШ РАН
- Российское космическое агентство, Москва
- ФГУП НИИ прецизионного приборостроения
- Центр управления полетами
- ОАО НПП «Звезда»
- ГНИИ ВМ МО РФ
- РГНИИЦПК им Ю.А. Гагарина

#### **Секции**

1. Новые достижения астрофизики
2. Астробиология
3. Космическая медицина
4. Новые направления биотехнологии
5. Современные приборы и методы исследования слабых и сильных полей и излучений

Оргкомитет  
I Международной конференции  
«Слабые и сильные поля излучения»

## МАКСИМИННОЕ ТЕСТИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВИЗУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВОМ СПАСЕНИЯ КОСМОНАВТА

В.А. САДОВНИЧИЙ, МГУ им. М.В. Ломоносова,  
 В.В. АЛЕКСАНДРОВ, МГУ им. М.В. Ломоносова,  
 А.В. ЛЕБЕДЕВ, МГУ им. М.В. Ломоносова,  
 С.С. ЛЕМАК, МГУ им. М.В. Ломоносова,  
 С.С. ПОЗДНЯКОВ, ОАО НПП «Звезда»

Задача управления устройством спасения космонавта (УСК) осуществляется в экстремальных условиях космического полета и отличается высокой ценой риска в случае ошибок при управлении устройством. Поэтому возникает необходимость тренировки космонавтов на Земле с целью выработки навыков поведения при возникновении нештатных ситуаций на борту космической станции. С появлением мощных компьютеров, позволяющих реализовать тестирующие динамические тренажеры [1], эффективность таких тренировок достигла должного уровня. В основе тестирующего тренажера лежит программа моделирования движения управляемого объекта, связанная с космонавтом сложным набором технических средств, способных достаточно точно имитировать условия управления объектом в реальных ситуациях. Ключевую роль при этом играет

математическое обеспечение, дающее возможность проанализировать свойства управляемого объекта и оценить действия космонавта в той или иной ситуации. Функциональная схема тестирующего тренажера изображена на рис. 1.

Исполнительные механизмы и динамический объект, изображенные на этой схеме, могут быть реализованы в виде компьютерной модели, а имитационный динамический стенд (ИДС) в ответ на поведение этой модели воздействует на вестибуло-глазодвигательный аппарат (ВГА) тестируемого человека, создавая условия управления объектом, приближенные к реальным. Алгоритм максиминного тестирования [1] вырабатывает наилучшие в некотором смысле начальные и постоянно действующие на объект управления возмущения, создавая внешнюю среду функционирования управляемой системы.

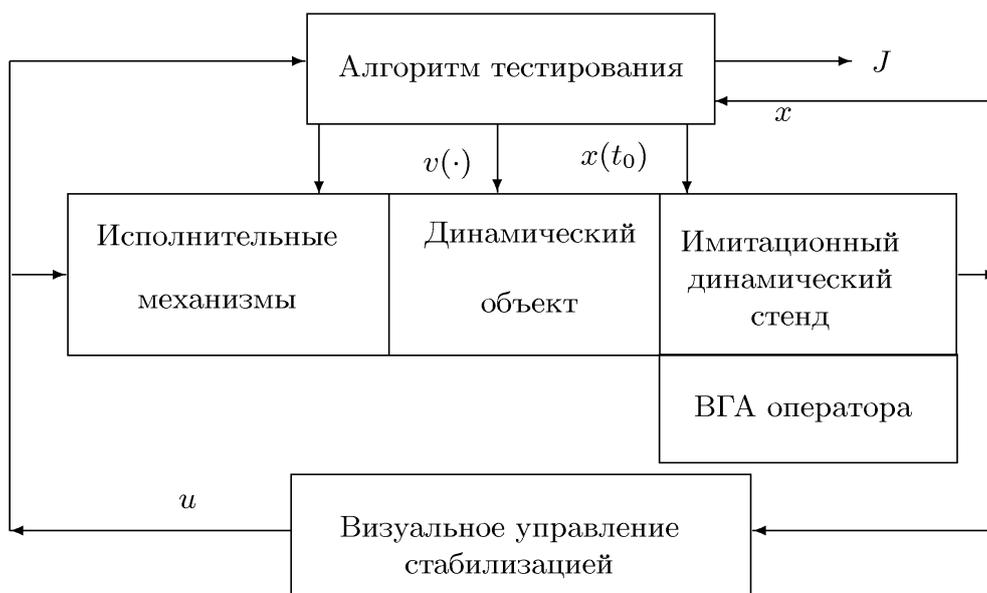


Рис. 1

Предложенная в [1] методика тестирования состоит из трех этапов. На первом, предварительном, этапе в результате решения игровой задачи формируется стратегия тестирования – находятся наихудшие в смысле выбранного функционала качества  $J$ -возмущения, действующие на динамическую систему, а также нижняя оценка качества управления  $J_0$ , получаемая из решения задачи на максимум.

Второй этап представляет собой тренировку космонавта-оператора на динамическом (либо компьютерном) тренажере, когда управление объектом осуществляется при найденных на первом этапе наихудших возмущениях. При этом вычисляется реальный показатель качества управления  $\tilde{J}$ . На третьем этапе путем обработки результатов тестирования выставляется оценка (в смысле заданного критерия  $J$ ).

Данную схему можно применять к целому ряду динамических объектов, к примеру, управляемым космическим аппаратам, летательным аппаратам, автомобилям, морским судам. Ниже рассмотрим задачу построения тестирующего тренажера для управляемого движения космического модуля УСК. Устройство для спасения космонавта предназначено для использования при кратковременных перемещениях вне орбитальной станции. Это устройство монтируется на скафандр и пред-

ставляет собой прямоугольную металлическую раму, по углам которой расположено по четыре газовых микродвигателя. Система управления движением позволяет погасить угловые скорости вращения модуля, возникшие при отрыве от станции, и в маршевом режиме сблизиться с орбитальной станцией для восстановления контакта.

Как видно из схемы на рис. 1, необходимым элементом тестирующего тренажера является математическая модель динамики управляемого объекта.

### Математическая модель процесса сближения УСК со станцией

Большое влияние на точность выполнения управляющих действий космонавта оказывают возмущения массово-инерционных параметров УСК, а также разнотяговость двигателей. Схема расположения двигателей по углам прямоугольной рамы представлена на рис. 2. Модуль будем считать твердым телом, массовые характеристики которого известны неточно. Центр масс рамы ( $S$ ) не совпадает с ее геометрическим центром ( $O$ ). Свяжем со станцией систему координат  $O y_1 y_2 y_3$ , а с рамой – приборную систему координат  $S z_1 z_2 z_3$ , таким образом, чтобы ось  $z_1$  имела направление «спина-грудь»,  $z_2$  – была направлена вертикально, а  $z_3$  – дополняла систему до правой.

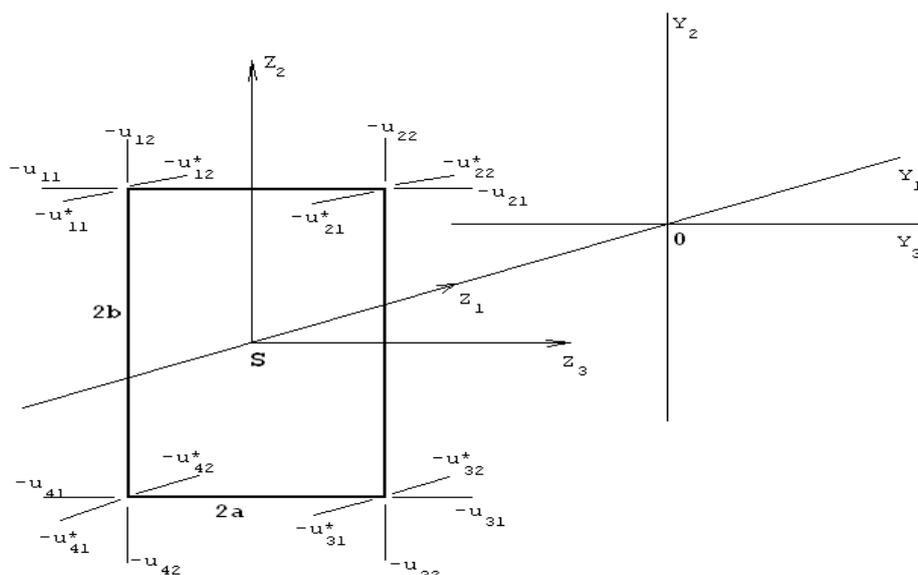


Рис. 2

Обозначим  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$  смещение центра масс относительно геометрического центра по осям  $z_1, z_2, z_3$  соответственно. Будем считать, что тяга маршевых двигателей, направленных вдоль оси  $z_1$  реализуется с переменной во времени ошибкой, а тяга остальных двигателей реализуется точно. Также положим, что главные оси тензора инерции модуля не совпадают с осями приборной системы координат.

Построим программное движение модуля при номинальных значениях параметров системы. Пусть в начальный момент точка  $S$  лежит на оси  $Y_1$  и оси систем координат  $Z_1 Z_3$  и  $Y_1 Y_3$  сонаправлены, т.е. модуль ориентирован лицом к станции и удаляется с некоторой скоростью от нее. Программное движение состоит из 3-х этапов:  $[0, t_1]$  – разгон,  $(t_1, t_2)$  – дрейф,  $[t_2, t_k]$  – торможение.

Решим задачу тестирования качества стабилизации программного движения УСК в смысле минимизации отклонения от программной траектории в конечный момент времени.

Линеаризованные уравнения в отклонениях от программного движения будут иметь вид

$$\begin{cases} \ddot{x}_1 = \sum_{i=1}^4 (v_{i1} - v_{i2}) \\ \ddot{x}_2 = \alpha_3 \sum_{i=1}^4 (u_{i1}^p - u_{i2}^p) + (u_{42} + u_{32} - u_{12} - u_{22}) \\ \ddot{x}_3 = -\alpha_2 \sum_{i=1}^4 (u_{i1}^p - u_{i2}^p) + (u_{11} + u_{41} - u_{21} - u_{31}) \cdot (1) \\ J_1 \ddot{\alpha}_1 = M_1 + \gamma_2 M_3 - \gamma_3 M_2 - \sigma_1 M_1 \\ J_2 \ddot{\alpha}_2 = M_2 + \gamma_3 M_1 - \gamma_1 M_3 - \sigma_2 M_2 \\ J_3 \ddot{\alpha}_3 = M_3 + \gamma_1 M_2 - \gamma_2 M_1 - \sigma_3 M_3 \end{cases}$$

Здесь,  $\sigma_i$  – постоянные ошибки по диагональным элементам тензора инерции,  $\gamma_i$  – постоянные малые угла поворота главных осей тензора инерции относительно приборной системы координат модуля. Систему уравнений в отклонениях (1) можно записать в виде

$$\dot{x} = A(t)x + Bu + Cv, \quad (2)$$

где  $A(t)$  – кусочно-постоянная матрица, а  $B, C$  – постоянны.

Функционала качества в данной задаче имеет вид

$$J(u, v) = x_2(t_k)^2 + x_3(t_k)^2.$$

### Реализация первого этапа методики тестирования

На первом этапе методики тестирования нужно найти наилучшую оценку функционала качества, а также наилучшие возмущения, действующие на систему (2), из решения максиминной задачи

$$J_0 = \max_v \min_u J(u, v).$$

Предположим, что имеет место седловая точка и существует цена игры между управлением и возмущением динамической системы. Для поиска седловой точки и соответствующей стратегии тестирования воспользуемся редукцией [2] исходной динамической игры к некоторой геометрической игре на множествах достижимости системы (2). Для этого рассмотрим отклонение  $x$  как разность  $x = q - z$ , где  $q$  и  $z$  – решения подсистем по возмущениям

$$q' = Aq + Cv, \quad q(0) = x(0), \quad (3)$$

по управлениям

$$z' = Az - Bu, \quad z(0) = 0. \quad (4)$$

Построим проекции области достижимости  $V$  по возмущениям для подсистемы (3) и по управлениям  $U$  – для подсистемы (4) на плоскость  $x_2, x_3$ . Задача поиска максимина сводится к геометрической

$$\rho_0 = \max_{q \in V} \min_{z \in U} \rho(q, z),$$

где  $\rho$  – евклидово расстояние на плоскости  $x_2, x_3$ .

Численно построенные области достижимости  $U$  и  $V$  представлены на рис. 3, при следующих исходных данных: диагональные элементы тензора инерции  $J_1 = 38,8 \text{ кгм}^2, J_2 = 12,5 \text{ кгм}^2, J_3 = 39,4 \text{ кгм}^2, a = 0,58 \text{ м}, b = 1,130 \text{ м}; \delta_1 = 0,01, \delta_2 = -0,03, \delta_3 = -0,05$  – смещение центра масс в приборной системе координат;  $\sigma_1 = J_1/100, \sigma_2 = J_2/100, \sigma_3 = J_3/100$  – ошибки диагональных элементов тензора инерции;  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = -0,03$  – углы поворота главных осей тензора инерции относительно осей приборной системы координат.

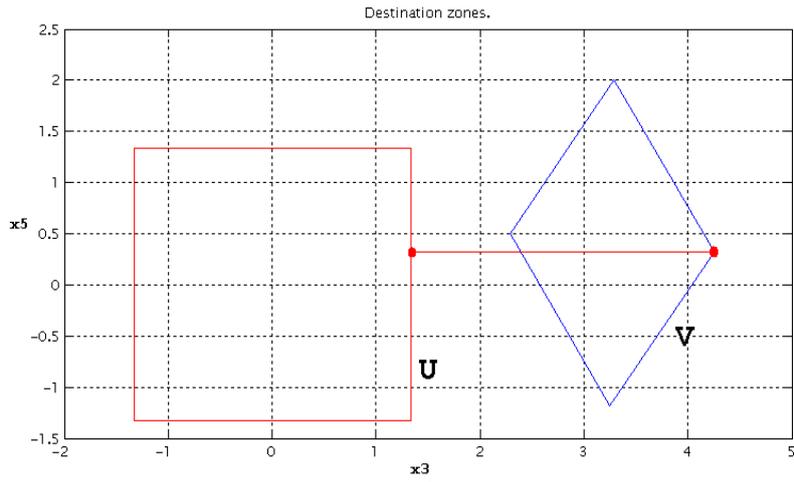


Рис. 3

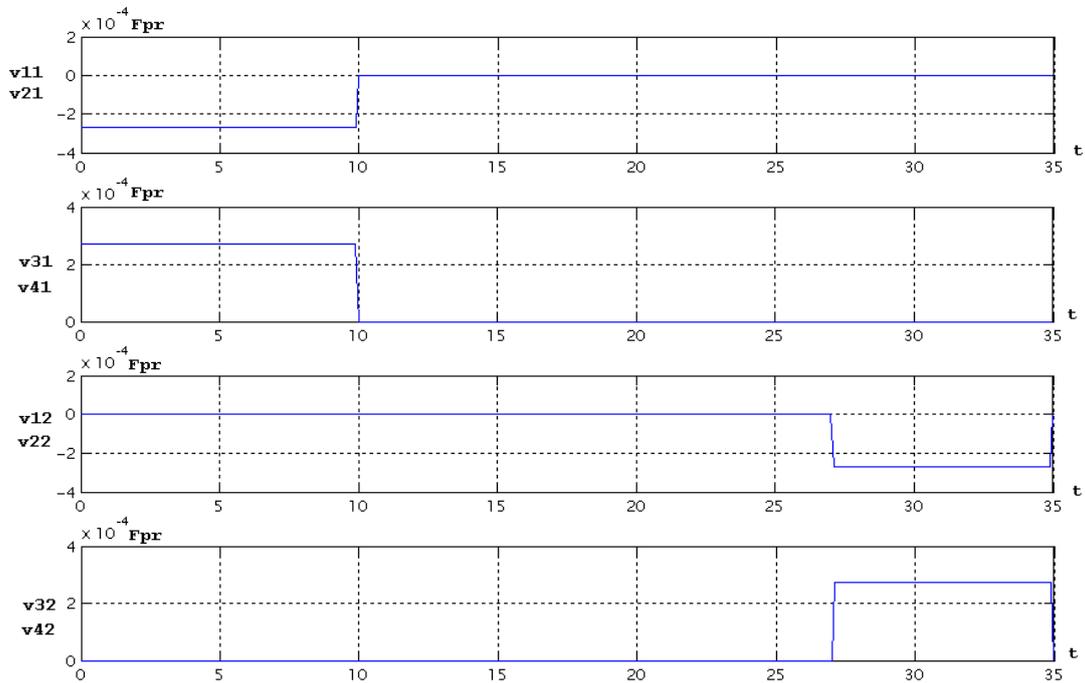


Рис. 4

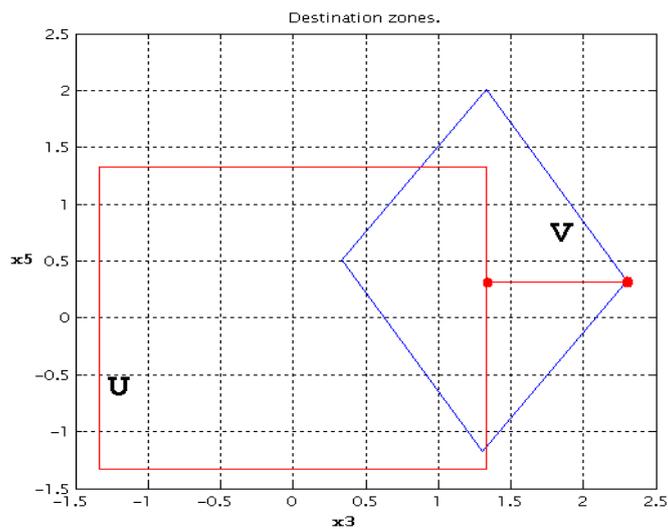


Рис. 5

Используя алгоритмы, описанные в [2], можно установить, что при данных значениях параметров, начальных условиях и данных начальных отклонениях существует седловая точка. Кружками на рис. 3 обозначены точки на границах  $U$  и  $V$ , соответствующие седловой точке геометрической игры. Неулучшаемая оценка функционала качества равна  $J_0 = \max_v \min_u J(u, v) = 5,22$ .

Программные стратегии тестирования показаны на рис. 4.

Для параметров  $\delta_1 = 0,01$ ,  $\delta_2 = -0,006$ ,  $\delta_3 = -0,001$ ,  $\sigma_1 = J_1/100$ ,  $\sigma_2 = J_2/100$ ,  $\sigma_3 = J_3/100$ ,  $\gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = -0,03$  седловая точка геометрической игры не существует.

Соответствующие проекции областей достижимости показаны на рис. 5.

С помощью критерия существования седловой точки [2], можно проверить, что в данном случае она отсутствует. Это означает, что полученная на первом этапе неулучшаемая оценка функционала качества  $J_0$  является недостижимой.

### Реализация второго этапа методики тестирования

Полученные на первом этапе наилучшие параметры УСК используются на втором этапе как входы для программы, моделирующей динамику сближения УСК со станцией. Сигналы управления модулем при этом формируются космонавтом в процессе тренировки. В конце процесса можно вычислить

получившиеся отклонения от точки причаливания и таким образом получить реальный показатель точности управления  $\tilde{J}$ . Сравнивая его с идеальным показателем  $J_0$ , вычисляем оценку работы космонавта. Для проведения тренировки необходимо осуществить визуальную имитацию движения космического модуля в окрестности станции. Таким образом, блок визуальной имитации является частью математического обеспечения тестирующего динамического тренажера. Вычислительные возможности современных компьютеров позволяют в реальном времени интегрировать уравнения движения космического модуля и отображать на мониторе текущую визуальную обстановку в окрестности станции.

Схематически структура работы второго этапа представлена на рис. 6.

В качестве графического ядра используются библиотеки OpenGL и DirectX3D, которые способны строить реалистичные изображения в реальном времени и поддерживаются большинством существующих видеокарт. Кроме того, библиотека OpenGL является платформенно независимой, что позволяет перенести программу визуального моделирования сближения космонавта со станцией на многие платформы, такие, как Linux, Solaris, Irix, Os/2, MacOS. На данный момент построена версия программы для операционной системы Windows с использованием DirectX 9.

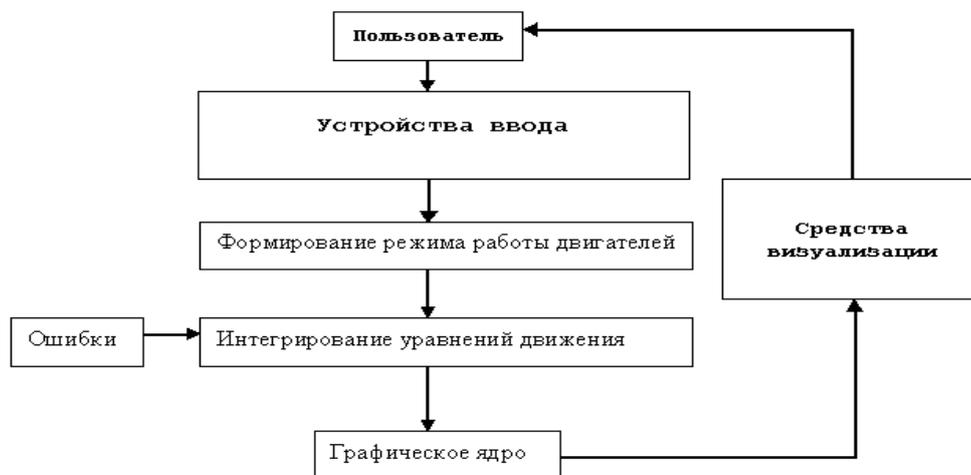


Рис. 6



Рис. 7

Улучшить качество визуальной имитации можно с помощью специального шлема виртуальной реальности (рис. 7), который дает возможность генерировать стереоскопическое изображение орбитальной станции. Вкупе с устройствами ввода (джойстик, реальный пульт управления модулем) это позволяет добиться достаточно близких к реальности условий управления космическим модулем.

Дальнейшее повышение реалистичности процесса тренировок можно достичь, включив в состав тренажера имитационный динамический стенд типа центрифуги [4], на котором возможна имитация вестибуло-сенсорного конфликта в невесомости для космонавта, оказывающего значительное влияние на точность выполнения визуального управления на космической орбите.

Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку работы (грант 04-01-00379).

#### Библиографический список

1. Александров В.В., Болтянский В.Г., Лемак С.С. и др. Оптимизация динамики управляемых систем. – М.: МГУ, 2000.
2. Александров В.В., Блаженова-Микулич Л.Ю., Гутьерес-Ариас И.М. и др. Максиминное тестирование точности стабилизации и седловые точки в геометрических играх // Вестник МГУ. – Сер. Матем. механика. – № 4. – 2004. – С. 55–69.
3. Шикин Е.В., Боресков А.В. Компьютерная графика. Полигональные модели. – М.: Диалог-МИФИ, 2005.
4. Александров В.В., Лемак С.С. Тестирование качества полуавтоматической стабилизации аэрокосмического полета как третий уровень управления динамическим имитатором // Проблемы механики. – М.: Изд-во Физматлит, 2003. – С. 63–72.

## ТОПОЛОГИЯ ВСЕЛЕННОЙ И КАЛИБРОВОЧНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

И.К. РОЗГАЧЕВА, МПГУ

В стандартной горячей модели Вселенной используется пространство-время как непрерывное множество точек, которое является ориентируемым, четырехмерным, однородным и изотропным. До сих пор не установлено, бесконечно или компактно это множество. Прямой метод определения компактности пространства Вселенной обсуждался впервые в 70-х годах XX века [2].

Прямые попытки поиска «духов» – диаметрально противоположных изображений одного и того же объекта – ничего не дали [3].

В настоящей работе обсуждается возможность определения топологии пространства-времени на основе гипотезы, которая вдохновляла физиков XX в.: свойства пространства-времени «закодированы» в динамике материи, причем геометрические

симметрии пространства-времени взаимосвязаны с динамическими симметриями материи.

Геометрическая симметрия определяет выбор системы координат. Например, если пространство-время имеет группу симметрии Пуанкаре, то система координат должна быть однородной и изотропной. Однако геометрическая симметрия не определяет такое топологическое свойство пространства времени как компактность. В этом можно убедиться на примере мира Минковского. Этому миру соответствует однородное и изотропное пространство-время, которое может быть как бесконечным, так и компактным.

Динамическую симметрию определяют как любой физический принцип, накладывающий явное ограничение только на свойства поля взаимодействия. Примером динамической симметрии является калибровочная симметрия электромагнитного взаимодействия. Пространство-время Минковского используется в электродинамике Максвелла. Какое геометрическое свойство мира Минковского соответствует калибровочной симметрии электромагнитного поля?

Оказывается, калибровочной симметрии соответствует компактность пространства-времени. Для того чтобы в этом убедиться, надо использовать теорему, которая доказана в топологии: группы гомологий гомеоморфных множеств совпадают [1].

Эта теорема позволяет строить отображение двух гомеоморфных (связанных взаимно однозначным соответствием) множеств путем отождествления их групп гомологий (групп преобразований, относительно которых каждое множество инвариантно).

В качестве гомеоморфных множеств выберем множество точек пространства-времени Минковского и множество значений электромагнитного потенциала. Уравнения Максвелла определяют взаимно однозначное соответствие между этими множествами. Оба рассматриваемых множества имеют одну и ту же группу гомологий – группу пассивных преобразований Лоренца: интервал мира Минковского  $ds^2 = dx^i dx_i$  и

модуль потенциала  $A_i A^i$ , уравнения Максвелла инвариантны относительно Лоренц-преобразований.

Калибровочная инвариантность электродинамики является группой гомологий, которая в соответствии с приведенной теоремой должна совпадать с группой активных преобразований Лоренца.

Для простоты рассмотрим двухмерный потенциал  $A_i = \{\varphi, A, 0, 0\}$ . Градиентные преобразования потенциалов в инерциальной системе координат  $K(t, x)$  запишем в виде

$$\varphi \rightarrow \varphi + \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad A \rightarrow A - \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad (1)$$

где  $\Phi \neq 0$  – любая дифференцируемая функция.

С геометрической точки зрения преобразования (1) есть поворот потенциала  $A_i$  относительно сохраняющегося 4-вектора тока  $j_i$ . В этом смысле они похожи на преобразования Лоренца: при переходе в систему координат, движущуюся относительно  $K$  со скоростью  $v$ , потенциал  $A_i$  поворачивается относительно направления скорости  $v$ . Так что совпадение гомологий как раз и означает, что преобразования (1) являются активными преобразованиями Лоренца.

Далее, согласно принципу относительности, активные преобразования Лоренца совпадают с пассивными преобразованиями Лоренца, которые в данном случае имеют вид

$$\varphi \rightarrow \frac{\varphi + \frac{v}{c} A_1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}, \quad A \rightarrow \frac{A + \frac{v}{c} \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}. \quad (2)$$

Условие тождественного совпадения (1) и (2) приводит к уравнению

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t}\right)^2 - \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x}\right)^2 = -\frac{2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} (\varphi^2 - A^2). \quad (3)$$

Условие неотрицательности энергии электромагнитного поля  $A_i^i = 0$  при градиентных преобразованиях приводит к уравнению для функции  $\Phi$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} - \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}\right) = 0. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) обращаются в тождество для решений вида

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = B \sinh \frac{\Phi}{\Phi_*}, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x} = B \cosh \frac{\Phi}{\Phi_*}, \quad (5)$$

где параметр  $\Phi_* \neq 0$  и функция

$$B = \frac{2(\Phi^2 - A^2)}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

должна удовлетворять уравнению

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}\right) \sinh \frac{\Phi}{\Phi_*} = \left(\frac{\partial B}{\partial x}\right) \cosh \frac{\Phi}{\Phi_*}. \quad (6)$$

Уравнение (6) следует из уравнения (4) для решений (5). Уравнение (6) обращается в тождество, если

$$\left(\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}\right) = \frac{F(\Phi)}{\sinh \frac{\Phi}{\Phi_*}}, \quad \left(\frac{\partial B}{\partial x}\right) = \frac{F(\Phi)}{\cosh \frac{\Phi}{\Phi_*}}, \quad (7)$$

где  $F(\Phi)$  – дифференцируемая функция.

Используя определение полных производных, из уравнений (4), (5) и (6) можно найти для полных дифференциалов следующие уравнения:

$$\frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt} = 2B \sinh \frac{\Phi}{\Phi_*}, \quad \frac{d\Phi}{dx} = 2B \cosh \frac{\Phi}{\Phi_*}. \quad (8)$$

Тогда квадрат интервала пространства-времени равен

$$ds^2 = (cdt)^2 - (dx)^2 = \left(\frac{d\Phi}{B \sinh\left(2\frac{\Phi}{\Phi_*}\right)}\right)^2 = \left(\frac{cdt}{\cosh \frac{\Phi}{\Phi_*}}\right)^2. \quad (9)$$

Интервал (9) времениподобен, так как из (8) следует, что  $\frac{dx}{dt} = c \tanh \frac{\Phi}{\Phi_*} < c$  для любой функции  $\Phi < \infty$ . Выбор функции  $\Phi$  ограничен только временными уравнениями (6), (7) и (8), в которые входят только две произвольные функции  $B$  и  $\Phi$ . Поэтому, не ограничивая общности, можно выбрать связь координатного времени  $t$  и функции  $\Phi$  в виде  $d\Phi = cdt$ ,

тогда

$$B = \left(2 \sinh \frac{\Phi}{\Phi_*}\right)^{-1} \quad \text{и} \quad F(\Phi) = -\left(2\Phi_* \tanh \frac{\Phi}{\Phi_*}\right)^{-1}.$$

Функция  $\Phi$  определяет связь потенциалов  $A_i$  и координатного времени  $t$ . Интервал теперь равен

$$ds = \frac{d\Phi}{\cosh \frac{\Phi}{\Phi_*}}. \quad (10)$$

Из (10) следует, что множество событий, конечно,

$$s = 2\Phi_* \left( \arctan e^{\frac{\Phi}{\Phi_*}} - \frac{\pi}{4} \right) < \frac{\pi}{2} \Phi_*,$$

хотя функция  $\Phi \neq 0$  имеет бесконечную область определения.

Таким образом, электродинамике Максвелла следует сопоставить компактный мир Минковского.

Какой физический смысл у функции  $\Phi$ ? Поле заряженной материи  $f = f_1 + if_2$  при градиентных преобразованиях потенциалов изменяется согласно калибровочным преобразованиям

$$f \rightarrow fe^{i\frac{\Phi}{\Phi_*}}. \quad (11)$$

Группе калибровочных преобразований (11) отвечает более общее алгебраическое свойство уравнений скалярной электродинамики, которое записывается в виде уравнения окружности

$$(f_1)^2 + (f_2)^2 = R^2. \quad (12)$$

Полагается, что калибровочные преобразования (11) позволяют получать из постоянного поля  $f = R = const$  поле материи

$$f_1 = R \cos \frac{\Phi}{\Phi_*}, \quad f_2 = R \sin \frac{\Phi}{\Phi_*}.$$

Уравнение (12) играет роль динамической симметрии для поля материи.

Квадрат интервала в фазовом пространстве (12) равен

$$dl^2 = (df_1)^2 + (df_2)^2 = \left(\frac{R}{\Phi_*}\right)^2 d\Phi^2. \quad (13)$$

Следовательно, функция  $\Phi$  играет роль интервала в фазовом пространстве (12).

Уравнение (10) и (13) устанавливают правило отображения между компактным множеством (12) и компактным миром Минковского (10).

Таким образом, компактность мира Минковского для электромагнитных процессов есть следствие калибровочной симметрии, а не уравнений движения для электромагнитного поля. Поэтому любой электромагнитный процесс происходит в компактном пространстве-времени, если калибровочная симметрия выполняется точно.

В работе [1] показано, что компактная космологическая модель с симметрией

(12) пульсирует. В ходе пульсаций растет динамическая энтропия поля материи. Поэтому в этой модели нет противоречия с принципом причинности.

#### Библиографический список

1. Розгачева И.К. // *Астрономический журнал*. – 1977. – Т. 74. – С. 165–171.
2. Соколов Д.Д., Шварцман В.Ф. // *ЖЭТФ*, 1974. – Т. 53. – С. 412–419.
3. Lehoucq R., Lachieze-Rey M., Luminet J.P. // *Astron. Astrophys.*, 1996. – V. 313. – P. 339–346.

## ФРАКТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МЕЖГАЛАКТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК

И.К. РОЗГАЧЕВА, *МПГУ*,  
И.Б. КУВШИНОВА, *МПГУ*

Скопления галактик являются самыми большими гравитационно связанными системами в нашей Вселенной. Они содержат сотни и тысячи галактик.

Скопления галактик находятся от нас очень далеко (расстояния больше 10 Мпк, 1 пк =  $3 \cdot 10^{13}$  км). Поэтому поток излучения от них в любом диапазоне очень мал и не превышает  $10^{-12}$  эрг/см<sup>2</sup>·с (поток излучения от Солнца равен  $1,36 \cdot 10^6$  эрг/см<sup>2</sup>·с). Систематическое изучение скоплений галактик стало возможным только благодаря развитию внеатмосферных методов наблюдений в последней четверти XX века. Приемники излучения, установленные на спутниках, позволяют наблюдать скопления в диапазонах от инфракрасного до рентгеновского. Было обнаружено, что скопления являются протяженными источниками рентгеновского излучения. Этот факт свидетельствует о том, что скопления заполнены межгалактическим газом с низкой концентрацией  $10^{-2} - 10^{-4}$  см<sup>-3</sup> и высокой температурой  $10^7 - 10^8$  К.

В настоящее время уже имеются обширные каталоги, в которых собраны данные спутниковых наблюдений скоплений галактик. Статистический анализ этих каталогов позволяет находить корреляцию между физическими параметрами скоплений.

В современной физике скоплений известно несколько проблем. Первая проблема связана с гипотезой о том, что скопления являются гравитационно связанными стационарными системами. В этом случае для движения галактик в скоплении должна выполняться теорема вириала: удвоенная кинетическая энергия галактик равна энергии их гравитационного взаимодействия. Однако оказалось, что если в теореме вириала использовать массы галактик  $m_L$ , которые определяются по их светимости  $L$  с помощью наблюдаемого соотношения масса–светимость  $L \propto m_L^4$ , то удвоенная кинетическая энергия любого скопления всегда больше его потенциальной энергии. Таким образом, видимой («светящейся») массы скоплений недостаточно для того, чтобы считать скопление стационарным.

С другой стороны, характерное время установления вириального равновесия

$$t \approx \left( \frac{2R^3}{Gm_L} \right)^{\frac{1}{2}}$$

для обычных параметров скоплений радиуса  $R \approx 3$  Мпк,  $m_L \approx 10^{15} m_{\odot}$  не превышает  $10^{10}$  лет. Это время меньше возраста Вселенной, и скопления должны были успеть перейти в стационарное состояние.

Для объяснения больших скоростей галактик была предложена гипотеза о существовании в скоплениях галактик большого количества темной несветящейся материи. Масса темной материи должна в несколько раз превышать массу светящегося вещества в скоплениях (галактики и межгалактический газ). Проблема состоит в том, что в течение последних 30 лет так и не определена физика темной материи.

Вторая проблема связана с объяснением происхождения горячего газа в скоплениях и поверхностной яркости рентгеновского диффузного излучения скоплений. Согласно наблюдениям, яркость центральных областей скоплений в сотни раз больше яркости его внешних частей. Рентгеновский спектр диффузного излучения свидетельствует о том, что это тормозное излучение горячей ионизированной плазмы с температурой больше  $10^7$  К. Интенсивность тормозного излучения плазмы увеличивается с ростом ее плотности и температуры.

Для объяснения поверхностной яркости рентгеновского излучения скоплений была предложена гипотеза [2, 3] о неоднородном распределении межгалактического газа: в центральных областях скоплений концентрация плазмы в десятки раз больше, чем в его внешних частях. В этом случае центральные области будут в сотни раз ярче внешних областей.

Скоплений с сильным увеличением рентгеновской яркости к центру много. Поэтому следует предположить, что должен существовать механизм, который поддерживал бы интенсивность рентгеновского излучения достаточно долго, так как плотная плазма в центре скопления высвечивает свою тепловую энергию меньше, чем за  $10^6$  лет.

В работах [2, 3] этот механизм связывается с течением плазмы к центру скопления: горячая межгалактическая плазма высвечивает свою тепловую энергию, охлаждается и под действием сил тяготения скопления опускается к центру скопления. Эти охлаждающиеся потоки плазмы увеличивают концентрацию плазмы и повышают рент-

геновскую яркость центра скопления. Остывшая плазма должна накапливаться в центральных областях.

В существующих моделях охлаждающихся потоков скорость накопления массы порядка  $10 - 100 m_{\odot}$  в год ( $m_{\odot}$  – масса Солнца). За время существования скопления в центральных областях могло бы накопиться до  $10^9 m_{\odot}$ . Проблема состоит в том, что до сих пор не обнаружено никаких доказательств существования большого количества холодного газа с  $T < 10^5$  К в скоплениях. Небольшое количество такого газа наблюдается в мягком рентгеновском диапазоне ( $T \approx 10^6$  К) и ультрафиолетовом диапазоне ( $T \approx 10^4$  К) [4, 5]. Кроме того, неясно, почему не во всех скоплениях поверхностная рентгеновская яркость резко увеличивается к центру.

Для объяснения этих противоречий в рамках модели охлаждающихся потоков предложены модели, в которых рассматриваются механизмы нагрева газа – рождение массивных звезд в холодном газе и их взрывы, нагрев активным выделением энергии в ядрах галактик [6 – 8]. Основная трудность этих моделей состоит в том, что требуется очень много по сравнению с наблюдениями сверхновых, чтобы вторично разогреть газ, накопившийся благодаря охлаждающимся потокам.

Одним из следствий вторичного разогрева межгалактического газа должна быть его неоднородность. Свидетельства неоднородности межгалактического газа обнаружены при анализе рентгеновских изображений некоторых скоплений [9, 10]. Целью настоящей работы является поиск косвенных свидетельств неоднородности плазмы в скоплениях галактик с помощью простейшего статистического анализа каталога скоплений галактик.

### Результаты статистического анализа

Мы сделали выборку скоплений галактик с сильным увеличением рентгеновской яркости к центру из каталогов [11 – 21]. Физические параметры этих скоплений приведены в таблице.

**Физические параметры скоплений галактик**

№	Name	z	$\sigma$ (km s <sup>-1</sup> )	Lx (1044 erg s <sup>-1</sup> )	Tx (keV)	LH $\alpha$ (1040 erg s <sup>-1</sup> )
1	2	3	4	5	6	7
1	A74	0.0655	577 [W]	0,479 [FJ]	2.2 [FJ]	–
2	A85	0.0521	749 [Ab]	16,511 [LD]	6.2 [FJ]	–
3	A133	0.0603	767 [W]	5,763 [ES]	3.8 [ES]	–
4	A262	0.0163	494 [ZAB]	0,915 [ES]	2.4 [ES]	–
5	A278	0.0894	739 [W]	1,867 [FJ]	3.5 [FJ]	–
6	A376	0.0490	903 [W]	2,366 [ES]	5.1 [ES]	–
7	A397	0.0324	447 [SRD]	0,095 [FJ]	1.6 [FJ]	–
8	A407	0.0464	590 [Ab]	0,915 [FJ]	2.8 [FJ]	–
9	A419	0.0406	522 [W]	0,549 [FJ]	1.9 [FJ]	–
10	A426	0.0179	1277 [ZAB]	21,434 [ES]	5.5 [ES]	–
11	A478	0.0881	904 [ZAB]	47,909 [ES]	6.8 [ES]	–
12	A496	0.0331	705 [ZAB]	5,808 [ES]	4.7 [ES]	36,44 [W]
13	A539	0.0288	832 [ZAB]	1,299 [FJ]	3.0 [LD]	–
14	A576	0.0381	914 [ZAB]	2,761 [ES]	3.7 [ES]	–
15	A644	0.0711	1046 [W]	14,652 [FJ]	6.6 [LD]	–
16	A646	0.1303	927 [W]	7,355 [FJ]	5.3 [FJ]	–
17	A779	0.0230	503 [ZAB]	0,2 [FJ]	1.5 [FJ]	–
18	A970	0.0595	832 [W]	0,89 [FJ]	4.3 [FJ]	–
19	A999	0.0319	404 [ZAB]	0,065 [FJ]	1.2 [FJ]	–
20	A1060	0.0124	608 [ZAB]	0,781 [ES]	3.3 [ES]	–
21	A1367	0.0214	822 [ZAB]	1,76 [ES]	3.5 [ES]	–
22	A1644	0.0475	933 [ZAB]	5,156 [FJ]	4.7 [LD]	–
23	A1650	0.0845	947 [W]	13,297 [FJ]	5.5 [LD]	–
24	A1795	0.0622	773 [ZAB]	20,146 [ES]	5.1 [ES]	–
25	A1837	0.0376	596 [W]	1,065 [ES]	2.4 [ES]	–
26	A1890	0.0570	661 [W]	1,07 [FJ]	2.9 [FJ]	–
27	A1983	0.0444	765 [ZAB]	0,659 [FJ]	2.5 [FJ]	–
28	A1991	0.0586	937 [W]	3,291 [FJ]	5.4 [LD]	28,55 [W]
29	A2029	0.0766	786 [ZAB]	95,757 [W]	7.8 [LD]	–
30	A2052	0.0353	576 [W]	3,645 [ES]	3.4 [ES]	38,46 [W]
31	A2055	0.0529	975 [W]	2,188 [FJ]	5.8 [LD]	–
32	A2063	0.0355	652 [ZAB]	3,642 [FJ]	4.1 [LD]	–
33	A2107	0.0421	816 [W]	2,714 [FJ]	4.2 [LD]	–
34	A2142	0.0899	1295 [QLA]	58,593 [ES]	11.0 [ES]	–
35	A2147	0.0353	1148 [W]	4,231 [ES]	4.4 [ES]	–
36	A2151	0.0370	827 [ZAB]	1,46 [ES]	3.5 [ES]	–
37	A2152	0.0374	558 [W]	0,381 [FJ]	2.1 [FJ]	–
38	A2197	0.0301	564 [ZAB]	0,155 [FJ]	1.6 [FJ]	–
39	A2199	0.0299	794 [ZAB]	6,295 [ES]	4.7 [ES]	–
40	A2218	0.1710	1056 [W]	18,093 [FJ]	6.7 [LD]	–
41	A2244	0.0970	1090 [W]	7,011 [FJ]	7.1 [LD]	–
42	A2250	0.0647	693 [Ab]	0,926 [FJ]	2.8 [FJ]	–
43	A2256	0.0581	1270 [ZAB]	15,777 [FJ]	7.5 [LD]	–
44	A2312	0.0928	746 [W]	1,967 [FJ]	3.6 [FJ]	–
45	A2319	0.0555	1580 [DAN]	28,515 [FJ]	9.9 [LD]	–
46	A2415	0.0590	769 [W]	2,392 [FJ]	3.8 [FJ]	–
47	A2556	0.0865	872 [W]	5,524 [FJ]	4.7 [FJ]	–
48	A2580	0.1297	907 [W]	4,579 [FJ]	5.1 [FJ]	–
49	A2597	0.0852	1250 [W]	15,311 [FJ]	9.1 [LD]	34 [W]
50	A2625	0.0601	641 [W]	0,82 [FJ]	2.7 [FJ]	–

1	2	3	4	5	6	7
51	A2626	0.0565	681[SRD]	4,782[FJ]	2.9[LD]	32,97 [W]
52	A2634	0.0309	744[ZAB]	1,204[FJ]	3.4[LD]	–
53	A2657	0.0400	667[SRD]	2,932[FJ]	3.4[LD]	–
54	A2670	0.0759	1038[ZAB]	3,885[FJ]	3.9[LD]	–
55	A3158	0.0575	1058[QLA]	6,97[FJ]	5.5[LD]	–
56	A3376	0.0490	802 [W]	3,125[FJ]	4.1[FJ]	–
57	A3389	0.0267	487[GMT]	0,386[FJ]	2.1[LD]	–
58	A3581	0.0214	654 [W]	0,845[FJ]	2.8[FJ]	40,81 [W]
59	A4059	0.049	845[GGP]	4,936[ES]	3.5[ES]	–

[Ab] – G. O. Abell, H. G. Corwin & R. P. Olowin (1989) [12]; [DAN] – L. Danese et al. (1980) [13]; [ES] – A. C. Edge & G. C. Stewart (1991a) [14]; [FJ], [W] – D.A. White, C. Jones & W. Forman (1997) [15]; [GGP] – M. R. Green, J. G. Gudwin & J. V. Peach (1988) [16]; [GMT] – B. Garilli, D. Maccagni, M. Tarengi (1993) [17]; [LD] – L. P. David et al. (1993) [18]; [QLA] – H. Quintata & D. G. Lawrie (1982) [19]; [SRD] – M. F. Struble & H. J. Rood (1991) [20]; [ZAB] – A. I. Zabludoff et al. (1990) [21].

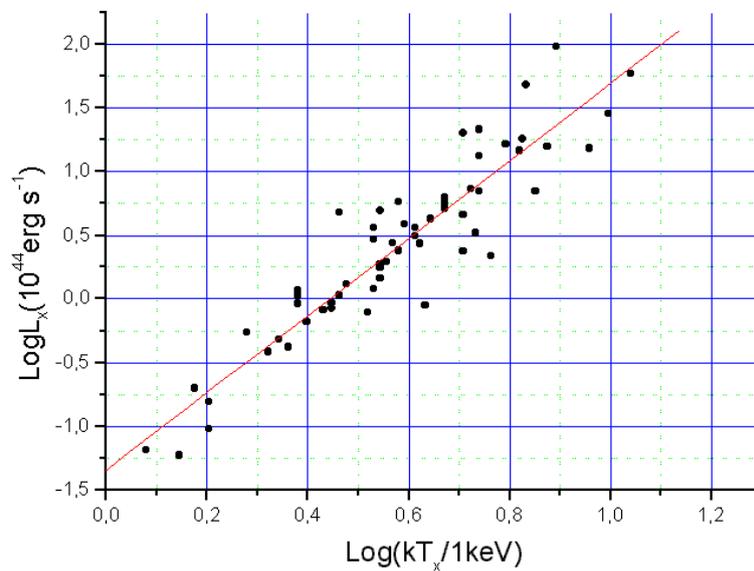


Рис. 1. Зависимость рентгеновской светимости  $L_x$  от рентгеновской температуры  $T_x$

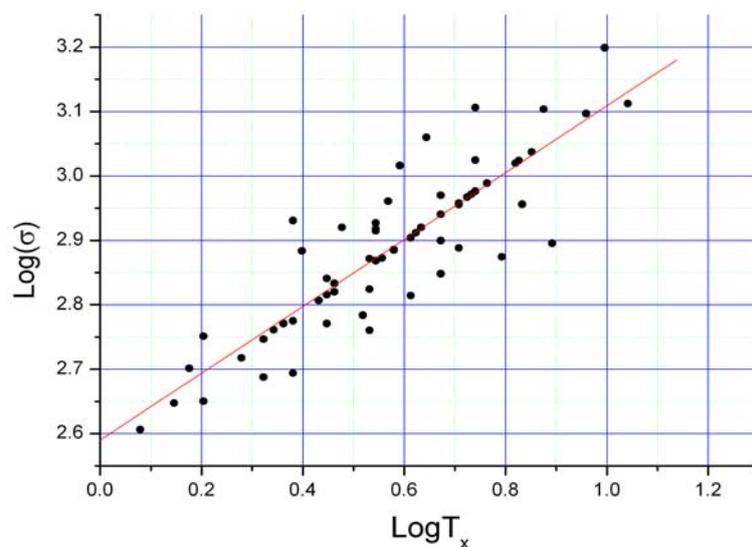


Рис. 2. Зависимость дисперсии скоростей галактик  $\sigma$  от рентгеновской температуры  $T_x$

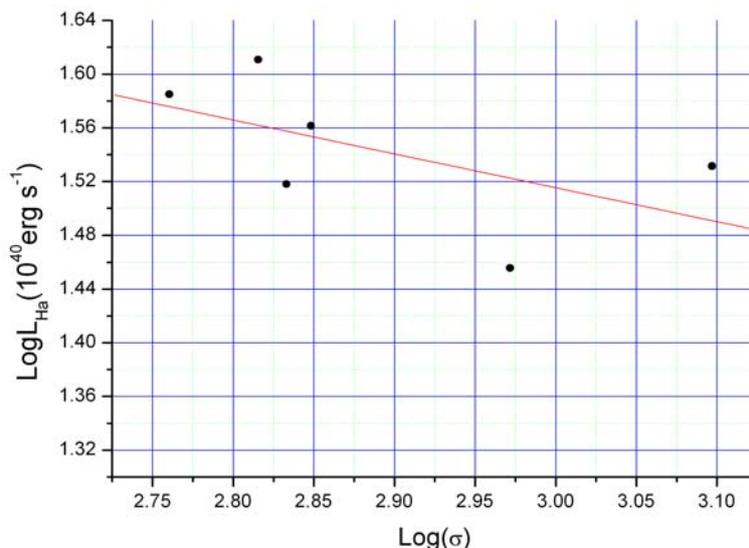


Рис. 3. Зависимость дисперсии скоростей галактик  $\sigma$  от оптической светимости газа в красном фильтре  $L_{H\alpha}$

На рис. 1–3 показаны корреляции между параметрами скоплений:  $\sigma$  (км/с) – дисперсия скоростей галактик,  $T_x$  (кэВ) – рентгеновская температура, определенная по спектру в диапазоне (1–11) кэВ,  $L_x \left( \frac{\text{эрг}}{\text{с}} \right)$  – рентгеновская светимость,  $L_{H\alpha}$  – оптическая светимость газа в красном фильтре.

Эмпирическую связь температуры  $T_x$  и светимости  $L_x$  (рис. 1.)

$$L_x \propto T_x^{3,03} \quad (1)$$

можно объяснить гипотезой о том, что рентгеновское излучение скоплений является тормозным излучением однородной плазмы с температурой  $T_x$ . Действительно, для тормозного излучения светимость единицы объема однородной плазмы связана с ее температурой  $T$  и ее концентрацией  $n$  соотношением [1]:

$$L \propto \sqrt{T} \cdot n^2.$$

Уравнение состояния излучающей плазмы описывается уравнением политропы

$$n \propto T^{\frac{1}{\gamma-1}}.$$

Если плазма полностью ионизована, то  $\gamma = 5/3$ ,  $n \propto T^{3/2}$  и

$$L \propto T^{3,5}. \quad (2)$$

В пределах статистических ошибок наблюдений соотношение (1) не согласуется

с зависимостью (2). Это может быть связано с тем, что используются данные из разных каталогов. Если же отклонение наблюдаемой зависимости (1) от теоретического соотношения (2) реально, то, скорее всего, не выполняется условие однородности плазмы.

Эмпирическая связь дисперсии скоростей галактик  $\sigma$  и температуры  $T_x$  (рис. 2.)

$$\sigma \propto T_x^{0,52} \quad (3)$$

согласуется с гипотезой о стационарности скоплений. Действительно, рассмотрим простейший случай сферически симметричного стационарного скопления, в состав которого входят галактики, межгалактический газ и темная материя.

Уравнение для радиальных движений газа имеет вид

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{Gm_g(m_g + m_L + m_d)}{r}, \quad (4)$$

где  $P = nkT$  – давление газа;

$k$  – постоянная Больцмана;

$v$  – скорость крупномасштабных движений газа по радиусу  $r$ ;

$m_L$  – масса галактик;

$m_d$  – масса темной материи;

$m_g$  – масса газа;

$\rho = \mu m_p n$  – плотность газа со средним молекулярным весом  $\mu$ ;

$m_p$  – масса протона.

Для качественного анализа запишем градиент давления в виде

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{\alpha}{r} P, \quad (5)$$

где функция

$$\alpha = r \left( \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial r} + \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (6)$$

учитывает неоднородность концентрации и температуры газа.

Будем считать, что скорость  $v$  мала по сравнению с тепловой скоростью  $\frac{kT_x}{\mu \cdot m_p}$ . Это предположение согласуется с наблюдениями: пока не обнаружены крупномасштабные движения межгалактического газа, не связанные с выбросами плазмы из активных ядер галактик.

В этом случае  $\frac{dv}{dt} \approx 0$  и уравнение (4)

становится уравнением гидростатического равновесия. Его можно записать, используя (5) и (6), в алгебраическом виде

$$\alpha \frac{kT}{\mu \cdot m_p} = \frac{G}{r} (m_g + m_L + m_d). \quad (7)$$

Для стационарного скопления справедливо вириальное соотношение между кинетической энергией галактик и газа и их потенциальной энергией гравитационного взаимодействия.

При однородном распределении имеет

$$2 \cdot \left( \frac{1}{2} m_L \sigma^2 + \frac{3}{2} \frac{kT}{\mu \cdot m_p} m_g + \frac{1}{2} m_g v^2 \right) = \frac{G}{r} [m_L (m_L + m_d) + m_g (m_g + m_L + m_d)] \quad (8)$$

Согласно наблюдениям

$$m_L \sigma^2 \gg m_g v^2, \quad \frac{kT_x}{\mu \cdot m_p} \gg \frac{Gm_g}{r}.$$

В этом случае уравнение (8) можно переписать в следующем виде:

$$\sigma^2 \approx \frac{kT}{\mu \cdot m_p} \left[ \alpha + (\alpha - 3) \frac{m_g}{m_L} + m_L \frac{(m_g / m_L)^2}{m_L + m_d} \right]. \quad (9)$$

Если  $\alpha = \text{const}$ , то  $\sigma \propto T^{0.5}$ .

Для политропного уравнения состоя-

ния плазмы  $\alpha = \frac{2-\gamma}{\gamma-1} \cdot \frac{r}{T} \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)$ .

Сравнивая (9) и (3), видим, что достаточно, чтобы квадратная скобка в уравнении (9) слабо зависела от температуры. Например, если

$$\frac{\partial T}{\partial r} > 0, \quad \gamma = \frac{5}{3}, \quad \frac{m_g}{m_L} < \frac{1}{\alpha - 3}, \quad \frac{m_L}{m_d} \left( \frac{m_g}{m_L} \right)^2 \ll \frac{m_g}{m_L},$$

и  $\alpha \sim T^{0.2}$ , то согласие (3) и (9) будет в пределах наблюдательных ошибок.

$$\text{Условие} \quad \frac{\partial T}{\partial r} > 0 \quad (10)$$

означает, что температура газа растет от центра к периферии скопления. В стационарной однородной системе было бы  $\frac{\partial T}{\partial r} < 0$ . Однако в неоднородной плазме, состоящей из ячеек с различной плотностью и температурой, условие (10) может выполняться.

Пока уверенных наблюдательных доказательств неоднородности плазмы нет [9, 10]. Но о существовании неоднородностей в плазме может свидетельствовать отклонение наблюдаемого соотношения (1) от соотношения (2), которое справедливо для однородной плазмы.

Действительно, допустим, что в плазме есть флуктуации плотности – ячейки с температурами  $T_i$  и светимостями  $L_i$ , где  $i = 1, 2, \dots, N$  – номер ячейки.

Предположим, что ячейки образуют фрактальное множество. В этом случае их светимости и температуры удовлетворяют условиям самоподобия:

$$L_i = a^i L_1, \quad T_i = b^i T_1, \quad (11)$$

где  $a > 1$  и  $b > 1$  – некоторые параметры.

Светимость плазмы равна сумме светимостей всех ячеек

$$L_x = L_1 \sum_{i=1}^N a^i = L_1 (a + a^2 + a^3 + \dots + a^N) = L_1 \frac{a^{N+1} - 1}{a - 1} \approx a^{N-1} L_1.$$

Из условия самоподобия для температур (11) можно найти

$$T_n = b^N T_1, \quad N = \frac{\lg T_n / T_1}{\lg b}.$$

Тогда имеем

$$L_x \approx \frac{1}{a} L_1 a^N = \frac{1}{a} \left( \frac{T_N}{T_1} \right)^{\frac{\lg a}{\lg b}}. \quad (12)$$

Сравнивая (12) с (1) и (2) находим

$$\frac{\lg a}{\lg b} = 3.52, \quad \frac{\lg a}{\lg b} - 3.5 = 0.02.$$

Параметры  $a$  и  $b$  характеризуют неоднородность плазмы.

Важную информацию о состоянии межгалактического газа можно получить из анализа его оптического излучения. В оптическом диапазоне светит водородная плазма с температурой ниже  $10^5$  К. Поток излучения очень мал и его удастся уверенно измерить в красном фильтре  $H_\alpha$  не у всех скоплений. В нашей выборке из 59 скоплений есть только 6 скоплений, для которых измерена светимость  $L_{H_\alpha}$  межгалактического газа. На рис. 3. показана зависимость между дисперсией скоростей галактик  $\sigma$  и оптической светимостью газа  $L_{H_\alpha}$

$$L_{H_\alpha} \propto \sigma^{-0.25}, \quad (13)$$

т. е. светимость  $L_{H_\alpha}$  уменьшается с ростом дисперсии скоростей. Эту связь, конечно, необходимо проверить на более представительном статистическом материале. Здесь же отметим, что если соотношение (13) реально, то оно тоже свидетельствует о неоднородности межгалактического газа. Действительно, в однородной стационарной системе средняя кинетическая энергия галактик сравнима с тепловой энергией плазмы. Тогда скопление галактик с большей дисперсией скоростей имеет более горячий газ, чем скопление с меньшей дисперсией скоростей. Это подтверждают зависимости (1) и (3). Для однородного газа также корреляции были бы справедливы во всех диапазонах излучения, как в рентгеновском, так и в оптическом. Соотношение (13) указывает на то, что в системе есть холодный газ ( $T < 10^5$  К), который не находится в тепловом равновесии с горячим ( $T > 10^6$  К). Другими словами, холодный и горячий газ не перемешиваются и не образуют однородную систему.

## Заключение

В работе с помощью статистического анализа выборки рентгеновских скоплений галактик найдены корреляции между дисперсией скоростей галактик, рентгеновской и оптической светимостями межгалактического газа. Эти корреляции свидетельствуют о том, что

- скопления галактик являются стационарными системами
- межгалактический газ имеет неоднородную структуру во всем объеме скопления
- неоднородность межгалактического газа может иметь фрактальные свойства.

## Библиографический список

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. – М.: Наука, 1988.
2. Fabian A.C., Nulsen P.E.J., MNRAS, 1997, v. 180, p. 479.
3. Cowie L.L., Binney J., Astroph. J., 1997, v. 215, p. 723.
4. Peterson J.R. et al., Astronomy and Astroph., 2001, v. 365, L104.
5. Böhringer H. et al., Astronomy and Astroph., 2002, v. 382, p 804.
6. Pistinner S., Shaviv G., Astroph. J. Letters, 1995, v. 446, L11.
7. Mathews W.G., Brighenti F., Astroph. J., 2003, v. 596, p. 159.
8. Brighenti F., Mathews W.G., Astroph. J., 2000, v. 535, p. 650.
9. Fabian A.C. et al., MNRAS, 2002, v. 318, L65.
10. Furusho T. et al., Astroph. J., 2003, v. 596, p. 181.
11. White D.A. et al., MNRAS, 1997, v. 292, p. 419.
12. Abell G.O., Corwin H.G., Olowin R.P., Astroph. J., 1989, v. 70, p. 1.
13. Danese L., Zotti G. De, Tullio di G., Astronomy and Astroph., 1980, v. 82, p 322.
14. Edge A.C., Stewart G.C., MNRAS, 1991a, v. 252, p.428.
15. White D.A., Jones C., Forman W., MNRAS, 1997, v. 292, p. 419.
16. Green M.R., Gudwin J.G., Peach J.V., MNRAS, 1988, v. 234, p. 1051.
17. Garilli B., Maccagni D., Tarenghi M., Astronomy and Astroph. Sup., 1993, v. 100, p. 33.
18. David L.P. et al., Astroph. J., 1993, v. 412, p. 479.
19. Quintata H., Lawrie D.G., Astron. J., 1982, v. 87, p. 1.
20. Struble M.F., Rood H.J., Astroph. J. Sup., 1991, v. 77, p. 363.
21. Zabludoff A.I., Huchra J.P., Geller M.J., Astroph. J. Sup., 1990, v. 74, p. 1.

## СОПРЯЖЕННЫЕ СВЯЗИ СЕРДЦА\*

(СТАТЬЯ ОПУБЛИКОВАНА В ЖУРНАЛЕ «ДЕЛЬФИС», 2003. – № 3. – С. 112 – 116.)

А.И. ГОНЧАРЕНКО, *Аналитический центр сердца*

*Можно рассматривать сердце как вместительные тончайших токов и накоплений  
Запись Е.И. Рери. о2 18.06.1934. /В.П. ч. 2. С. 464/*

**В** 1970-е годы в Институте экспериментальной патологии и терапии АМН СССР проводились опыты по моделированию нейрогенного инфаркта миокарда на обезьянах. В одном из них во время созданной стрессовой ситуации у самца гамадрила произошла непреднамеренная закрытая травма бедренной артерии с обширным подкожным кровоизлиянием. Когда его привязали к столу, чтобы снять ЭКГ и оказать помощь, то он неожиданно для нас скончался.

При патологоанатомическом вскрытии был зафиксирован инфаркт верхушки сердца. В левом желудочке под местом инфаркта находился тромб. Ревизия всех магистральных сосудов животного обнаружила еще шесть белых тромбов (эмболов), сидящих друг за другом перед местом разрыва левой бедренной артерии. Это было типичное следствие инфаркта миокарда, когда тромб, организованный в полости сердца, выталкивается в сосуды. Однако в этом случае удивило то, что из всех сосудов тела обезьяны они все почему-то попали только к месту травмы.

Гистологическая картина внутрисердечного и шести бедренных тромбов указывала на то, что они формировались на одном и том же участке внутренней поверхности левого желудочка. Получалось, что этот участок был исходным пунктом начала их движения из сердца по сосудам именно в эту бедренную артерию.

На организацию одного тромботического свертка крови в сердце требуется от 2 до 9 минут [15], у места же разрыва артерии их было шесть, и еще один находился в

сердце. Значит, на их формирование ушло не менее одного часа, в течение которого периодически каждый из тромбов выталкивался от верхушки левого желудочка в аорту и совершал по ней один и тот же путь к месту травмы. Повторяемость траектории движения одиночными тромбами в течение длительного времени указывала на то, что выбор их пути в бедренную артерию среди десятков сосудистых ответвлений был не случайным, а закономерным.

Современная биомеханика кровообращения еще не нашла ответа на вопрос, каким способом выполняется целенаправленное движение порций крови по сосудистому руслу, хотя подобные факты известны в экспериментальной физиологии и медицине уже сотни лет. Например, одномоментный анализ крови, взятый из сонных и бедренных артерий, показывает, что кровь, направленная в головной мозг, теплее и содержит больше молодых, мелких эритроцитов с более активными веществами, чем состав крови, идущий в бедренную артерию [2, 12]. В плазме крови, поступающей в плодоносящую матку, иной состав белков и других питательных веществ, чем в плазме артериальной крови окружающих ее органов [8]. Старые крупные эритроциты из общего потока в аорте избирательно попадают только в селезеночную артерию [13], но когда они насыщаются угарным газом, то каким-то образом минуют ее в течение получаса [1]. Эритроциты интенсивно работающей руки содержат больше гемоглобина и кислорода, чем в это же время эритроциты неработающей руки [9], и т.д.

\* См статью А.И. Гончаренко «Непознанное сердце» в новом сборнике конференции «Этика и наука будущего» за 2003 г.

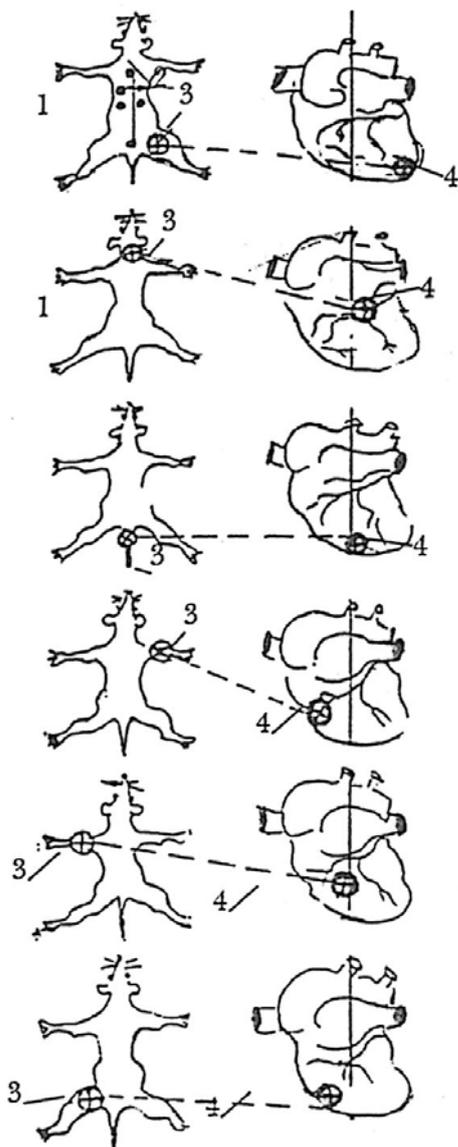


Рис. 1. Топографическая сопряженность мест окклюзии периферических артерий с локальными участками сердца. 1 – поза фиксации крысы в эксперименте, 2 – схема расположения электродов электрокардиографа, 3 – место перевязки артерии, 4 – сопряжение мест перевязки артерии с местом патологии на поверхности сердца

Эти факты селекции крови, не нашедшие до сих пор объяснения, с обнаруженным нами явлением объединило то, что в их основе лежит один и тот же процесс целенаправленного распределения элементов крови по определенным сосудистым областям.

Но в нашем случае, помимо факта целенаправленного движения крови, обозна-

чилась еще и дистанция, на которой действовал этот процесс, что натолкнуло нас на догадку: возможно, между участком сердца, где возникали тромбы, и местом, куда они выталкивались, существует какая-то сопряженность. Для ее подтверждения были проведены эксперименты, содержание которых основывалось на убеждении: поскольку при кровотоке из бедренной артерии проявилась связь с верхушкой сердца, то не исключено, что такие же связи могут обнаружиться и при кровотечениях из других артерий. Нам предстояло воссоздать ситуацию, похожую на ту, которая возникла с гамадрилом, но на других животных и других частях тела.

Для опыта отбирались обезьяны, собаки, кролики и крысы одного пола и из одной семьи. К эксперименту их готовили в течение 2–3 суток с помощью диеты, способствующей свертываемости крови, и физических нагрузок, доводящих животных до состояния стресса. В операциях на одноименной артерии использовались 4–6 животных одного вида, за изменениями в сердце следили по динамике ЭКГ каждые 10–15 минут. Обычно на 20–30-х минутах после кровопускания на ЭКГ появлялись первые признаки ишемии миокарда, сопровождающиеся нарушением ритма. Если они сохранялись в течение 90–100 минут, то производилась патологоанатомическая ревизия всех магистральных артерий на предмет обнаружения в них тромбов, а сердце подвергалось гистологии. На тотальных поперечных срезах сердца были четко видны локализованные участки с трансмуральными кровоизлияниями, деструкцией волокон миокарда и микротромбами в коронарных артериолах.

Вскрытие всех крупных сосудов показало, что сердечные тромбы (от 2 до 5) осели только у места операций. Они состояли из конгломератов тромбоцитов, белковых нитей, лейкоцитов, эритроцитов, имели слоистый вид и были спиралевидно скручены, подобно панцирю улитки. На их срезах среди элементов крови встречались отдельные волокна миокарда. Эти наблюдения наводили на мысль, что сердце в момент опас-

ности для выживания какого-то органа отзывается на запрос его клеток не только подбором необходимого состава крови, но жертвует и собственными тканями, чтобы тампонировать ими брешь в его сосудах.

Сопоставление региона оперированной артерии с местом инфарктно-подобного очага в сердце обнаружило их топографическую взаимосвязь. Острое кровотечение из артерий задних конечностей приводило к деструктивным очагам на переднебоковой поверхности верхушки сердца и образованию под ними на эндокарде (внутренней поверхности полости желудочка) тромбов. Кровотечение из артерий передних конечностей отразилось патологией на переднебоковой и задней поверхности выше средней части левого желудочка. Операции на хвостовой артерии вызвали изменения на передней поверхности левого желудочка справа от его верхушки, а на сосудах печени и почек – на средней части желудочка, включая перегородку и т. д.

Эти соответствия позволили определить зоны сопряженности различных органов и частей тела с конкретными местами на сердце (рис. 1). Местоположение проекций этих участков у всех животных были однотипны, но отличались величиной своей площади и конфигурацией.

Наши эксперименты выявили в сердечно-сосудистой системе ранее неизвестное явление топографической сопряженности сосудистых бассейнов органов или частей тела с их проекцией на определенных участках внутренней и наружной поверхности сердца (рис. 2). Причем, место расположения одной и той же проекции внутри желудочка на эндокарде не всегда находится непосредственно под ее проекцией на миокарде. Гистологические исследования показали, что травма периферических артерий обязательно сопровождается мелкоточечными кровоизлияниями и тромбозом в сосудах Тебезия как в желудочках сердца, так и в ушках левых предсердий, с деструкцией отдельных мышечных волокон трабекулярных ячеек эндокарда. Если эти изменения в сердце принять за действие на него обратной

связи, идущей от периферических артерий, то, следуя логике, должна существовать и прямая связь: от локального участка сердца к сопряженному с ним органу.

Чтобы выявить эту прямую связь, на поверхности сердца необходимо было подобрать такой участок, который по сопряженности должен соответствовать какой-то наружной части тела. Под наркозом у животного вскрывалась грудная клетка, открытое сердце фиксировалось, и на выбранном участке производился крестообразный разрез, проникающий в полость желудочка, после чего рана сшивалась. Ожидаемые изменения в сопряженных частях тела у животных наступали через 1–2 недели.

Наиболее демонстративные результаты были получены на крысах, у которых травма верхушки сердца привела к некрозу хвоста, а у кроликов и собак похожая операция вызвала дистрофическую атонию мышц задних конечностей. Когда же разрезы миокарда не достигали полости желудочков и кровь из них не пульсировала, то действие прямой связи на сопряженных частях тела наглядно не проявлялось.

Эксперименты показали, что явление сопряженности имеет как прямую, так и обратную связь и может действовать независимо от нервной системы, которая в экспериментах отключалась наркозом, внутривенной или местной новокаиновой блокадой. Каждое кровотечение из определенной периферической артерии обязательно отражалось патологией на сопряженном с ней участке сердца, а травма миокарда в этом же месте приводила к недостаточному наполнению кровью той же артерии. При нормальном кровообращении в организме эти взаимоотношения наглядно не проявляются.

Теперь действием сопряженных связей сердца можно объяснить причину возникновения инфаркта миокарда у людей, перенесших хирургические операции, сопровождающиеся перевязкой артерий, например, при резекции желудка, 12-перстной кишки, нефрэктомии, экстерпации матки, торокатомии и т.д. [2]. После таких операций в случае смертельного исхода патолого-

анатомы обнаруживали у мест перевязанных артерий тромбы сердечного происхождения с включенными в них волокнами миокарда, какие наблюдались и в наших экспериментах.

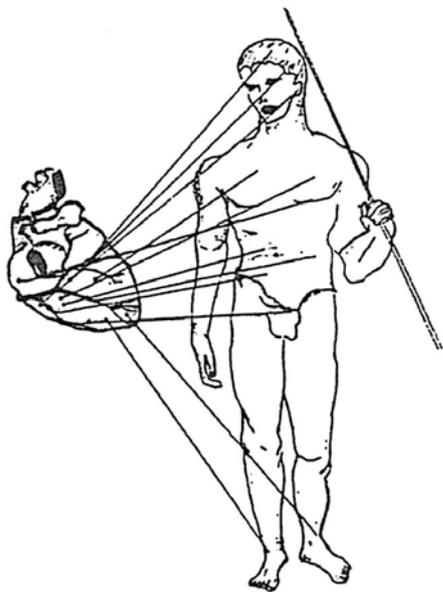


Рис. 2. Схема соответствия частей тела с участками сердца

В свою очередь, когда операции на основании сердца затрагивают коронарные артерии, то это сказывается на кровообращении сосудов головного мозга [5]. Оно проявляется энцефалопатией, депрессией сознания, изменением поведения, интеллекта, ведет к припадкам, инсульту, нарушению зрения [11]. А инфаркт отдельных участков миокарда может вызвать прекращение или снижение кровотока в удаленных от сердца органах и привести даже к омертвлению кончика носа, ушей, сухорукости, импотенции [14].

Обнаруженная закономерность меняет подход к патогенезу сердечно-сосудистых заболеваний и показывает, что их причина может находиться и в периферических органах и обязательным образом как-то отразится на сердце. Стало очевидным, что сердечно-сосудистая система обладает собственной автономной системой связи сопряжения со всеми органами. Поскольку она способна действовать и без участия нервной системы, то ее элементы связи должны находиться

непосредственно в сосудах. Ими могут быть: во-первых, движение самой крови, которая целенаправленными потоками связывает локальный участок сердца с определенной частью тела; во-вторых, гладкомышечные волокна сосудов, свое начало они берут непосредственно в специфической мускулатуре трабекулярных ячеек сердца, выходят в аорту, продолжают в сосуды и разветвляются в капиллярах; в-третьих, возможно, внутрисосудистые электромагнитные частотные волноводы, возникающие в клетках тканей, выходящие в капилляры и по слою интимы идущие навстречу потоку крови. Иных средств связи в сердечно-сосудистой системе просто нет.

Для доказательства этих предположений ставился ряд опытов. Суть первых состояла в том, чтобы определить, действительно ли порции крови от локального участка внутренней поверхности желудочков сердца направляются только в сопряженный с ним сосудистый бассейн.

Над головой, печенью, нижней частью живота и над каждой конечностью собаки помещали калиматоры – счетчики радиоактивных импульсов, выведенные на самописцы (рис. 3). Под наркозом подключалось искусственное дыхание, вскрывалась грудная клетка и фиксировалось обнаженное сердце. В полость желудочка через участок миокарда, сопряженный с задними конечностями, вводилась инъекционная игла на полиэтиленовом капилляре, по нему синхронизатор впрыскивал в момент диастолы альбумин, меченный изотопом радиоактивного йода.

Несколько секунд спустя всплеск радиоактивного излучения распространялся по телу животного, достигая области хвоста и задних конечностей. Его интенсивность здесь была в десятки раз выше, чем в других частях тела. Это свидетельствовало о том, что порция крови, сформированная у верхушки сердца и получившая радиоактивную метку, не рассеивается в сосудистом русле, а концентрированным объемом движется только к задним конечностям, что и предполагалось получить в этом эксперименте.

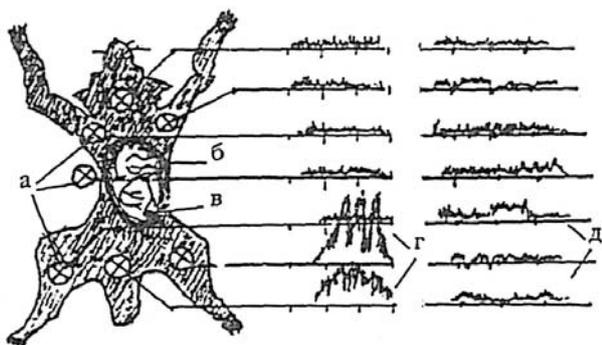


Рис. 3. Изменение кровотока по интенсивности радиоактивного излучения до и после введения азотнокислого серебра: а) – счетчики радиоактивности, выведенные на самописцы; б) – обнаженное сердце животного; в) – место введения радиоактивного альбумина; г) – всплеск радиоактивности в области задних конечностей; д) – снижение уровня радиоактивности после введения азотнокислого серебра

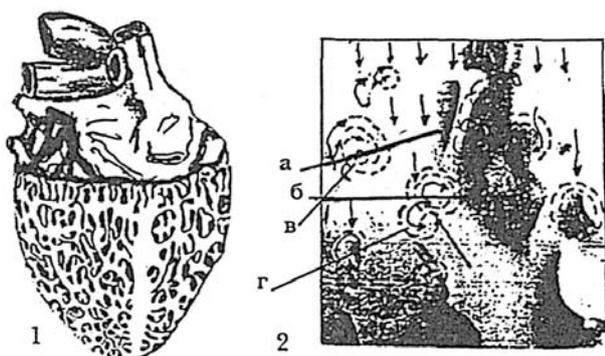


Рис. 4. 1 – Система сосудов Тебезия; 2 – увеличенный фрагмент трабекулярной ячейки на внутренней поверхности желудочка сердца: а) – трабекулы, б) – трабекулярные ячейки; в) – устья сосудов Тебезия; г) – фонтанирующие струйки крови из устьев сосудов Тебезия в момент диастолы

Чтобы показать, что именно участок внутренней поверхности версток внутренней поверхности верхушки сердца ответственный за формирование порции крови для задних конечностей, было решено исключить его из этого процесса с помощью деструкции и разрыва волоконной связи в сосудах и проследить, как эти нарушения изменяют направление радиоактивных порций крови.

В продолжение того же эксперимента через 7–10 минут кончик иглы из полости желудочка втягивался назад в толщу миокарда на 2–3 мм так, чтобы через нее в полиэтиленовый капилляр кровь не поступала из желудочка во время систолы. Затем по капилляру в миокард вводили 0,3–0,5 см<sup>3</sup> 6-процентного нитрата серебра, который в месте его инъекции вызывал локальный ожог и деструкцию в тканях сердца. Спустя 8–10 минут иглу вновь продвигали на прежнюю глубину в полость желудочка и в фазу диастолы опять впрыскивали радиоактивный альбумин. На этот раз волна радиоактивности в области нижних конечностей достоверно не отличалась от фона излучений остальных частей тела и была даже ниже. Подобная инверсия сигнала в отдаленных от сердца органах была получена при повторении такого эксперимента и на других участках сердца и сопряженных с ними сосудах.

Разрушение специфических и гладкомышечных волокон действительно прерывало управление формирования целенаправленных потоков крови от отдельных участков сердца. В клинике подобная деструкция тканей сердца при инфаркте и кардиохирургических операциях наглядно проявляется на реограммах периферических артерий: изменением пульсовой волны, ее скорости и объемом поступающей крови в отдельные сосудистые бассейны [10].

Если поверхность эндокарда поделена на сотни участков, сопряженных с определенными сосудистыми бассейнами, то как они формируют и доставляют порции крови, которые опять же непонятным образом находят дорогу в разветвлениях артерий к соответствующим им частям тела? Каким должен быть тот механизм, что совершает столь целенаправленные действия?

В настоящее время анатомия сердца исследована уже до молекул, и потому пытаться открыть в нем новые образования, исполняющие эти функции, совершенно бессмысленно. В результате возникла тупиковая ситуация: обнаружено явление гемодинамической сопряженности, известно его

действие, но нет материальных субстанций, которые его совершают. Предположения о наличии каких-то мифических сил, структурирующих элементы крови и задающих им вектор движения, были слишком неправдоподобными, особенно для хирургов, руками ощущающих биение сердца.

Путь к разгадке подсказали малоизвестные работы анатома И.А. Коломацкого [6], который впервые обособил от коронарных артерий сосуды Тебезия в отдельную систему сердца (рис. 4, 1) и зафиксировал на киноплёнке места выхода их устьев непосредственно в полость желудочков по фонтанирующим из них струйкам крови во время диастолы (рис. 4, 2).

Именно вид этих струек, скрученных в вихри, натолкнул нас на предположение, что система сосудов Тебезия предназначена для разделения потоков крови в полостях сердца на отдельные **вихревые объёмы**. Основанием для этой гипотезы послужило их анатомическое устройство. Сосуды Тебезия не разветвляются на капилляры в миокарде, а транзитом проходят через него непосредственно в желудочки сердца (рис. 5, в). В полость левого желудочка выходят несколько сотен устьев сосудов Тебезия. Их отверстия имеют клапаны и открываются в

углубления трабекулярных ячеек, которые десятками покрывают внутреннюю поверхность желудочков (рис. 6, б). В них под эндокардом (рис. 5, е) находится специфическая мускулатура (рис. 5, ж), способная менять их объём, сокращать отдельно каждую из полостей ячеек и изменять в них направление движения крови.

За эту способность к самостоятельным действиям мы назвали трабекулярные ячейки «мини-сердцами» (рис. 5, л). Их автономные функции предполагают струйное управление взаимодействием фонтанирующей из них крови с потоками крови из предсердий. В результате должны создаваться вихри, разделяющие весь объём крови на отдельные фракции (рис. 6, в). Вихревые структуры являются самой устойчивой формой движения жидкости. Они могут длительное время сохранять свои образования и потому представляют идеальное средство для гемодинамического сопряжения участков сердца с периферическими органами.

Эта гипотеза и явилась основой дальнейших экспериментов. Прежде всего необходимо было получить подтверждение того, что система сосудов Тебезия принимает непосредственное участие в формировании вихревых объёмов крови.

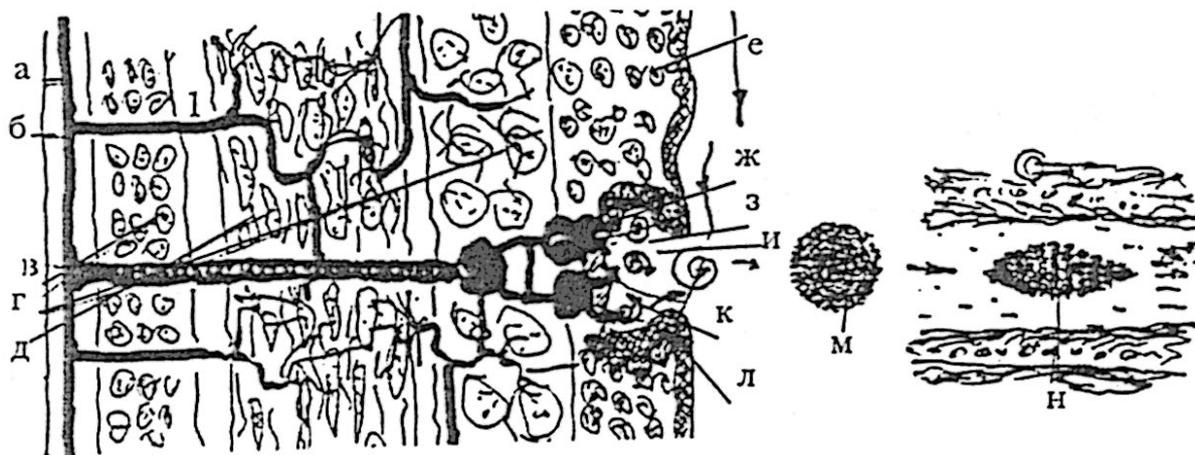


Рис. 5. Поперечный срез миокарда: а) – коронарная артерия; б) – ветви коронарной артерии, питающие миокард; в) – транзитная артерия; г) – мышечные слои миокарда; д) – эпикард; е) – эндокард; ж) – волокна специфической мускулатуры; з) – сосуды Тебезия; и) – трабекулярная ячейка; к) – устья сосудов Тебезия; л) – минисердца; м) – шаровидный солитон эритроцитов в полости желудочка; н) – веретеноподобная форма солитона эритроцитов в сосудистом русле

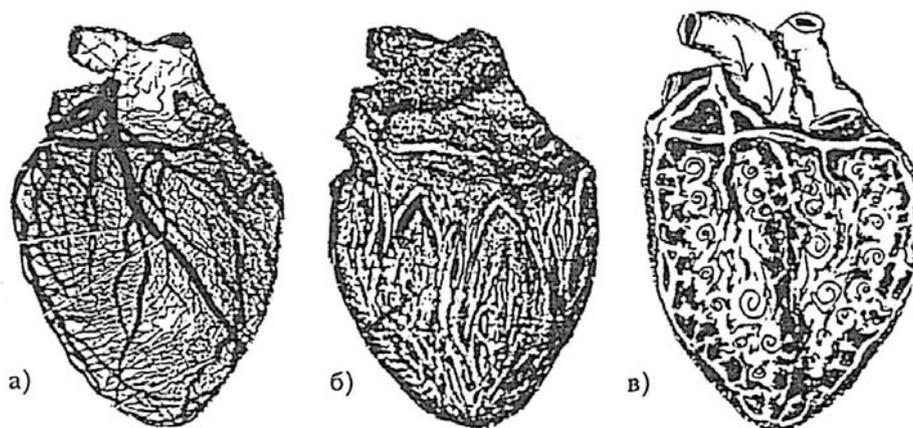


Рис. 6. а) система коронарных сосудов, б) трабекулярная система внутренней поверхности желудочков, в) разделение потоков крови в желудочках сердца на вихре-солитонные фракции

Для этого у крысы под наркозом обнажалось сердце. В коронарный синус аорты вводился капилляр, через который импульсный синхронизатор во время систолы впрыскивал синьку Эванса. Со сколотого сердца на замороженном микротоме делались его поперечные срезы. Под малым увеличением в люминесцентном микроскопе фотографировались и срисовывались расположения эритроцитов в синусах сосудов Тебезия и трабекулярных ячейках. По рисункам и фотографиям составлялось направление движения эритроцитов.

В итоге мы обнаружили, что начало формирования вихреподобных конгломератов эритроцитов начинается еще в «транзитных» артериях, интима которых имеет ворсинки (рис. 5, в). Именно эти артерии с ворсинками в своем продолжении переходили в систему сосудов Тебезия. Они были заполнены торовидными эритроцитарными образованиями, внутри которых обязательно находились микропузырьки. Оказалось, что в трабекулярные ячейки (рис. 5, и) из устьев сосудов Тебезия (рис. 5, к) фонтанируют не просто струйки крови, а уже организованные в торовидную форму солитоны из эритроцитов (рис. 5, м), вокруг которых наворачивались элементы крови, поступающие из предсердий. Таким образом, выяснилось, что сосуды Тебезия и трабекулярные ячейки имеют четкое функциональное назначение – сбор эритроцитов в локальные вихресолитонные структуры в полостях сердца (рис. 6, в).

Далее предстояло выяснить, сохраняются ли элементы крови в этих формах при движении по сосудистому руслу?

Схему предыдущего эксперимента видоизменили: теперь синька впрыскивалась 5–8 раз подряд через 2–4 сокращения сердца, затем у крысы моментально вскрывалась грудная и брюшная полости и заливались азотом, скалывалась часть аорты и периферических артерий. Из них готовились поперечные послойные гистологические срезы, которые снимались на фотопленку; по ним реконструировалось пространственное расположение эритроцитов в сосудах.

Моментально застывший поток крови в артериях показал, как торовидная внутрижелудочковая организации эритроцитов, попав в сосуды, превращается в веретеноподобную форму, поддерживаемую многослойными кольцами из эритроцитов (рис. 5, н). Поскольку большинство этих конгломератов имело такое же устройство и в мелких артериях, то появилось сомнение, что сохранность веретеноподобных структур эритроцитов и их направление движения в разветвлениях сосудистого русла происходит только за счет сил инерции давления систолического импульса сердца. Значит, в сосудистой системе должны действовать какие-то обособленные силы, которые могут самостоятельно в потоке удерживать группу эритроцитов в определенном порядке на протяжении всего русла, предохраняя их от хаотического перемеще-

вания. Такие силы должны быть направлены навстречу потоку эритроцитов от тех тканей, клетки которых находятся в состоянии ожидания поступления этих эритроцитов. Носители этих сил могли проявить себя внутри сосудов как **волноводы электромагнитных излучений**, сконцентрированные по резонансу частот, наводящие эритроциты на цель. Основанием для такого предположения послужили факты адресного движения эритроцитов даже против тока крови [4, 7].

Эксперименты по обнаружению внутрисосудистых волноводов проводились на магистральных бедренных артериях крупных собак. Ткани вокруг них инактивировались новокаиновой блокадой. В канал артерий через проколы вводились две изолированные спирали из медной проволоки на расстоянии 12–15 см друг от друга, плотно прилегающие к их интиме. Наружные концы спирали выводились на усилители, сигнал от них подавался на электронно-лучевой осциллограф. Снимались исходные показатели. Для выявления сигнала запроса тканей задней конечности лапу собаки на одну минуту погружали в воду с температурой 4–6 °С, а затем опускали в воду 43–45 °С. В промежутке этих воздействий регистрировали внутрисосудистые импульсы.

Анализ сигналов между спиралями (проводившийся по доплеровскому эффекту) показал, что в сосудистом русле действительно присутствуют какие-то резонансные электромагнитные однонаправленные импульсы, интенсивность которых зависела от величины температурного перепада, но выявить их источник и истинную природу в сосудистом русле нам не удалось. Однако мы смогли частично экранировать эти импульсы, повторив схему эксперимента, но с некоторым отличием.

Результаты опыта позволили предположить, что экранизация внутрисосудистых сигналов запроса от периферических тканей может гасить резонансные частоты и тем самым прерывать его связь с сопряженным участком сердца, приводя его в состояние,

сходное с острой гипоксией. Таким образом, случай в эксперименте с гамадрилом выявил в кровообращении до сих пор неизвестное явление **гемодинамической сопряженности**, которое проявляется на дистанции между определенными участками сердца и соответствующими им сосудистыми регионами. В действии этого явления обозначились три вида связи: «целевая гемодинамика», волонная, идущая в стенках сосудов и, видимо, частотно – волноводная, распространяющаяся внутри русла сосуда.

Наличие этих автономных связей в сосудистой системе натолкнуло нас на дальнейшие исследования, которые привели к утверждению, что сердце, помимо всем известной насосной функции, выполняет еще функции отбора элементов крови, формирование из них локальных вихресолюционных фракций и придание им целенаправленного движения. Поэтому сердце одним своим сокращением способно обеспечивать все многообразие потребностей нашего организма.

#### Библиографический список

1. Баркрофт Дж. Основные черты архитектуры физиологических функций. – М.-Л., 1937.
2. Гончаренко А.И. Сопряженные связи сердца // Дельфис. – 2003. – № 3. – С. 112 – 116.
3. Зайцев В.Ф., Орлова П.Н. // Кардиология. – № 3. – 1969. – С. 33.
4. Золотов Г.К. Ф.Ж.С. – № 4. – 1989.
5. Иванов К.П. Основы энергетики организма. – СПб., 2001.
6. Ильинский В.В., Астраханцева С.П. Тер. арх. – № 4. – 1967. – С. 53.
7. Коломацкий И.А. // Матер. к науч. сессии. – Краснодар, 1965. – С. 36.
8. Куприянов В.В. Микроциркуляторное русло. – М.: Медицина, 1975.
9. Миркина А. // Казанский мед. журнал. – 1923. – С. 19.
10. Орлов В. Cor et vasa. 8 № 2. – 1966.
11. Селезнев С.А. Комплексная оценка кровообращения в экспериментальной патологии. – Л.: Медицина, 1976.
12. Шевченко Ю. Кардиохирургическая агрессия и головной мозг. – СПб, 1997. – С. 22.
13. Bernard C. Rech sur le grand sympathique, 1854.
14. Guntheroth W. Amer. J. Physiol. № 204, 1963. P. 35.
15. Pbtz M. Coronary Heart disease. New York, 1957.
16. Sandberg H.Jn. Acta Univ. Upsal. Abstz. Uppsala Diss.Fac.Sci. №514, 1979. P. 19.

## ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ПОИСКА СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА 2DFRGS

А.О. КОНОПЛЕВ, ГАИШ МГУ

**И**зучение пространственного распределения галактик является одной из важнейших задач наблюдательной космологии, поскольку это распределение характеризует крупномасштабную структуру Вселенной и является следствием эволюции начальных возмущений плотности.

Во второй половине XX в. было обнаружено три типа крупномасштабных структур, которые образуют галактики: группы галактик, скопления галактик, сверхскопления. Сверхскопления разделены пустотами, диаметры которых больше 50 Мпк (1 пк =  $3 \cdot 10^{13}$  км).

Эти протяженные структуры открывались различными авторами и различными методами [4]. Основная проблема состоит в том, что каждый метод позволяет получить объективные результаты только на определенных масштабах. Сверхскопления очень трудно выделить на общем фоне галактик, так как концентрация галактик в сверхскоплениях всего в несколько раз отличается от средней (по небесной сфере) концентрации галактик. В этом смысле сверхскопления являются «слабыми» структурами, хотя их масштаб больше 10 Мпк. Для таких масштабов обычно применяют метод корреляционной функции, в котором используется корреляционная функция галактик.

Наиболее яркими и уверенно наблюдаемыми являются скопления галактик. Их обнаруживают прямыми подсчетами галактик и сравнением концентраций галактик внутри и вне скопления. Масштабы скопления галактик меньше 3 Мпк.

Группы галактик и внутреннюю структуру скоплений обнаруживают чаще всего методом перколяции, который применим на масштабах меньше 100 Кпк.

Иногда результаты различных авторов противоречат друг другу. Поэтому необходимо анализировать распределение галактик одним и тем же методом, который применим на всех масштабах [5]. Таким методом является вейвлет-анализ. Впервые в астрофизике он был применен в работе [6].

Вейвлет-анализ по своей структуре предполагает использование наблюдательных данных о распределении галактик по всей небесной сфере. Поэтому он позволяет обнаруживать положения и определять размеры структур различных угловых масштабов.

В настоящей работе предложен двухмерный вейвлет-метод для исследования распределения галактик на небесной сфере.

### Метод вейвлет-преобразования

При анализе наблюдательных данных используют вейвлет-преобразования двух типов: непрерывное (НВП) и дискретное (ДВП, ряды вейвлетов непрерывного времени). Не следует путать дискретное вейвлет-преобразование с каким-либо вейвлет-преобразованием дискретного сигнала. Для удобства понимания дискретное вейвлет-преобразование следует называть рядами вейвлетов непрерывного времени или просто вейвлет-рядами (по аналогии с рядами Фурье).

Под НВП функции  $f(t) \in L^2(R)$  понимается скалярное произведение этой функции и базисных функций

$$\psi_{a,b}(t) = a^{-\frac{1}{2}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right),$$

где  $a$  и  $b$  – параметры, причем  $a$  принимает положительные действительные значения;

$b$  – любые действительные значения, то есть ее разложение по всем возможным сдвигам и сжатиям некоторой функции  $\psi(t)$  (порождающего вейвлета, материнская вейвлет-функция) [3].

Материнская вейвлет-функция  $\psi(t)$  выбирается исследователем произвольно, исходя из цели исследования. На выбор порождающего вейвлета накладывается единственное условие [1]:  $\psi(t)$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0.$$

Примером такой функции является вейвлет «Мексиканская шляпа» (Mexican hat, МЕХИНАТ) – вторая производная от гауссианы [2] (рис. 1).

$$\psi(t) = (t^2 - 1)e^{-\frac{t^2}{2}}.$$

На рис. 2 и 3 пунктиром приведены примеры растяжения и сдвига вейвлета МЕХИНАТ:

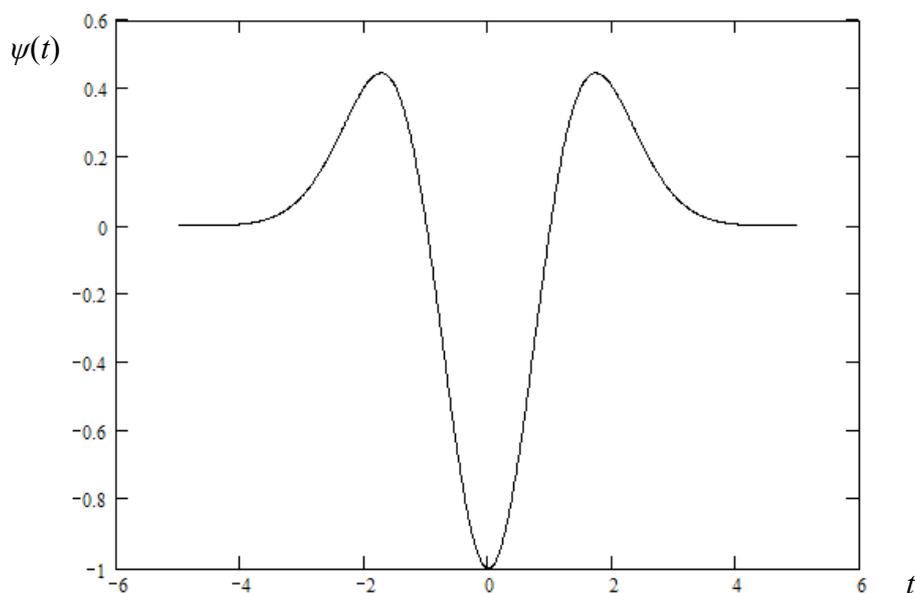


Рис. 1. Порождающий вейвлет МЕХИНАТ

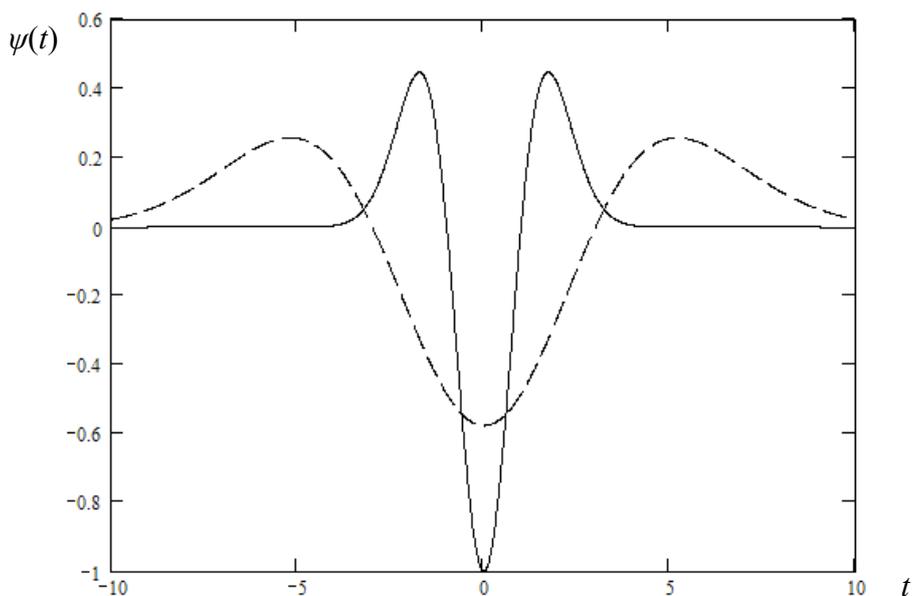


Рис. 2. Растяжение вейвлета МЕХИНАТ при  $a = 3, b = 0$

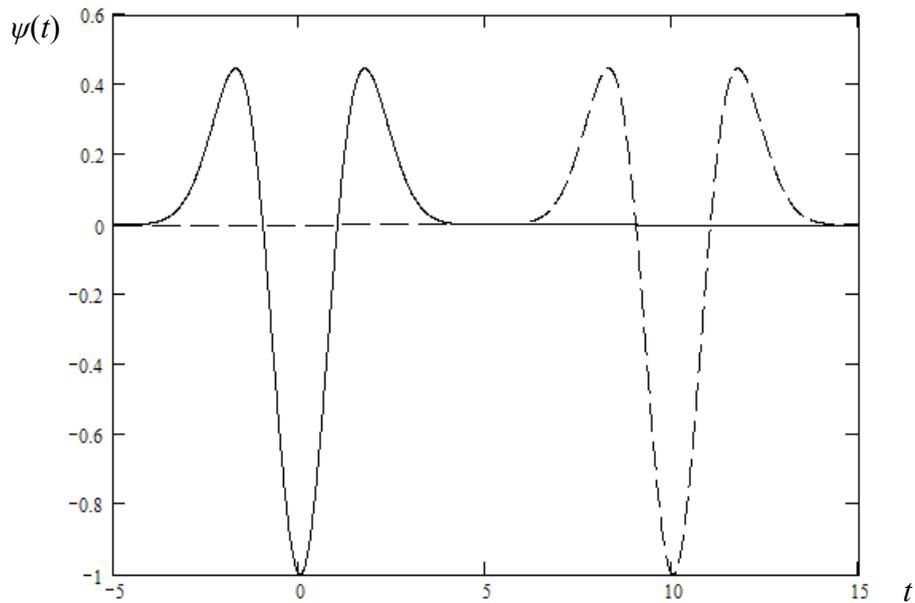


Рис. 3. Сдвиг вейвлета МЕХИНАТ при  $a = 0, b = 10$

Непрерывное вейвлет-преобразование для одномерной функции является сверткой (скалярное произведение) функции  $f(t)$  и базисных функций  $\psi_{a,b}(t)$ :

$$CWT_f(a,b) = a^{-\frac{1}{2}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt.$$

Результатом НВП является функция двух переменных  $CWT_f(a,b)$ .

В случае вейвлет-рядов рассматриваются не все сдвиги и растяжения порождающего вейвлета, а только взятые на некоторой дискретной сетке (обычно логарифмической) [3]. В этом случае вейвлет-преобразование выбирают в виде

$$(CTWS_f)_{m,n} = \int_{-\infty}^{\infty} a_0^{-\frac{m}{2}} \psi(a_0^{-m}t - n) f(t) dt.$$

Здесь  $m, n$  принимают целые значения,  $a_0 > 1$ . Подставив в эту формулу  $a = a_0^m$ ,  $b = na_0^m$ , получим выражение для НВП, но с одним отличием –  $a, b$  будут принимать дискретные значения.

Вейвлет-ряды являются конечным набором коэффициентов  $(CTWS_f)_{m,n}$ .

### Вейвлет-анализ каталога галактик 2dFGRS

Ниже применяется вейвлет-анализ к каталогу галактик 2dFGRS (The 2dF Galaxy Redshift Survey), который содержит информацию об экваториальных координатах, звездных величинах и других характеристиках галактик. В этом каталоге содержится информация о галактиках со звездными величинами вплоть до 19,5. При анализе каталога не учитывается расстояние до галактик (красное смещение), а исходными данными являются только две угловые сферические координаты галактик. Целью анализа является обнаружение на небесной сфере структур, которые образуют галактики: группы, скопления и сверхскопления галактик.

Для упрощения анализа каждая галактика на небесной сфере представлена двумерной функцией распределения яркости – гауссианой:

$$\Phi(x, y) = \Phi_0 e^{-\frac{x^2+y^2}{\sigma^2}},$$

где  $\Phi_0$  – яркость в центре изображения галактики;

$\sigma$  – расстояние от центра галактики, на котором яркость уменьшается в  $e$  раз;

$x^2 + y^2 = r^2$  – расстояние от центра изображения галактики.

Для применения вейвлет-анализа в сферических координатах необходимо ввести систему координатных точек (точек анализа), которые равномерно распределены по сфере и в которых будут вычисляться вейвлет-коэффициенты. Эту задачу решили математики Дуг Хардин (Doug Hardin) и Эд Сэф (Ed Saff) из университета Вандербилт, штат Теннесси [7]. На сайте Эда Сэфа можно скопировать подпрограммы на языке MATLAB и Maple для реализации решения данной задачи

[8]. Результатом работы этих подпрограмм является набор координат точек, равномерно распределенных на сфере. Для определения точек анализа на сфере применялась подпрограмма для системы MATLAB.

Для вычисления вейвлет-коэффициентов в каждой точке анализа удобно перейти к полярной системе координат (СК) на поверхности сферы. Полярная СК «накладывается» на поверхность сферы. Формулы перехода к полярной СК выводятся при помощи формул для сферических треугольников (рис. 5).

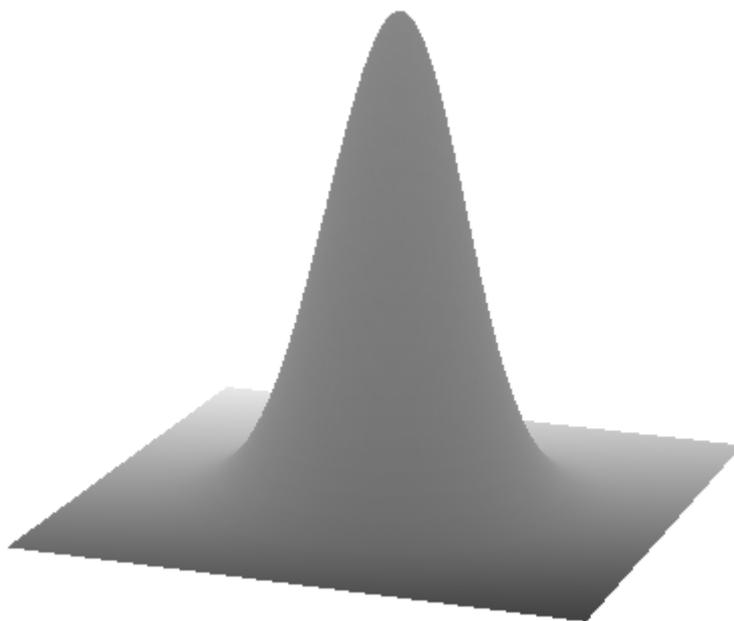


Рис. 4. Простейшее распределение яркости в изображении галактики при  $\Phi_0 = 1$ ,  $\sigma = 1$

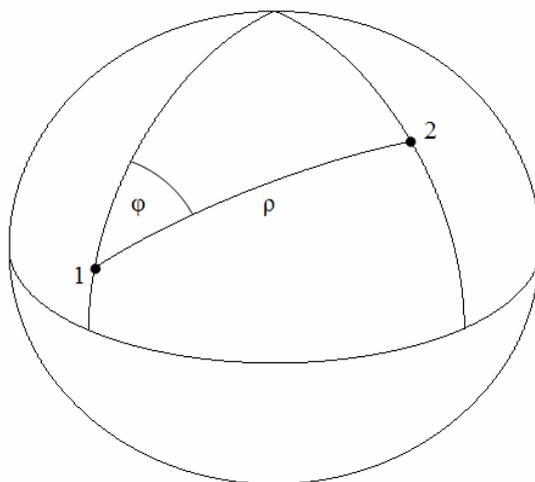


Рис. 5. Полярные координаты на поверхности сферы  $\rho$  и  $\varphi$ , точка анализа совпадает с точкой 1

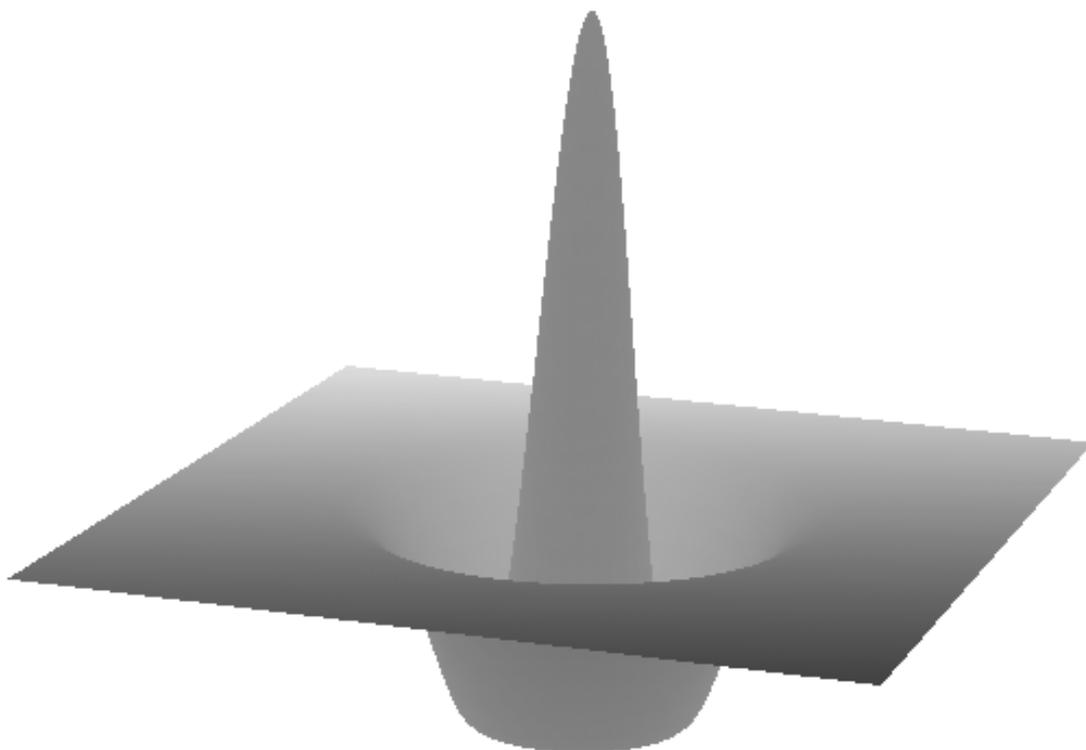


Рис. 6. Вейвлет МЕХІНАТ в полярных координатах  $\psi(\rho, \varphi)$

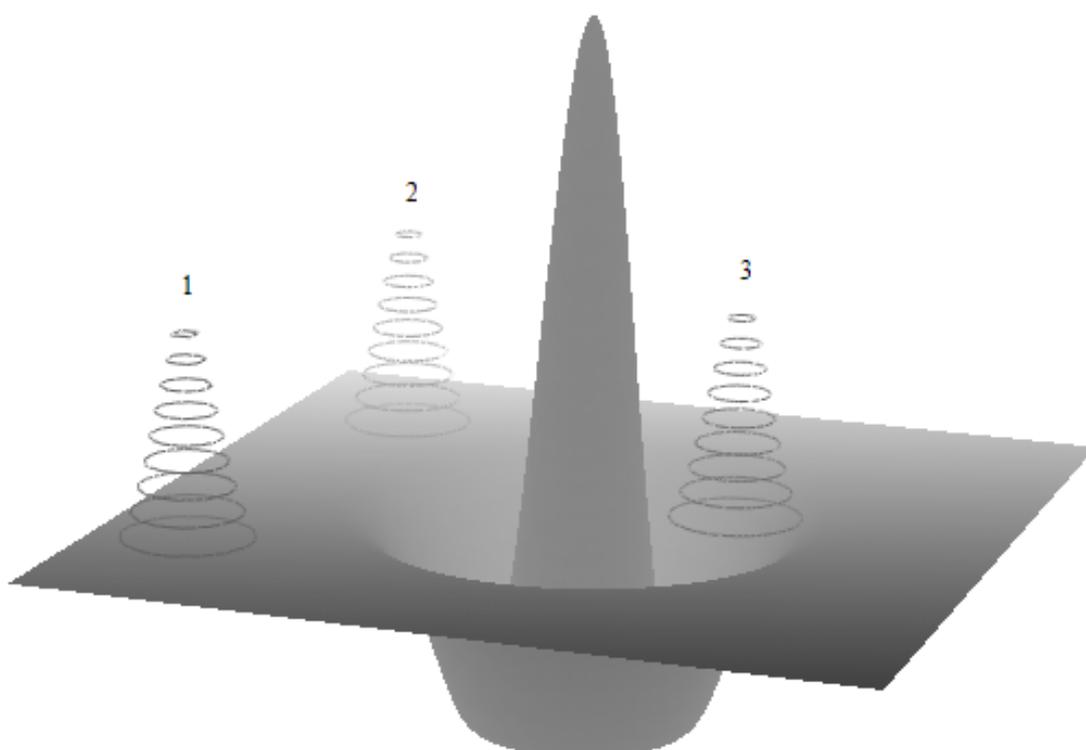


Рис. 7. Схема одного из возможных взаимных распределений вейвлета МЕХІНАТ и трех галактик. Галактики изображены в виде конусов из окружностей при  $\Phi_{0i} = 0,5$  для всех  $i$

$$\rho = \arccos(\sin \delta_1 \sin \delta_2 + \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos(\alpha_2 - \alpha_1)),$$

$$\varphi = \arcsin\left(\frac{\cos \delta_2 \sin(\alpha_2 - \alpha_1)}{\sin \rho}\right),$$

где  $(\alpha_1, \delta_1)$  – экваториальные координаты точки анализа;

$(\alpha_2, \delta_2)$  – экваториальные координаты галактики.

В результате получается набор полярных координат  $\rho, \varphi$  галактик относительно выбранной точки анализа.

В качестве функции  $f(t)$  выберем сумму (при переходе  $t \Rightarrow \{\rho, \varphi\}$ )

$$f(\rho, \varphi) = \sum_{i=1}^n \Phi_i(\rho, \varphi) = \sum_{i=1}^n \Phi_{0i} e^{-\frac{\rho^2 + \rho_i^2 - 2\rho\rho_i \cos(\varphi + \varphi_i)}{\sigma_i^2}},$$

где  $n$  – число галактик в каталоге.

Порождающий вейвлет выбираем в виде

$$\psi(\rho, \varphi) = (\rho^2 - 1) e^{-\frac{\rho^2}{2}}.$$

Он показан на рис. 6.

Вейвлет-преобразование имеет следующий вид:

$$W(a) = \frac{2}{\sqrt{a}} \int_0^\infty \int_0^\pi \psi\left(\frac{\rho}{a}, \varphi\right) \sum_{i=1}^n \Phi_i(\rho, \varphi) \rho d\rho d\varphi,$$

где  $a$  – параметр, определяющий масштаб базисных функций.

В данной задаче определяется значение параметра  $a$ , которое соответствует характерному угловому размеру скоплений галактик ( $20' - 50'$ ).

На рис. 7 изображена схема одного из возможных распределений трех галактик относительно базисной функции. Вертикальная ось симметрии базисной функции проходит через точку анализа. Расстояние галактик от точки анализа разное. Галактики 1 и 2, расположенные далеко от точки анализа ( $\rho \gg a$ ), дают меньший вклад в вейвлет-коэффициент. Этот вклад отрицательный. Галактика 3, расположенная ближе к точке анализа ( $\rho > a$ ), дает больший (по модулю), но все же отрицательный вклад в вейвлет-коэффициент. Галактики, расположенные близко к точке анализа (на рисунке не изображены) ( $\rho < a$ ), дают положительный вклад в вейвлет-коэффициент.

После выполнения двойного интегрирования в предыдущей формуле получается:

$$W(a) = 2a^{\frac{3}{2}} \pi \sum_{i=1}^n \frac{\Phi_{0i} e^{-\frac{\rho_i^2}{\sigma_i^2 + 2a^2}} \sigma_i^2 (4a^4 - \sigma_i^4 - 4a^2 \rho_i^2)}{(\sigma_i^2 + 2a^2)^3}.$$

Данное выражение примет следующий вид, если константы  $\Phi_{0i}$  и  $\sigma_i$  одинаковы для каждой галактики и равны  $\Phi_0$  и  $\sigma$ .

$$W(a) = \frac{2a^{\frac{3}{2}} \pi \sigma^2 \Phi_0}{(\sigma^2 + 2a^2)^3} \sum_{i=1}^n e^{-\frac{\rho_i^2}{\sigma^2 + 2a^2}} (4a^4 - \sigma^4 - 4a^2 \rho_i^2).$$

Далее вычисляются коэффициенты вейвлет-преобразования в каждой точке анализа. Число точек анализа на всей сфере  $10^6$ , а в полосе, соответствующей каталогу 2dFRGS,  $-18038$ . В статье рассматриваются результаты вейвлет-преобразования при параметрах  $\sigma = 4''$ ,  $a$  пробегает значения от  $5,5'$  до  $30^\circ$ . Для вычисления каждого из 18038 вейвлет-коэффициентов используются данные о координатах каждой галактики. Другими словами, значение каждого коэффициента зависит от распределения всех галактик каталога. Именно это свойство вейвлет-анализа позволяет находить структуры в распределении галактик.

### Графическое представление результатов

Пример обработки каталога 2dFRGS показан на рис. 9–11.

На рис. 8 показано положение галактик этого каталога в полосе  $9^h 50^m < \alpha < 14^h 50^m$  и  $-7^\circ 30' < \delta < 2^\circ 30'$ . На результат вейвлет-анализа влияет то, что указанная полоса имеет границы как по прямому восхождению, так и по склонению. Наличие границ приводит к сдвигу положений максимумов вейвлет-коэффициентов на небесной сфере. Этот эффект можно снизить, введя случайное распределение источников в незаполненных областях [9]. В данной работе этот эффект сдвига не учитывается, так как результаты вейвлет-анализа каталога галактик 2dFRGS сравниваются с известным распределением скоплений галактик по каталогу Rich Clusters of Galaxies (Abell+ 1989) [10]. В табл. 1 приведена выборка скоплений галактик из каталога [10] для исследуемой полосы небесной сферы.

Скопления галактик из каталога **Rich Clusters of Galaxies (Abell+ 1989)** [10] для полосы небесной сферы  $9^h50^m < \alpha < 14^h50^m$  и  $-7^\circ30' < \delta < 2^\circ30'$

Abell No.	Номер скопления в каталоге [7].
GLON	Галактическая долгота (в градусах).
GLAT	Галактическая широта (в градусах).
z	Красное смещение (для некоторых скоплений).
RAB1950	Прямое восхождение (в часах, минутах, секундах).
DEB1950	Склонение (в градусах, минутах, секундах).
Count	Примерное количество галактик в скопление.
Rich	«Богатость» скопления по Абелю (1958).
m1	Средняя звездная величина десяти ярчайших членов скопления.

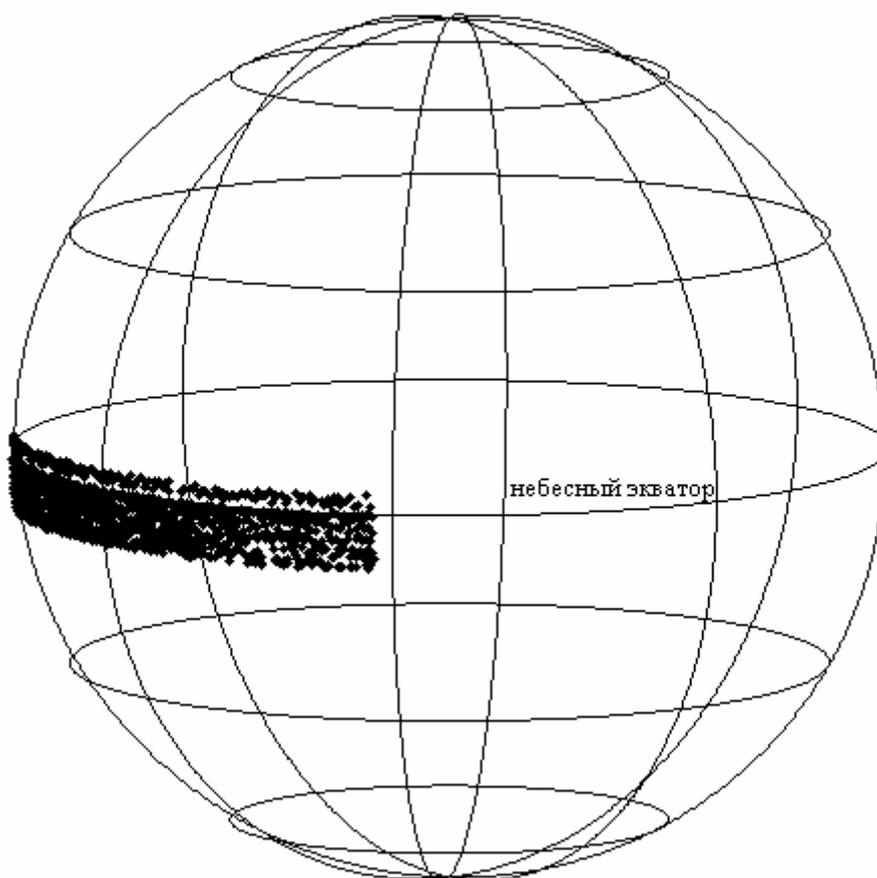


Рис. 8. Участок небесной сферы с галактиками из каталога 2dFRGS

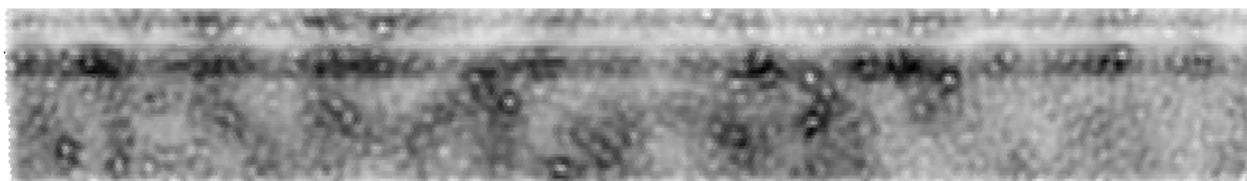


Рис. 9. Результат вейвлет-анализа всей полосы

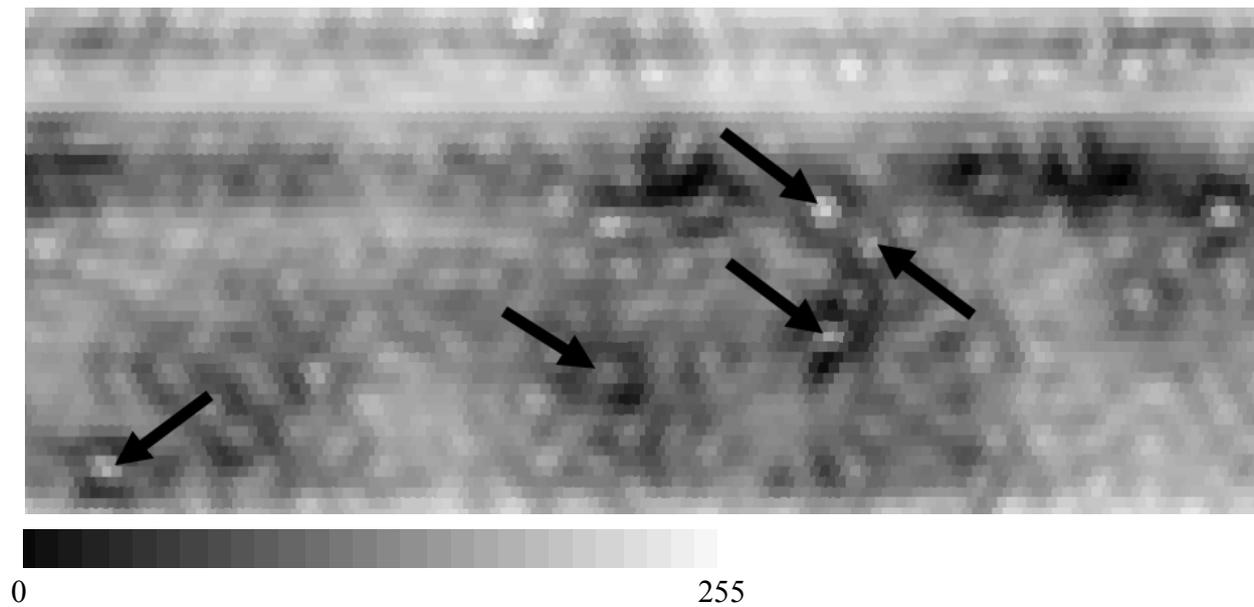


Рис. 10. Увеличенная средняя часть полосы на рис. 9

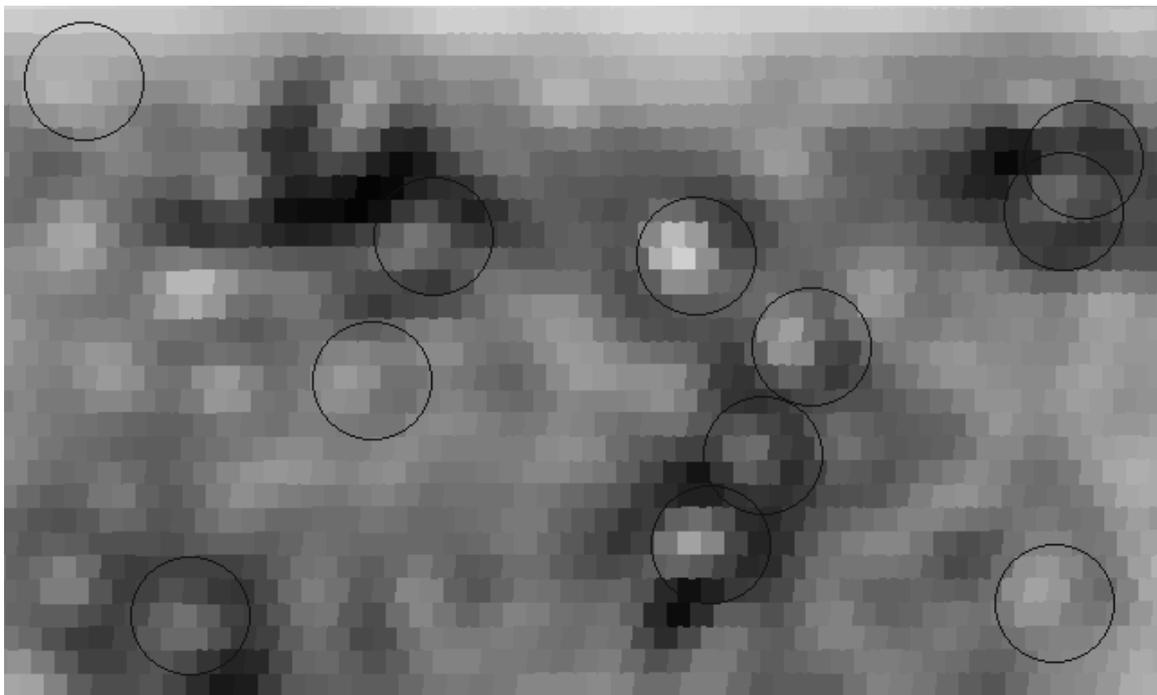


Рис. 11. Сравнение результатов вейвлет-анализа каталога галактик 2dFRGS с распределением скоплений галактик в каталоге [10]. Скопления из каталога [10] изображены окружностями

На рис. 9 и 10 графически показаны результаты вейвлет-анализа. Изображение состоит из квадратов одинакового размера. В центре каждого квадрата находится одна точка анализа. Цвет квадрата соответствует значению вейвлет-коэффициента, шкала цвета приведена на рис. 10. На рис. 9 и 10 более яркие области, включающие несколько точек

анализа, соответствуют повышенной концентрации галактик на небесной сфере. Некоторые яркие области для примера указаны стрелками. Такие области могут соответствовать скоплениям галактик, так как их угловой размер в среднем около  $35'$ , что при красном смещении  $z = 0,1$  и постоянной Хаббла  $H_0 = 100$  (км/с)/Мпк равняется 3 Мпк.

Abell No.	GLON	GLAT	z	RAB1950	DEB1950	Count	Rich	m1
1	2	3	4	5	6	7	8	9
	deg	deg		«h:m:s»	«d:m:s»	ct		mag
890	242,60	36,37		09 50,5	-04 36	31	0	17,20
892	237,26	39,76		09 51,0	+00 48	42	0	17,10
912	239,45	40,89	0,0888	09 58,6	+00 08	36	0	15,90
919	240,84	41,28		10 02,4	-00 27	60	1	17,10
930	246,18	38,49		10 04,4	-05 23	50	1	16,50
933	240,11	42,56		10 05,1	+00 46	44	0	15,90
944	243,52	41,64		10 08,6	-01 47	50	1	17,10
954	242,08	43,33		10 11,1	+00 07	49	0	16,50
957	242,97	42,89	0,0440	10 11,4	-00 40	55	1	15,90
978	250,01	40,36	0,0527	10 18,0	-06 16	55	1	15,60
993	248,84	41,70	0,0533	10 19,4	-04 42	36	0	14,90
1001	250,71	40,78		10 20,7	-06 21	70	1	17,70
1008	249,88	41,92		10 22,2	-05 06	40	0	17,70
1009	250,34	41,65		10 22,4	-05 32	76	1	17,70
1013	250,98	41,52		10 23,4	-05 58	88	2	17,70
1023	251,98	41,50		10 25,5	-06 30	31	0	17,10
1039	251,28	43,75		10 30,3	-04 32	32	0	17,50
1059	253,51	43,64		10 34,7	-05 43	57	1	17,70
1064	246,43	49,02		10 36,2	+01 32	54	1	17,10
1078	248,39	49,47		10 41,0	+00 54	55	1	17,00
1079	256,38	43,62		10 40,9	-07 07	41	0	17,10
1080	247,99	49,85		10 41,4	+01 21	42	0	17,00
1084	256,42	44,04		10 42,1	-06 49	51	1	17,40
1092	248,33	50,47		10 43,8	+01 37	76	1	17,60
1098	254,35	46,95		10 45,4	-03 40	32	0	16,90
1111	253,73	48,42		10 48,1	-02 18	88	2	17,80
1134	255,11	49,81		10 54,5	-01 52	86	2	17,60
1139	251,47	52,65	0,0383	10 55,5	+01 46	36	0	15,00
1148	255,59	51,51		10 59,9	-00 47	78	1	17,60
1153	253,42	53,53		11 01,3	+01 36	84	2	17,50
1164	253,39	54,50		11 03,9	+02 20	68	1	17,70
1172	263,07	47,55		11 05,5	-06 53	39	0	17,20
1189	255,94	54,57		11 08,5	+01 24	36	0	17,00
1191	256,38	54,31		11 08,6	+01 02	95	2	17,50
1195	262,25	49,91		11 09,2	-04 39	56	1	17,60
1200	260,80	51,42		11 09,8	-02 53	53	1	17,00
1206	263,43	49,61		11 11,0	-05 20	52	1	17,60
1214	264,51	50,08		11 14,4	-05 20	61	1	17,50
1216	263,78	51,13	0,0524	11 15,2	-04 12	57	1	16,00
1236	260,67	55,88		11 20,2	+00 44	49	0	17,20
1238	260,06	56,41	0,0716	11 20,4	+01 22	63	1	16,00
1248	265,55	52,18		11 21,2	-03 56	34	0	17,00
1260	260,23	57,70		11 23,8	+02 20	90	2	17,50
1273	269,80	50,47		11 26,8	-06 46	68	1	17,60
1295	270,95	50,32		11 29,1	-07 15	61	1	17,10
1296	269,14	52,40		11 29,2	-04 53	36	0	17,00
1308	268,55	53,57	0,0481	11 30,3	-03 42	37	0	15,70
1320	271,12	52,33		11 33,3	-05 32	40	0	17,60
1334	271,04	54,00	0,0555	11 36,3	-04 02	39	0	15,70
1364	270,78	56,82	0,1070	11 41,1	-01 29	74	1	16,00
1373	272,04	56,47	0,1314	11 42,9	-02 07	94	2	17,20

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1376	271,25	57,73		11 43,7	-00 48	50	1	16,60
1386	272,85	57,20		11 45,8	-01 40	66	1	17,20
1389	272,80	57,81		11 46,8	-01 06	40	0	16,60
1392	272,63	58,66	0,1382	11 48,0	-00 18	46	0	16,60
1398	277,96	52,25		11 48,4	-07 23	50	1	17,80
1399	274,91	56,46	0,0913	11 48,6	-02 49	82	2	16,00
1404	275,19	56,84		11 49,8	-02 32	39	0	16,60
1407	274,87	57,94		11 51,0	-01 28	56	1	17,00
1411	274,63	59,22		11 52,7	-00 15	69	1	17,50
1419	274,85	59,58		11 53,7	+00 02	73	1	17,00
1422	279,95	53,40		11 54,6	-06 45	48	0	17,80
1434	281,25	53,52		11 57,7	-06 54	34	0	17,20
1445	277,29	60,21		11 59,2	+00 07	81	2	17,60
1448	282,13	54,07		12 00,4	-06 33	70	1	16,60
1453	281,18	56,19		12 01,1	-04 22	43	0	17,80
1458	281,63	55,84		12 01,6	-04 47	48	0	17,30
1469	283,41	54,02		12 03,2	-06 50	84	2	17,20
1482	284,79	55,86		12 08,4	-05 18	34	0	17,20
1485	284,13	57,53		12 08,9	-03 36	35	0	17,60
1517	288,10	56,93		12 16,6	-04 44	35	0	16,60
1525	287,73	60,86	0,2590	12 19,5	-00 52	186	3	18,00
1530	286,44	64,04		12 20,3	+02 22	151	3	17,80
1533	288,01	63,00	0,2319	12 22,0	+01 11	119	2	18,00
1564	293,37	64,41		12 32,4	+02 07	33	0	16,60
1577	295,60	62,40		12 35,3	+00 00	73	1	17,80
1588	298,30	57,99		12 39,0	-04 31	48	0	17,20
1612	301,06	60,05		12 45,1	-02 32	33	0	17,60
1620	302,07	61,28		12 47,2	-01 19	42	0	17,20
1634	304,08	56,18		12 51,4	-06 25	66	1	17,60
1650	306,73	61,06	0,0845	12 56,2	-01 29	114	2	17,00
1651	306,75	58,63	0,0825	12 56,8	-03 55	70	1	16,00
1658	307,71	59,35		12 58,6	-03 10	50	1	17,20
1663	308,65	60,23		13 00,2	-02 15	56	1	17,00
1688	312,35	57,82		13 08,9	-04 25	49	0	17,60
1689	313,39	61,10	0,1810	13 09,0	-01 06	228	4	17,60
1692	313,90	61,50		13 09,7	-00 40	38	0	17,20
1698	312,88	55,42		13 11,5	-06 45	56	1	17,60
1729	318,64	58,52		13 21,4	-03 06	76	1	17,20
1733	322,85	63,73		13 23,6	+02 28	90	2	18,00
1750	322,65	59,51	0,0860	13 28,3	-01 35	40	0	15,90
1751	320,75	55,75		13 28,7	-05 29	31	0	17,60
1839	333,85	53,71		13 59,9	-04 36	63	1	17,40
1858	336,27	53,53		14 05,3	-04 05	44	0	17,60
1882	342,41	56,03		14 12,1	-00 06	166	3	17,20
1938	350,31	52,54		14 35,2	-00 03	53	1	17,20
1955	347,89	48,27		14 41,4	-04 19	47	0	17,80

Для проверки обнаружения скопленных галактик с помощью описанного вейвлет-анализа было проведено сравнение с имеющимся каталогом скоплений галактик [10]. Результаты сравнения приведены на рис. 11.

Наблюдается хорошее совпадение ярких областей со скоплениями галактик. Из 90 скоплений примерно 70 попало на яркие области (с учетом указанного выше эффекта сдвига). Это означает, что описанная методика вейвлет-анализа позволяет обнаружи-

вать скопления галактик с вероятностью не ниже 75 %.

Описанный метод обнаруживает больше структур, чем приведено в каталоге скоплений [10]. Это вызвано тем, что в каталоге скоплений приведены скопления, галактики в которых имеют самую большую звездную величину 18,4. В то время как в каталоге 2dFRGS содержится информация о галактиках со звездными величинами вплоть до 19,5.

### Заключение

Выше описан метод на основе вейвлет-анализа для исследования распределения галактик на небесной сфере. На примере каталога галактик 2dFRGS и каталога скоплений галактик [10] показано, что этот метод позволяет обнаруживать скопления галактик.

Обнаружены скопления галактик примерно одного класса «богатости» (по Абелю).

В дальнейшем предполагается усовершенствовать метод – разработать методику учета границ каталога для устранения эффекта сдвига. А также применить этот ме-

тод для структурного анализа других каталогов галактик.

В заключение автор выражает благодарность научному руководителю И.К. Розгачевой за постановку задачи и обсуждение работы.

### Библиографический список

1. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. – М., 1996.
2. Введение в анализ данных с применением непрерывного вейвлет-преобразования. Перевод: Грибунин В.Г. СПб.: <http://www.autex.spb.ru>.
3. Грибунин В.Г. Глоссарий по цифровой обработке сигналов. Предварительная версия. СПб.: <http://www.autex.spb.ru>.
4. Girardi M., Biviano A., Giuricin G., Mardirossian F., Mezzetti M. *Astrophys. J.* 1993, Vol. 404, P. 38.
5. Pisani A. *Mon. Not. R. astr. Soc.* 1993, Vol. 256, P. 706.
6. Slezak E., Bijaoui A., Mars G. *Astron. & Astrophys.* 1989, Vol. 227, P. 301.
7. D.P. Hardin and E. B. Saff, Discretizing manifolds via minimum energy points, *Notices of the Amer. Math. Soc.* (2004), to appear. Vol. 51. No. 10. P. 1186-1194.
8. <http://www.math.vanderbilt.edu/~esaff>
9. MIDAS Users Guide, 1995, Volume A, B.
10. Rich Clusters of Galaxies (Abell+ 1989). Revised northern «Abell Catalog».

## СВЯЗЬ ВАРИАЦИЙ ПОТОКА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ ВБЛИЗИ ЗЕМНОЙ КОРЫ С ГЕОДИНАМИКОЙ И ПРОЦЕССАМИ В КОСМИЧЕСКОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Б.М. КУЖЕВСКИЙ, НИИЯФ МГУ,  
О.Ю. НЕЧАЕВ, МГУ,  
Е.А. СИГАЕВА, НИИЯФ МГУ

Исследования нейтронов в атмосфере проводятся уже более 60-ти лет. В многочисленных экспериментах, проводившихся различными исследователями [16, 24–27], была измерена величина абсолютного потока тепловых нейтронов на уровне моря. Она составила от 24 до 144 нейтронов (см<sup>2</sup> сутки). Столь значительное расхождение объясняется тем, что эксперименты производились в разное время и в различных точках земной поверхности.

Был получен энергетический спектр нейтронов в атмосфере в интервале от тепловых энергий до 500 МэВ [28], установлены широтная [29–31] и высотная [32–37] зависимости медленных нейтронов в атмосфере. Однако все эти работы объединяет одно: в них отсутствуют измерения в приземном слое. В обзорной работе [38] достаточно подробно рассматриваются экспериментальные результаты и теоретические расчеты, касающиеся пространственного распределе-

ния нейтронов в атмосфере и их энергетического спектра. В частности, отмечается отличие высотного распределения и энергетического спектра нейтронов вблизи земной поверхности по сравнению со свободной атмосферой. Кроме того, указывается, что если для высот от двух до десяти километров количество тепловых нейтронов по разным данным [39] составляет от 15 % до 30 % от общего числа нейтронов, то для приземного слоя около 80 % нейтронов является тепловыми.

Начиная с 30–60-х годов XX века активное развитие получила ядерная геология, а с ней и ядерная геофизика [22]. В частности, были разработаны методы анализа

содержания различных веществ в пробах, основанные на ядерных реакциях ( $n, p$ ), ( $n, \alpha$ ), ( $\alpha, n$ ), ( $\gamma, \alpha$ ). Кроме того, существуют методы нейтронного и гамма-каротажа, т.е. геофизического исследования скважины с целью выявления полезных ископаемых, основанные на измерении соответственно нейтронов и гамма-излучения вдоль ствола скважины [11]. Исследования, проведенные в 80-х годах японскими учеными [40, 41], посвящены возможности измерять содержание влаги в почве, толщину снежного покрова и исследовать льды на ледниках посредством нейтронов, порождаемых космическим излучением вблизи земной поверхности.

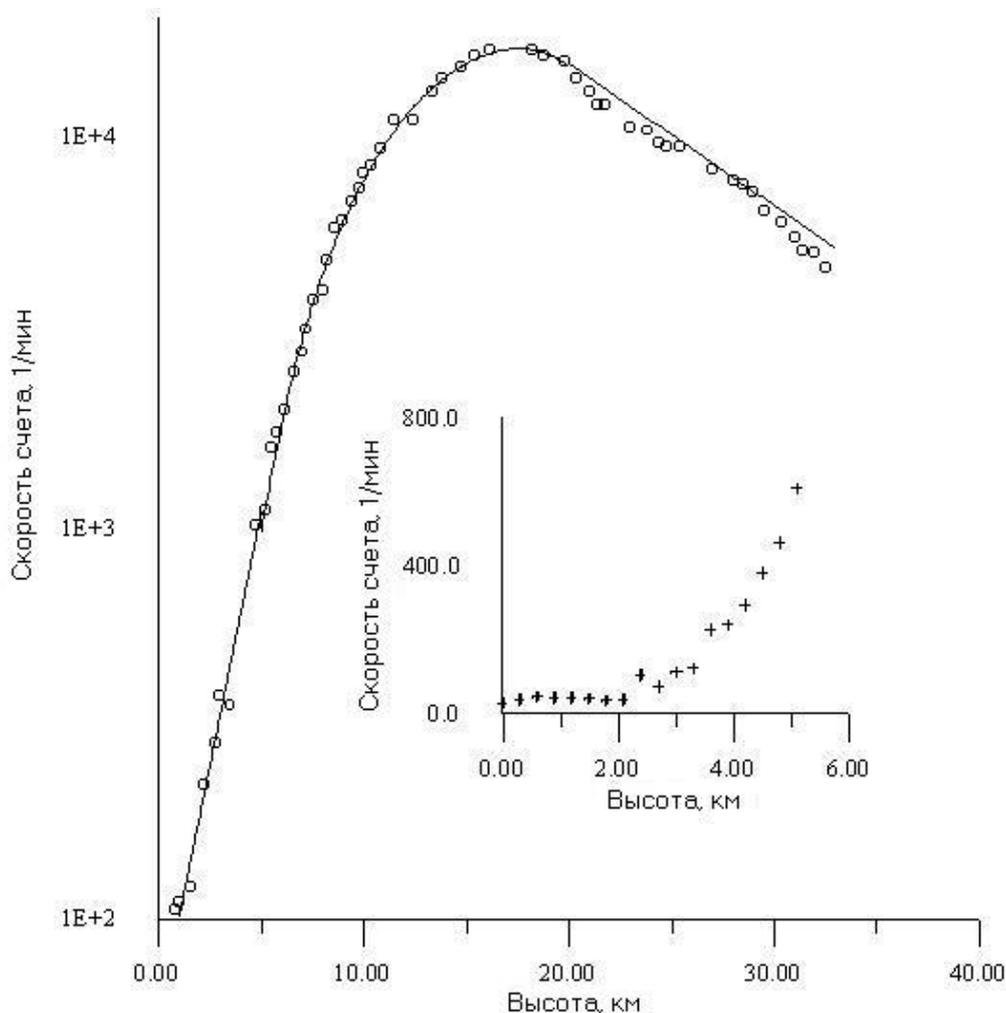


Рис. 1. Высотная зависимость скорости счета нейтронов, полученная в эксперименте на аэростате в г. Апатиты на Кольском полуострове. Кругами отмечены экспериментальные точки. На врезке более подробно приведены показания аппаратуры на малых высотах (до 6 км)

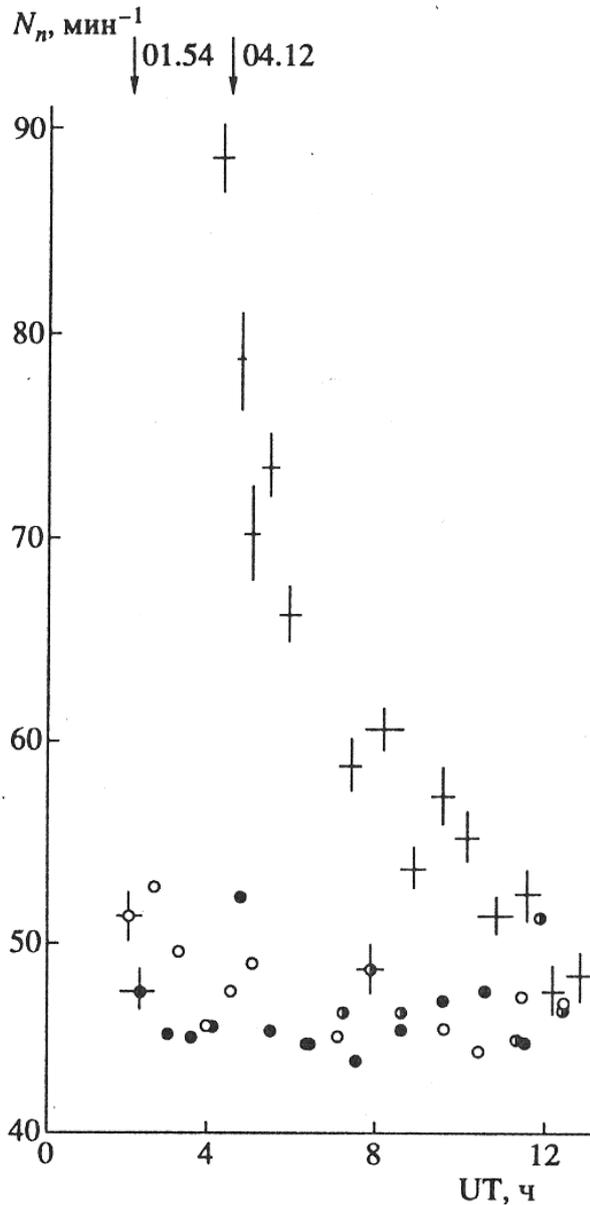


Рис. 2. Скорость счета тепловых и медленных нейтронов 22 июля 1990 года (кресты) и в соседние дни (21.07.1990 – полупрозрачные кружки и 23.07.1990 – светлые кружки), стрелками обозначено время начала и окончания полного солнечного затмения. Измерявшаяся одновременно с нейтронами скорость счета электронов с энергией более 150 кэВ не испытывала значительных вариаций

Как уже отмечалось, основной проблемой при изучении высотного хода нейтронов является то, что, как правило, довольно трудно получить информацию в области от приземного слоя до высоты 2–3 км. Это

связано с большой скоростью подъема аэростатов или шаров-зондов, на которых располагается научная аппаратура, – порядка 300 метров в минуту, а также с малой абсолютной величиной потока нейтронов на этих высотах. Более поздние исследования распределения нейтронной компоненты ядерного излучения в атмосфере Земли по высоте, с помощью разработанного в Отделе космофизических исследований НИИЯФ МГУ детектора с большой светосилой (порядка 1200 см<sup>2</sup> в диапазоне тепловых и медленных нейтронов) привели к обнаружению следующего факта: распределение нейтронов такой энергии не имеет явной высотной зависимости до высоты порядка 1,5–2 км. (рис. 1).

Для больших высот высотная зависимость аппроксимируется функцией:

$$N(h) = \begin{cases} 50.3h^{2.1} \exp(-0.03h) & 2 \leq h < 8 \\ 50.3h^{2.1} \exp(-0.03h) + \left(1 + \frac{h_{\max} - h}{5}\right)h^3, & 8 \leq h \leq h_{\max} \\ 250(116 - 3h) & h > 18 \end{cases}$$

где  $h$  – высота в км,  $h_{\max} = 17$  км [14].

Следует отметить, что эти выводы, а также положение максимума высотного хода хорошо согласуются с результатами других авторов, полученными в более ранних экспериментах [1, 32–36].

Исследования, проводившиеся на Памире в 1987 и 1989 годах, позволили измерить величины потоков нейтронов на различных высотах от 1800 м до 5000 м [3]. Они составили от  $(1,2 \times 10^{-3})$  до  $(3 \times 10^{-3})$  см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>, что находится в хорошем соответствии с ранее полученными данными [4, 5, 42].

В одном из самых первых экспериментов в 1990 году на Памире [6, 43] было зарегистрировано мощное возрастание потока тепловых и медленных нейтронов, совпавшее по времени с солнечным затмением (рис. 2). Подобные возрастания наблюдались затем в различное время, а также и в других местах не только в связи с солнечными, но и в связи с лунными затмениями [7], но и во время полнолуний и новолуний [44]. В связи с этим возникло предположение о том, что возмущения такого типа могут быть связаны с прохождением в земной коре гравитационной приливной волны.

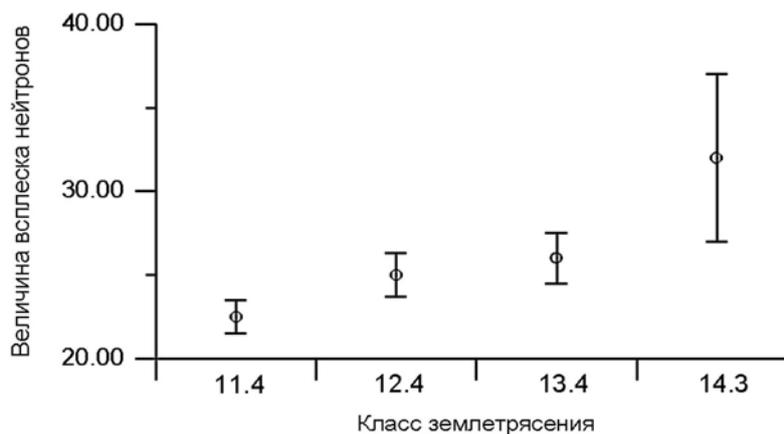


Рис. 3. Зависимость величины потока нейтронов, зарегистрированного на Тянь-Шане (район Медео), от класса землетрясений, эпицентр которых находился от 120 до 900 км от места регистрации

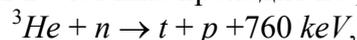
С марта 1996 по май 1998 года проводился эксперимент по изучению вариаций потока нейтронов в сейсмически активной области [17]. При этом регистрирующая аппаратура была установлена в штольне сейсмостанции «Медео» (Республика Казахстан), что позволило значительно ослабить космическое излучение, а регистрировать в основном нейтроны от земной коры. В результате было установлено, что в период, предшествующий землетрясению, возникают аномально большие по амплитуде всплески нейтронного потока, и предположительно существует нелинейная возрастающая связь между энерговыделением в землетрясении и амплитудой нейтронного всплеска (рис. 3).

#### Экспериментальная установка для изучения потоков тепловых нейтронов вблизи земной коры

В конце 1992 года в лаборатории нейтронных исследований Отдела космофизических исследований НИИЯФ МГУ начинает работать экспериментальная установка ДЯИЗА (Детектор ядерного излучения Земли и атмосферы), регистрирующая тепловые нейтроны.

В нее входят стандартные нейтронные счетчики СИ-19Н диаметром 3 см и длиной 22 см. Рабочая площадь счетчика 51 см<sup>2</sup>. Счетчики наполнены газом <sup>3</sup>He при давлении 405,3 кПа. Эффективность регистрации нейтронов гелиевыми счетчиками растет с уменьшением энергии нейтронов и для

для тепловых нейтронов составляет 0,8. Максимальный поток регистрируемых нейтронов равен  $(2 \times 10^3) \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ . Регистрация нейтронов в счетчике проходит по реакции:



сечение которой максимально  $(5300 \pm 200 \text{ бн})$  для тепловых нейтронов.

Кроме того, в состав установки входят блоки для регистрации заряженной компоненты ядерного излучения в атмосфере, состоящие из счетчиков Гейгера и для регистрации гамма-квантов (с энергией более 50 КэВ, более 300КэВ и более 2 МэВ) состоящие из кристаллов NaJ(Tl).

В настоящее время установка работает в модификации, схема которой представлена на рис. 4. Между двумя группами счетчиков, с каждой из которых выводится информация, проложен лист кадмия толщиной 1 мм. Таким образом, верхняя группа счетчиков регистрирует тепловые нейтроны из верхней полусферы, а нижняя – из нижней. В случае наличия анизотропных потоков наблюдалось бы резкое различие данных с этих двух групп. Информация с каждого из нейтронных каналов каждую секунду заносится в память компьютера.

В результате анализа данных по тепловым нейтронам, полученных на установке ДЯИЗА, были получены следующие основные результаты:

1. Нейтроны с энергией менее 0,45 эВ вблизи земной коры составляют 72 % от полного потока нейтронов.

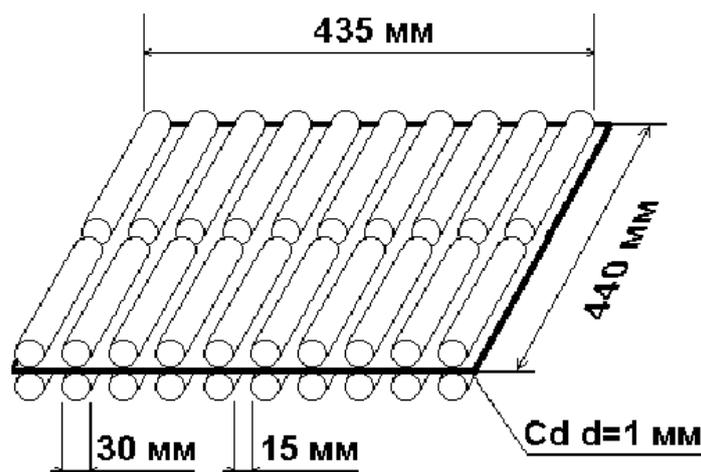


Рис. 4. Схема двух информационных каналов установки ДЯИЗА

2. Поток тепловых нейтронов вблизи земной коры характеризуется анизотропией, величина которой для 90 % периодов не превышает 10–15 %. Коэффициент анизотропии носит сезонный характер, т.е. в летние месяцы преобладают потоки нейтронов от Земли, а в зимние месяцы – к Земле.

3. Установлена корреляция между фазами Луны (новолуниями и полнолуниями) и возрастаниями потока тепловых и медленных нейтронов вблизи земной коры в сейсмически спокойном районе.

4. Найдена аппроксимационная функция для распределений вероятности регистрации секундной скорости счета нейтронов. Она представляет собой сумму распределения Пуассона и логнормального распределения, первое из которых описывает вероятность регистрации малого числа нейтронов, а второе – вероятность регистрации большого числа нейтронов

$$f(m) = a_1 \times \frac{\lambda^m}{m!} \times e^{-\lambda} + a_2 + b \times e^{-0.5 \times \left(\frac{\ln(m/c)}{d}\right)^2}.$$

Изложенные факты указывают на то, что помимо хорошо известного источника нейтронов в земной атмосфере – космических лучей – вблизи земной коры присутствует еще как минимум один источник нейтронов. Его роль может выполнять сама земная кора за счет содержащихся в ней радиоактивных газов – Радона, Торона и Актинона. Проведенные расчеты показали, что вклад радиоактивных газов в концентрацию

нейтронов с энергией  $E \leq 0,45$  эВ составляет для различных областей от нескольких процентов почти до ста процентов.

Таким образом, земная кора является активным источником нейтронов, действие которого испытывает значительные временные и пространственные вариации, а основной вклад которого обусловлен наличием в земной коре естественных радиоактивных газов.

#### Связь вариаций нейтронного излучения вблизи земной коры с геодинамическими процессами

Из всего вышеизложенного следует, что, поскольку в поток тепловых нейтронов вблизи земной коры заметный вклад вносят естественные радиоактивные газы, то любые изменения условий выхода этих газов будут приводить к вариациям нейтронного излучения. То есть потоки нейтронов чутко реагируют на состояние земной коры и на все динамические процессы, происходящие в ней, и, по-видимому, очень интенсивно влияют на процессы, предшествующие землетрясениям и активизации вулканической деятельности.

На установке ДЯИЗА в течение последних нескольких лет зафиксировано около десяти случаев регистрации возрастаний нейтронного потока, связанных с землетрясениями. При этом следует учитывать, что Москва расположена в сейсмически спокойной зоне и эпицентры землетрясений, сопровож-

дававшихся откликами в нейтронном потоке, располагались на расстоянии тысяч километров от экспериментальной установки.

В настоящее время все большее внимание уделяется разработке методов краткосрочного прогнозирования землетрясений, вулканической активности и возможных последствий техногенных катастроф. В этой области наряду с традиционными методами наблюдения за электрическими и магнитными свойствами пород, деформациями и наклонами земной поверхности, химическим составом и уровнем подземных вод широкое развитие получили и новые методы, например, основывающиеся на изучении электромагнитных и ионосферных эффектов, наблюдаемых перед землетрясениями. С начала 60-х годов XX-го столетия начали активно исследовать ионосферные эффекты землетрясений [10]. Особое внимание уделялось влиянию солнечной активности на динамические процессы в земной коре [2, 20] ионосферным изменениям, предшествующим землетрясениям [12, 13, 15, 22]. Эти исследования продолжаются и в настоящее время [18, 19], однако они еще не позволяют выявить четкий критерий, позволяющий прогнозировать землетрясения. Еще одним развивающимся методом прогнозирования землетрясений стали наблюдения за выходом радиоактивных газов, содержащихся в земной коре (в частности, радона) [21].

В связи с актуальностью создания надежных методов краткосрочного прогнозирования землетрясений исследование потоков тепловых нейтронов вблизи поверхности Земли приобретает особую важность. Основными преимуществами использования наблюдения за потоками тепловых нейтронов вблизи земной коры является простота методики, отсутствие сложной аппаратуры, а также непосредственная зависимость, наблюдаемая между изменениями потоков нейтронов и динамическими процессами в земной коре [21, 45, 46]. Методы, основанные на этой зависимости, могут быть использованы и для прогнозирования других катаклизмов, в процессе которых земная кора испытывает деформации, а именно, для

прогнозирования вулканической активности, естественных и техногенных катастроф.

Для того чтобы разработать методику прогнозирования землетрясений, необходимо проводить наблюдения за нейтронными потоками в сейсмически активной зоне. С этой целью с 2001 года проводится эксперимент на базе Камчатской опытно-методической сейсмологической партии Геофизической службы РАН, в рамках которого в нескольких километрах от Петропавловска-Камчатского работает экспериментальная установка, аналогичная установке ДЯИЗА. На рис. 5 представлен пример экспериментальных данных, полученных на этой установке за сутки до землетрясения магнитудой около 5 баллов, эпицентр которого располагался в 285 км от нейтронной экспериментальной установки.

Несколько лет назад ученые из Тбилисского института геофизики сообщили, что, согласно их исследованию, сильные землетрясения происходят в течение трех дней вокруг дня пересечения Землей секторных границ межпланетного магнитного поля.

Нами был проведен независимый анализ временного распределения моментов сильных землетрясений относительно дня смены секторов межпланетного магнитного поля на основе нового статистического материала. На рис. 6 представлен результат этого исследования. В распределение вошли землетрясения по всей Земле за интервал 1973–1992 гг. Общее число землетрясений с магнитудой  $M > 6.3$  для этого периода составило 1160, но из-за неполноты данных по знаку межпланетного магнитного поля [47] в построении распределения участвовали 772 из них. Более двух третей этих землетрясений произошло в течение пятидневного интервала вокруг дня смены полярности межпланетного магнитного поля. Полученный результат показывает, что сейсмическая активность Земли усиливается в периоды смены знака межпланетного магнитного поля вблизи Земли, то есть под действием электромагнитострикционного механизма на земную кору.

8-9 2002

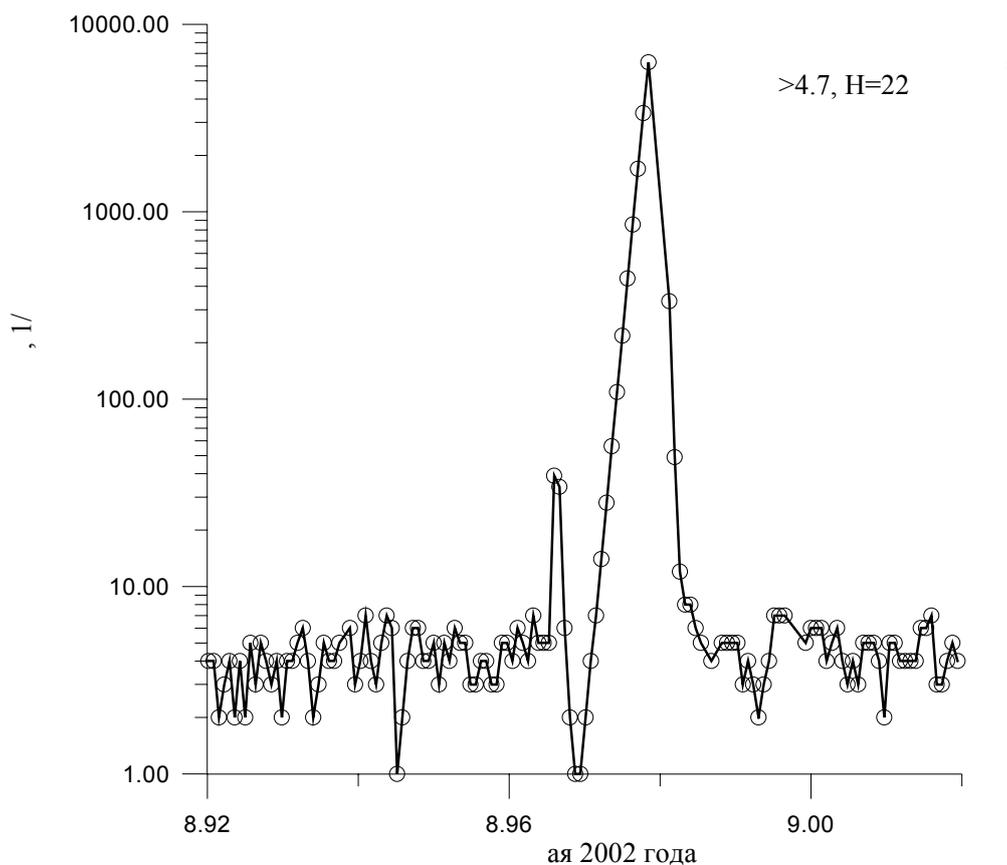


Рис. 5. Временной ход потока нейтронов 8–9 мая 2002 года по данным Камчатской установки за сутки до землетрясения

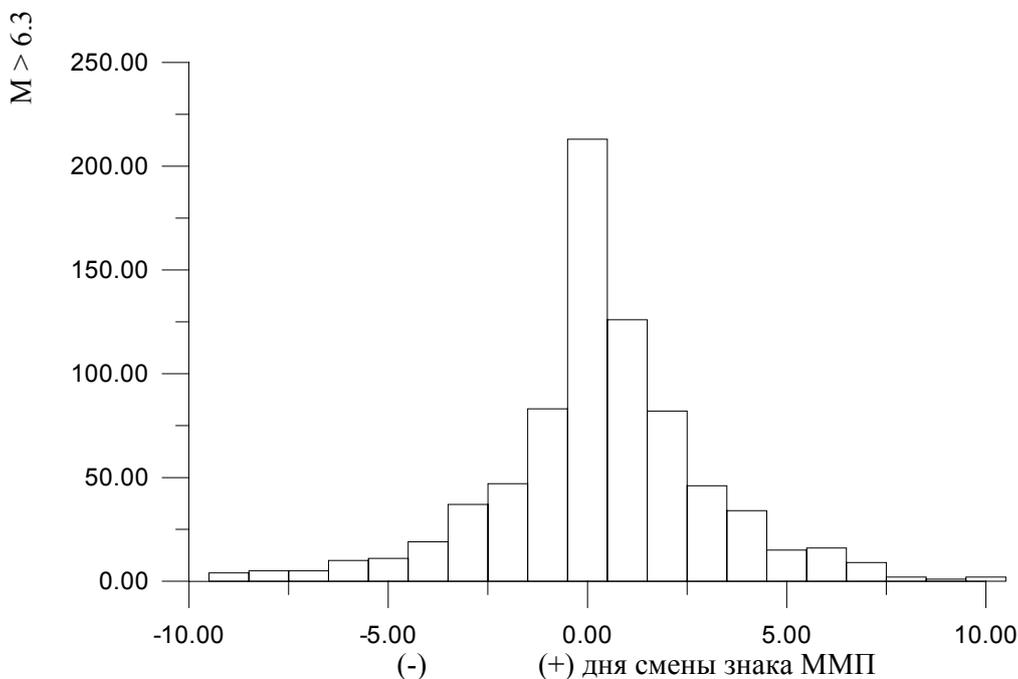


Рис. 6. Распределение землетрясений с  $M > 6.3$  в зависимости от их удаленности от дня смены знака ММП (на массиве из 772 землетрясений за период 1973–1992 гг. по всей поверхности Земли)

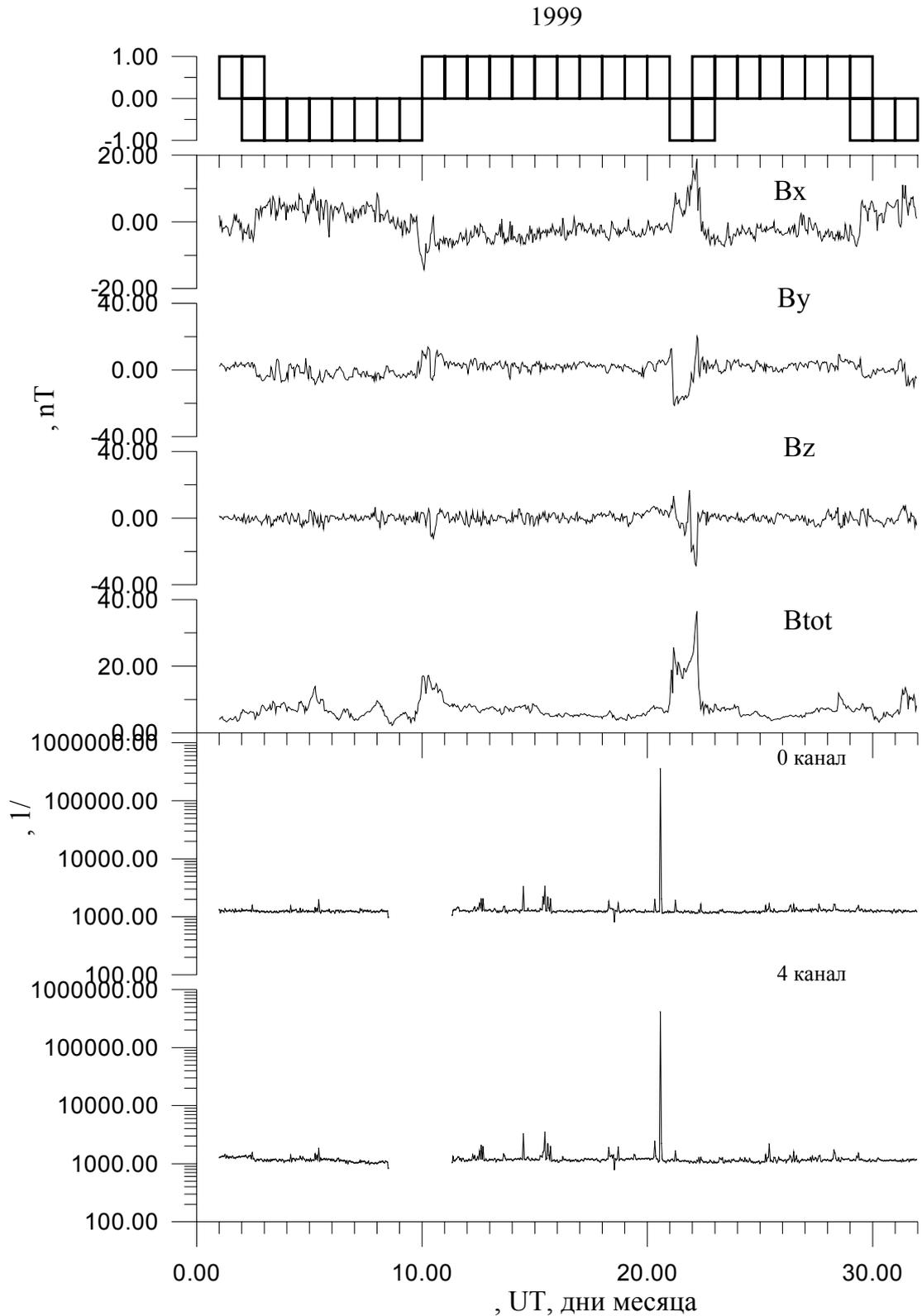


Рис. 7. Всплески интенсивности нейтронного излучения в октябре 1999 года в Москве в связи со сменой полярности ММП и связанными с этим сильными вариациями напряженности ММП. 0 и 4 каналы регистрировали нейтроны со всех направлений

5-6 1999

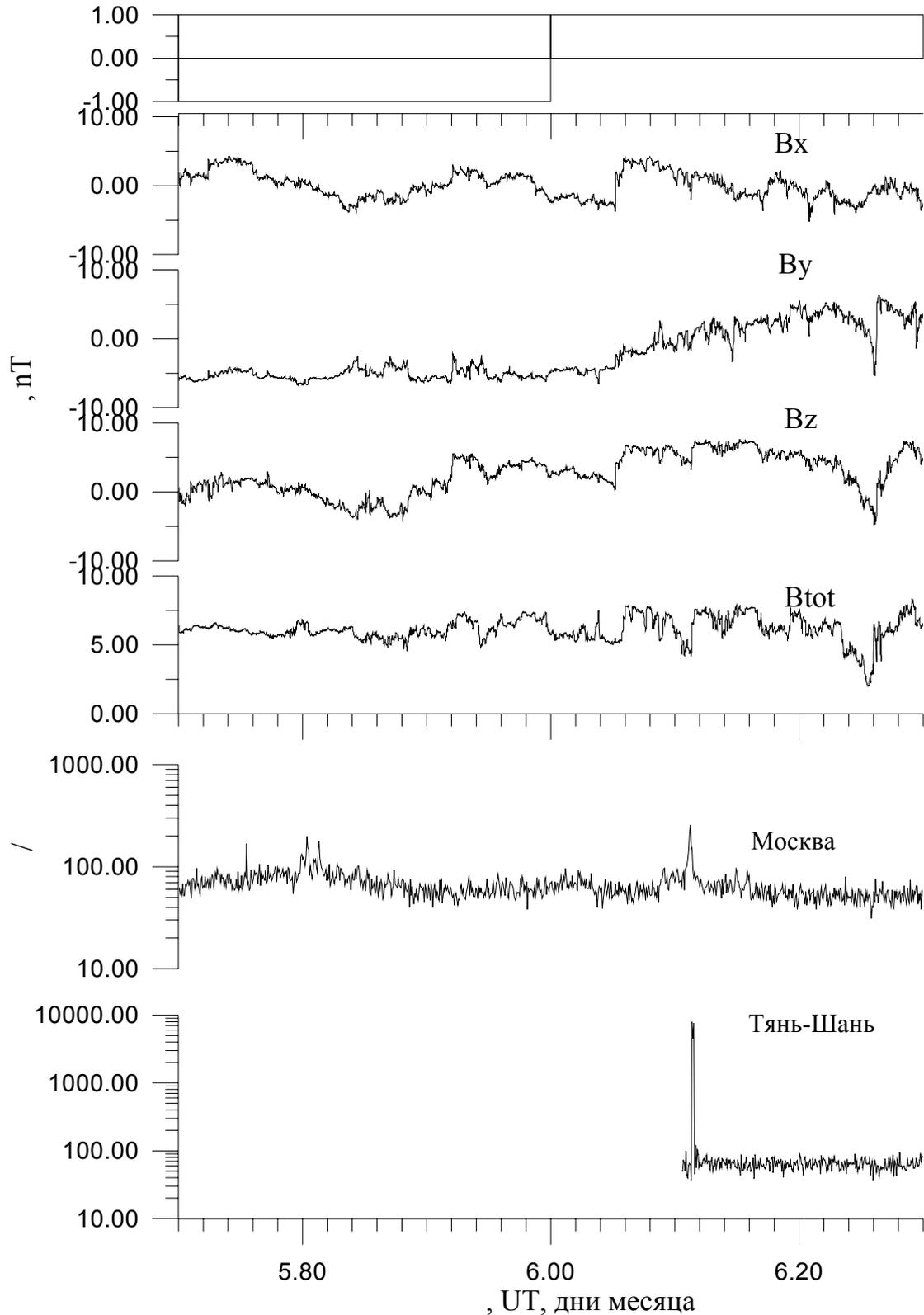


Рис. 8. Всплески интенсивности нейтронного излучения 6 августа 1999 года на Тянь-Шане и в Москве в день смены полярности ММП и связанными с этим сильными вариациями напряженности ММП. Установки в Москве и на Тянь-Шане регистрировали нейтроны со всех направлений

### **Связь вариаций нейтронного излучения вблизи земной коры с вариациями межпланетного магнитного поля**

Полученные результаты подтвердили имевшееся предположение о том, что потоки тепловых нейтронов вблизи земной коры являются отражением процессов, происходящих в космическом пространстве. Причем природа такой связи не всегда заключается в изменении потока космических частиц, генерирующих нейтроны в земной атмосфере.

Исследования вариаций нейтронного излучения вблизи земной коры показали, что при изменении полярности межпланетного магнитного поля (ММП) на земную кору оказывается воздействие, приводящее к появлению нейтронного излучения от земной поверхности. В основу анализа была положена информация за 39 месяцев с 1999 по 2003 год [9]. За это время полярность ММП около Земли изменялась примерно 116 раз. Как правило (в 95 % случаев), изменение полярности ММП сопровождается сильными вариациями напряженности ММП, напряженность поля меняется в несколько раз, иногда на порядок. Нейтронная аппаратура за это время зарегистрировала более 350 всплесков интенсивности нейтронного излучения, из которых 80 по времени совпали с изменениями полярности и началом вариаций напряженности ММП, а около 40 – с сильными вариациями напряженности поля, не сопровождавшимися сменой его полярности. На рис. 7 приведен пример регистрации нейтронных всплесков при смене полярности ММП на установке ДЯИЗА. Кроме всплесков нейтронного излучения, на рисунках схематично показана полярность ММП и величина напряженности полного поля и его компонент [47].

Благодаря тому, что одновременно с установкой в Москве в 1999 году проводилась регистрация нейтронов на Тянь-Шане, удалось зафиксировать возмущения, связанные с пересечением границ ММП, одновременно в этих двух точках, отстоящих друг от друга на расстоянии нескольких тысяч ки-

лометров. Из рис. 8, на котором приведен пример такого события, видно, что потоки нейтронов в Москве и на Тянь-Шане возрастали одновременно с точностью до нескольких минут.

В проводившихся ранее экспериментах по одновременной регистрации потока тепловых и медленных нейтронов вблизи земной коры (в Москве и на Памире, Тянь-Шане и Камчатке) было замечено, что возмущения, связанные с лунными фазами, в различных точках наблюдаются в различное время.

Объяснением этого может служить то, что причиной возмущений потока тепловых нейтронов, связанных с новолуниями и полнолуниями, является приливная волна, которая приходит в различные точки земной поверхности в разное время. Пересечение Землей границ ММП, по-видимому, воспринимается в различных точках Земли как одновременное событие.

Причиной возникновения возмущений в потоке тепловых и медленных нейтронов вблизи земной коры может послужить все тот же электромагнитоотрицательный эффект, что и в случае сейсмической активности. Он заключается в том, что при изменении межпланетного магнитного поля земная кора испытывает напряжения и деформации, которые приводят как к усилению сейсмической активности, так и к возмущениям потока тепловых и медленных нейтронов.

### **Заключение**

Проведенное исследование показывает, что потоки тепловых нейтронов вблизи земной коры отражают как явления, происходящие в космическом пространстве, так и геодинамические процессы. Вероятнее всего, причина связи вариаций потока нейтронов со сменой секторов межпланетного магнитного поля вблизи Земли заключается в электромагнитоотрицательном механизме, при котором изменения напряженности магнитного поля приводят к деформациям земной коры. В свою очередь, эти деформации вызывают изменение условий выхода, а сле-

довательно, и концентрацию естественных радиоактивных газов, альфа-частицы от распада которых при взаимодействии с элементами атмосферы и земной коры вносят существенный вклад в поток нейтронов у земной поверхности.

Цель дальнейших исследований заключается в том, чтобы наряду с физическим обоснованием описанного механизма выявить характерные черты нейтронных вариаций, связанных с пересечением Землей секторных границ межпланетного магнитного поля, и возрастных нейтронного потока, обусловленных геодинамическими процессами в земной коре (например, подготовкой к землетрясению или активизацией вулканической деятельности). Это исследование создаст основу для разработки методики мониторинга сейсмической активности и поможет использовать данные по потокам тепловых нейтронов для краткосрочного прогнозирования землетрясений и других геодинамических процессов.

#### Библиографический список

1. Барсуков О.А., Коломеец Е.В. Радиационные аспекты исследования космического излучения в стратосфере. – М., 1985. – С. 58–59.
2. Барляева Т.В., Морозова А.Л., Пудовкин М.И. Влияние космических факторов на развитие землетрясений // Материалы Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Геофизика-99». – СПб. 9-12 ноября 1999г. – С. 8–19.
3. Володичев Н.Н., Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И., Шаврин П.И. Регистрация нейтронов и гамма-квантов космического происхождения на аэростатах // Препринт НИИЯФ МГУ 90-3/149, 1990.
4. Володичев Н.Н., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И., Шаврин П.И. Измерение потока электронов, образованных бета-распадом нейтронов в нижней атмосфере в 1977–1987 гг. // Материалы Всесоюзной конференции по космическим лучам. – Алма-Ата: Изд. КазГУ, 1988. – Ч.2. – С.141–143.
5. Володичев Н.Н., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И., Шаврин П.И. Природа избытка электронов с  $E < 1$  МэВ в нижней атмосфере Космические лучи. – Изд. Межведомственного Геофизического Комитета РАН, 1992. – № 26. – С 92–97.
6. Володичев Н.Н., Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю. и др. Резкое возрастание потока нейтронов во время солнечного затмения 22 июля 1990 года // Космические исследования. – 1992. – Т. 30. – №3. – С. 422–424.
7. Володичев Н.Н., Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И., Шаврин П.И. Всплеск интенсивности нейтронов во время полутеневого лунного затмения 26 июля 1991 года // Космические исследования. – 1993. – Т. 31. – Вып. 4. – С.120–122.
8. Володичев Н.Н., Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Панасюк М.И., Подорольский А.Н., Шаврин П.И. Солнечно-лунно-земные связи: всплески нейтронного излучения и сейсмоактивность // Астрономический вестник. – 2000. – Т. 34. – № 2. – С. 188–190.
9. Володичев Н.Н., Кужевский Б.М. Гравитационное взаимодействие небесных тел и всплески нейтронного излучения от их поверхности // Космические исследования. – 2003. – Т. 41. – № 2. – С. 135–139.
10. Гайворонская Т.Б. Влияние сейсмической активности на ионосферу (обзор). – Препринт ИЗМИРАН. – 1991. – № 36 (983).
11. Горшков Г.В., Лятковская Н.М. Нейтронный каротаж // Вестник ЛГУ. – 1946. – № 2.
12. Гохберг М.Б., Колоколов Л.Е., Липеровский Л.А. и др. О возмущениях в F-области ионосферы перед сильными землетрясениями // Известия АН СССР, Физика Земли, 1988. – № 4. – С. 12–20.
13. Канониди Х.Д., Колоколов Л.Е., Мараховским А.В. Пространственно-временная динамика ионосферных возмущений типа ( $\delta f_0 F_2$ ) и ионосферные предвестники землетрясений. – Препринт ИЗМИРАН. – 1990. – № 33 (918).
14. Кужевский Б.М., Нечаев О.Ю., Шаврин П.И. Анизотропия тепловых нейтронов в атмосфере Земли // Геомагнетизм и аэрономия. – 1995. – Т. 35. – № 2. – С. 166–170.
15. Липеровский В.А., Похотелов О.А., Шалимов С.Л. Ионосферные предвестники землетрясений. – М.: Наука, 1992. – 315 с.
16. Лятковская Н.М., Горшков Г.В. Доклады АН СССР, 1939. – № 25. – С. 745.
17. Остапенко В.Ф., Жусупов М.А., Красноперов В.А., Узбеков Н.Б., Кужевский Б.М. Изучение вариаций потока нейтронов в сейсмически активной местности как предвестника землетрясений // Физические проблемы экологии. – 1999. – № 5. – С.149–152.
18. Попов К.В. Возмущения в E и F областях среднеширотной ионосферы при сейсмической активности // Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2002.

19. Силина А.С. Некоторые эффекты в ночной среднеширотной ионосфере перед землетрясениями // Автореф. дисс. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2002.
20. Сытинский А.Д. Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. – Л.: Гидрометеоздат, 1987.
21. Уткин В.И. Газовое дыхание Земли, <http://www.nature.ru/>
22. Филиппов Е.М. Ядерная геофизика. В 2 тт. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1973.
23. Хакимов Ф.Х., Липеровский В.А., Шалимов С.Л. О возмущениях в ионосфере перед рядом землетрясений в Таджикистане 1987 года // Доклады АН Таджикской ССР, 1989. – Т. 32. – № 12. – С. 824–827.
24. Montgomery C.G., Montgomery D.D. “The Intensity of Neutrons of Thermal Energy in the Atmosphere at Sea Level” *Phys.Rev.*, v.56, p.10-12, 1939.
25. Yuan L.C., Ladenburg R. *Bull.Amer.Phys.Society*, v.23, p.21, 1948.
26. Yuan L.C.L. “On the Measurement of Slow Neutrons in the Cosmic Radiation on a B-29 Plane” *Phys.Rev.*, v.76, p.1268, 1949.
27. R.C.Hames and S.A.Korff “Slow-Neutron Intensity at High Balloon Altitudes”, *Phys.Rev.*, v.120, p. 1460-1462, 1960.
28. Hess W.N., Chupp E.L. “Cosmic Ray Neutron Energy Spectrum” *Phys.Rev.*, v.116, p.445-457, 1959.
29. Staker W.P. “A Determination of the High Altitude Latitude Dependence in Cosmic-Ray Neutron Intensity” *Phys.Rev.*, v.80, p.52-57, 1950.
30. Simpson J.A., Uretz R.B. “On the Latitude Dependence of Nuclear Disintegrations and Neutrons at 30,000 Feet” *Phys.Rev.*, v.76, p.569-570, 1949.
31. Yuan L.C.L., “On the Latitude Dependence of the Absolute Neutron Intensities in Cosmic Radiation” *Phys.Rev.*, v.76, p.1267-1268, 1949.
32. Yuan L.C.L. “The Neutron Density in the Free Atmosphere up to 67,000 Feet” *Phys.Rev.*, v.74, p.504-505, 1948.
33. Yuan L.C.L., “The Neutron Density in the Free Atmosphere up to 100,000 Feet” *Phys.Rev.*, v.77, p.728-729, 1950.
34. Yuan L.C.L., “Distribution of Slow Neutrons in Free Atmosphere up to 100,000 Feet” *Phys.Rev.*, v.81, p.175-184, 1951.
35. Davis W.O. “Energy and Density Distribution of Cosmic Ray Neutrons” *Phys.Rev.*, v.80, p.150-154, 1950.
36. Fowler W.B. “Altitude Dependence of Neutron Production by Cosmic-Ray Particles” *Phys.Rev.*, v.79, p.178-179, 1950.
37. H. A. C. Neuburg, R. K. Soberman, M. J. Swetnick, and S. A. Korff “High-Altitude Cosmic-Ray Neutron Density at the Geomagnetic Pole”, *Phys.Rev.*, v. 97, pp.1276-1279, 1955.
38. H. A. Bethe, S. A. Korff, G. Placzek “On the Interpretation of Neutron Measurements in Cosmic Radiation”, *Phys.Rev.*, v. 57, pp.573-587, 1940.
39. H.M. Agnew, W.C. Bright and Darol Froman “Distribution of the Neutrons in the Atmosphere”, *Phys. Rev.*, v.72, pp. 203-206, 1947.
40. Masahiro Kodama “Ground albedo neutrons produced by cosmic radiation”, *Journal Of the Physical Society of Japan*, Vol.52, No 5, May 1983, pp.1503-1504.
41. Masahiro Kodama, Shoko Kudo, Takatoshi Kosuge “Application of atmospheric neutrons to soil moisture measurement”, *Soil Science*, Vol.140, No.4, October 1985, pp.237-242.
42. Nechaev O.Yu., Panasyuk M.I., Shavrin P.I., Volodichev N.N. “Neutron  $\beta$ -decay contribution to soft-electron intensity in the atmosphere”, 20<sup>th</sup> International Cosmic Ray Conference, Moscow, Nauka, 1987, V.4, pp.266-268.
43. N.N.Volodichev, B.M.Kuzhevskij, O.Yu.Nechaev, M.I.Panasyuk and P.I.Shavrin. “Strong increase of neutron flux during 22 July,1990 Eclipse” *Proc. 22<sup>nd</sup> Intern.Cosmic Ray Conf. (Dublin, Ireland, 11-23 August,1991)*. 1991.V.3.P.689-692.
44. Volodichev N.N., Kuzhevskij B.M., Nechaev O.Yu. and Shavrin P.I. “The Effect of Neutron Intensity Increase Formation during New-Moon and Full-Moon Periods”, 24<sup>th</sup> ICRC, Rome, 1995, V.4, pp.1151-1154.
45. Volodichev N.N., Kuzhevskij B.M., Nechaev O.Yu., Panasyuk M.I., Podorolskij A.N., Shavrin P.I. “Solar-Lunar-Terrestrial Interaction: Bursts of Neutron Emission and Seismic Activity”, *International Journal of Geomagnetism and Aeronomy*, 2003, v.4, №3.
46. N.N. Volodichev, B.M. Kuzhevskij, O.Yu. Nechaev, M.I. Panasyuk. “Lunar Periodicity of the Neutron Radiation Burst and Seismic Activity on the Earth” *Proc. of 26<sup>th</sup> Intern. Cosmic Ray Conf. August 17-25, 1999. Salt Lake City, Utah, USA. 1999. V. 7. P. 437-439.*
47. <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/html/polarity>.

## ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ИЗМЕНЕНИЯ ФОРМЫ ГАЗОВОГО ПУЗЫРЯ В ЖИДКОСТИ В УСЛОВИЯХ РЕАЛЬНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПОЛЕТА

А.В. КОРОЛЬКОВ, МГУЛ,  
В.Б. САПОЖНИКОВ, ЗАО «ЭКА»

В условиях реального космического полета вектор остаточных ускорений меняет свою величину и направление во времени. Положение поверхности раздела сред между жидкостью и газом в частично заполненном сосуде может меняться сложным образом. Задача определения возможных перемещений границы раздела сред в заданных условиях является важной для многих технологических процессов.

Движение поверхности раздела сред определяется движением жидкости. На жидкость действуют две силы – сила тяжести (в поле остаточных ускорений) и сила поверхностного натяжения.

Рассмотрим осесимметричный случай. Сосуд частично заполнен жидкостью. Верхняя (по отношению к начальному направлению вектора остаточных ускорений) стенка сосуда имеет сферическую форму радиуса  $R$ . Известно начальное положение поверхности жидкости. Условимся считать, что вектор ускорения меняется по величине, действуя лишь вдоль оси симметрии. Для каждого значения  $g$  существует своя равновесная форма поверхности раздела сред, при которой гидростатическое давление перепада высот, определяемое формой поверхности, уравнивается капиллярными силами. При несовпадении формы поверхности с равновесной формой для текущего значения ускорения возникают поверхностные силы, приводящие жидкость в движение. Параметрами, определяющими равновесную форму поверхности раздела сред, являются величина ускорения свободного падения ( $g$ ), коэффициент поверхностного натяжения ( $\sigma$ ) и угол смачивания жидкостью стенок емкости ( $\alpha$ ). Система дифференциальных уравнений, описывающая равновесную форму поверхности жидкости для существующей в дан-

ный момент времени перегрузки  $n(t)$ , записывается следующим образом [1]:

$$\begin{cases} r''(s) = -z'(s) \cdot (Bo \cdot n(t) \cdot z(s) + q - z'(s)/r(s)) \\ z''(s) = r'(s) \cdot (Bo \cdot n(t) \cdot z(s) + q - z'(s)/r(s)) \end{cases} \quad (1)$$

Число Бонда ( $Bo = \frac{\rho \cdot g_0 \cdot R^2}{\sigma}$ ) и масштаб времени ( $\sqrt{\frac{R}{g_0}}$ ) определены по ускорению свободного падения на Земле ( $g_0$ ).

Функции  $r(s)$  и  $z_0 + z(s)$  параметрически задают кривую, образующую поверхность. На оси симметрии ( $s = 0$ )

$$r = 0, z(0) = 0, r'(0) = 1, z'(0) = 0. \quad (2)$$

$z_0$  – положение кривой относительно начала координат,  $q$  – параметр, имеющий смысл кривизны на оси симметрии.

«Подбирая» значение  $q$ , можно добиться нужной величины угла между стенкой емкости и подходящей к ней кривой решения уравнения (1) – величины угла смачивания. Характерные решения задачи (1)–(2) представлены на рис. 1.

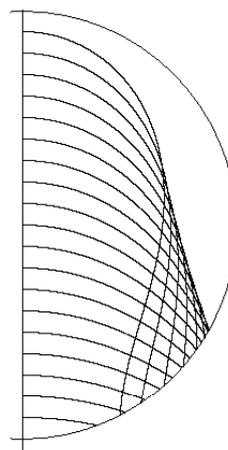


Рис. 1. Характерные решения системы (1)–(2) для  $Bo = 1500000$ ,  $n = 0,000006$  при различных  $q$  и  $z_0$

Таким образом, найти равновесную осесимметричную форму поверхности жидкости можно решая задачу Коши (1)–(2), используя параметр  $q$  для получения заданного угла смачивания ( $\alpha$ ) на стенке сосуда, а параметр  $z_0$  для обеспечения заданного объема газа ( $V_g$ ) над поверхностью жидкости.

На рис. 2. представлены равновесные формы для  $Bo = 1\,500\,000$  поверхности жидкости, полностью смачивающей стенки сосуда ( $\alpha = 0$ ), при различных значениях перегрузки  $n$ . Объем газового пузыря  $V_g = 0,093$ .

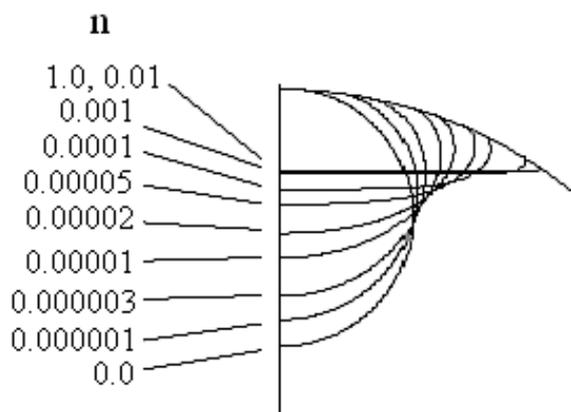


Рис. 2. Равновесные формы поверхности раздела сред при различных значениях перегрузки  $n$  для  $Bo = 1500000$ . Жидкость полностью смачивает стенки сосуда ( $\alpha = 0$ ). Объем газового пузыря  $V_g = 0,093$

В таблице приведены количественные результаты для представленных на рис. 2 вариантов. Здесь, кроме величины перегрузки  $n$ , высоты поверхности жидкости на

оси ( $z_0 + z$ ) и значения параметра  $q$ , приведены положения центра масс системы жидкость-газ и координаты мениска – точки соприкосновения поверхности со стенкой. При расчете положения центра масс системы был выбран условный объем жидкости  $V_f = 1,63$ .

Заметим, что при перегрузке свыше 0,01 форма поверхности практически не зависит от величины ускорения, а газовый объем представляет собой шаровой сегмент с плоской поверхностью раздела сред.

Каждому равновесному положению раздела сред соответствует свое положение центра масс жидкости. Изменение формы границы раздела сред сопровождается движением центра масс. Уравнение движения центра масс

$$\frac{d^2z}{dt^2} = F/M \quad (3)$$

связывает ускорение центра масс с действующей на жидкость силой  $F$ . Величину присоединенной массы  $M$  можно выбрать произвольно, например, можно считать  $M = 1$ , тогда силу  $F$  можно определить как разность сил поверхностного натяжения для равновесного и текущего положений границы раздела сред

$$F = 2 \cdot \pi \cdot (r_{fin}^0 \cdot \sin(\varphi^0) - r_{fin} \cdot \sin(\varphi)) / Bo. \quad (4)$$

Здесь индексом 0 обозначены равновесные для текущего значения  $n$  величины (радиус мениска и угол, характеризующий направление силы).

Т а б л и ц а

$n$	$z_0$	$q$	$z$	$r_{fin}$	$z_{fin}$
0	0,415242	6,760715	0,237898519	0,040366	0,999240618
0,000001	0,496479	6,018618	0,224386396	0,162918	0,986724062
0,000003	0,562094	4,839668	0,225652443	0,237466	0,971558499
0,00001	0,652705	2,423152	0,252596231	0,326472	0,945240618
0,00002	0,705822	1,015269	0,284516285	0,377285	0,926101545
0,00005	0,758938	0,114996	0,326928693	0,419369	0,901094923
0,0001	0,782372	0,007063	0,348646257	0,458283	0,881426049
0,001	0,804244	2,27E-12	0,370793806	0,550464	0,834860927
0,01	0,805611	0	0,372337184	0,576883	0,816825607
1	0,805611	0	0,372337184	0,576883	0,816825607

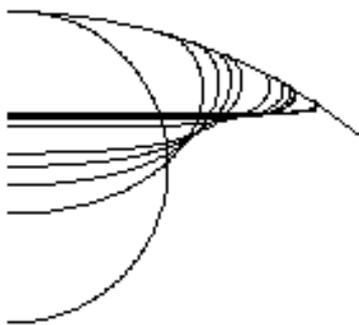


Рис. 3

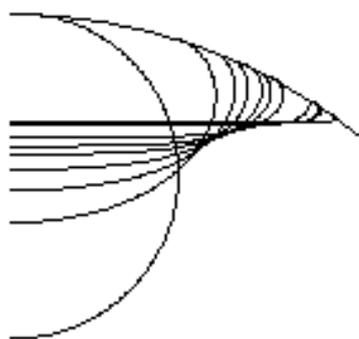


Рис. 4

Расчеты проводятся в два этапа. Сначала строится таблица параметров равновесных форм и соответствующих им координат центра масс выбранного объема жидкости. На втором этапе интегрируется по времени уравнение движения для центра масс (3). На текущем временном шаге по текущему по-

ложению центра масс из таблицы определяются реальные параметры формы поверхности, а по текущему значению остаточного ускорения – параметры равновесной формы. По формуле (4) определяется сила  $F$  для следующего шага по времени.

Вот два примера интегрирования уравнения (3):

### Пример 1

$Bo = 1500000$ ,  $V_g = 0,093$ ,  $\alpha = 0$ , в начальный момент поверхность принимает равновесную форму для перегрузки  $n = 0,001$ . Внезапно ускорение меняет свой знак. Через время 24,96 газовый пузырь принимает форму сферы. На рис.3 показаны 12 последовательных форм с шагом по времени 2,08.

### Пример 2

$Bo = 4340000$ ,  $V_g = 0,1098$ ,  $\alpha = 0$ , в начальный момент поверхность принимает равновесную форму для перегрузки  $n = 0,001$ . Внезапно ускорение меняет свой знак. Через время 22,88 газовый пузырь принимает форму сферы. На рис. 4 показаны 11 последовательных форм с шагом по времени 2,08.

### Библиографический список

1. Бабский В.Г., Копачевский Н.Д., Мышкис А.Д. и др. Гидродинамика невесомости. – М.: Наука, 1976.

## НЕОРДИНАРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

В.Л. НАТЯГАНОВ, МГУ

Одним из самых парадоксальных и достаточно редких явлений атмосферного электричества по праву считается шаровая молния (далее – ШМ), природа и структура которой до сих пор окончательно не установлены. В научно-исторической литературе считается, что вопрос о природе ШМ первым поднял Ф. Араго в «Ежегоднике» французского бюро географических долгот в 1838 г. Однако еще в 1753 г. М.В. Ломоносов в своем знаменитом «Слове о явлениях воздушных, от электрической силы проис-

ходящих» [1] однозначно высказался в пользу электрической природы ШМ (без упоминания ее современного названия), на что впервые обращено внимание в [2]. Следует подчеркнуть, что Ломоносов к загадочным явлениям атмосферного электричества отнес (кроме ШМ), также «тифон»-атмосферный вихрь (смерч, или торнадо), северные сияния и восходящие линейные молнии.

Кроме этого Ломоносов в «Слове ...» дал исчерпывающий анализ всех известных в то время типов электрических разрядов в

газах почти в полном соответствии с их современной классификацией; заявил об открытии атмосферного электрического поля (АЭП) Земли с помощью электрометра Г.В. Рихмана (первого в мире электроизмерительного прибора) не только в грозовую, но и в ясную погоду; а по характеристике Я.И. Френкеля «с присущей ему силой гения сумел в своей теории правильно вскрыть самые общие моменты в процессе образования атмосферного электричества и, в частности, роль восходящих и нисходящих потоков воздуха, предвосхитив многие современные представления по этому вопросу» [3].

Все это подтверждает точку зрения Н.А. Любимова – профессора Московского университета, который в 1865 г. утверждал, что в области атмосферного электричества М.В. Ломоносов создал теорию, которая превышала все современные ему понятия об этом сложном предмете. Правда, за четверть тысячелетия со дня публикации «Слова ...» относительные успехи в изучении различных явлений природного электричества достаточно скромны. Так, лишь недавно разобрались с линейными молниями, хотя тонкая структура их строения и описание разнообразных физико-химических процессов, происходящих в разрядном канале, вызывает еще много вопросов [4]. В частности, неясна роль М-компонентов на фоне непрерывного тока в межкомпонентных паузах или недавно открытых гигантских «красных призраков» и «голубых струй» в подготовке разряда положительных молний. Детально исследован тлеющий разряд, но нет общепринятой модели огней св. Эльма, хотя качественное понимание физики явления уже достигнуто. В первой половине XX века норвежец Штермер разработал электромагнитную теорию полярных сияний, англичанин Симпсон завершил систематизацию исследований аномальных возмущений АЭП под грозовыми облаками, а вот адекватной модели смерча, или торнадо, до сих пор нет.

Это достаточно странно, ибо ежегодно в США бывает до тысячи торнадо, которые приносят многомиллионные убытки и часто сопровождаются разрушением целых

жилых кварталов и человеческими жертвами (особенно в «аллее торнадо», которая проходит через штаты Техас, Канзас и Оклахома). Математическому моделированию смерча посвящено большое число работ, которые условно можно разбить на три основных типа: чисто гидродинамические (одна из первых моделей на основе вихря Рэнкина принадлежит А. Пуанкаре), термогидродинамические (оправдавшие себя при моделировании штормов и ураганов) и электрогидродинамические. Хотя гипотеза об электрической природе смерча появилась существенно раньше (Ломоносов – 1753 г., а в 30-х годах XIX в. к этой идее независимо пришли Хейр в Америке и Пельтье во Франции), однако абсолютное большинство моделей относится к первым двум типам, когда не учитываются электрические явления или их роль считается незначительной, что принципиально не позволяет описать даже на качественном уровне некоторые характерные черты этого катастрофического явления природы [5, 22].

За последние полвека к загадкам природного электричества добавились сейсмоэлектрические явления, в том числе электромагнитные и световые предвестники (или предупреждающие огни) землетрясений, о которых кратко упоминал М.В. Ломоносов в «Слове о рождении металлов от трясения Земли» (1757) и трактате «О слоях земных» (1760) [1]. Причем различные сейсмоэлектрические процессы и торнадо часто сопровождаются появлением ШМ.

#### **Электрокапиллярно-вихревая модель и мнимые парадоксы шаровой молнии**

Самому парадоксальному феномену атмосферного электричества – ШМ – посвящена обширная литература: от научных работ известных ученых до псевдонаучных спекуляций шарлатанов от науки. Подобный разброс обусловлен тем фактом, что проблема ШМ относится к обратным задачам, когда по отдельным и порой противоречивым косвенным признакам необходимо фактически угадать истинную природу сложного многопараметрического явления. В моно-

графиях [6–9] и многочисленных обзорах приведен анализ натуральных наблюдений за ШМ случайных очевидцев и дан критический разбор теоретических типов (которых около двух десятков) моделей этой загадки природы.

В [2] представлена электрокапиллярновихревая (ЭКВ) модель ШМ, которая позволяет последовательно объяснить все основные характерные черты, свойства и мнимые парадоксы ШМ в зрелой стадии ее существования, что является необходимым условием соответствия модели реальному явлению. Тогда как предыдущие модели [6–9], основанные на абсолютизации отдельных свойств ШМ и сотне различных гипотез, приводили к противоречиям.

Систематизация наблюдательных данных в [9] позволяет дать следующее **определение**: ШМ – автономное физическое тело газообразной природы приблизительно сферической формы с наиболее вероятным диаметром  $2R = 10 - 15$  см (среднее значение  $2R = 28 \pm 4$  см), которое излучает видимый свет и может сложным образом двигаться в окружающем воздушном пространстве. Исходя из этого привожу краткий перечень основных свойств [2] этой загадки атмосферного электричества:

1) обычно ШМ «светит, но не греет» (1-й парадокс по Стаханову);

2) вещество ШМ имеет плотность воздуха, но обладает поверхностным натяжением, характерным для жидкостей (2-й парадокс по Стаханову);

3) непредсказуемость движения ШМ (вертикально или горизонтально даже против сильного ветра) можно назвать третьим парадоксом;

4) ШМ имеет электрический заряд, но какова его величина и структура (объемный или поверхностный тип простого или двойного слоя) до сих пор не ясно;

5) ШМ обладает запасом собственной энергии, однако ее величина и природа, механизмы накопления и преобразования в другие формы, а также наличие возможных каналов связи с окружающей средой до сих пор остаются загадкой.

Кроме вышеперечисленных основных свойств в обзорной литературе отмечаются и другие странности поведения ШМ: возможные левитация (квазинеподвижное зависание в воздухе) или гидрирование (движение вдоль линейных проводников типа телефонных проводов или ЛЭП), испускание узконаправленных лучей, как у фонарика и электромагнитных волн в радиодиапазоне, а также наличие «бороды» (присоединенного вихря) не только позади (в кормовой зоне), но иногда и впереди движущейся ШМ. Однако наибольшее изумление у случайных наблюдателей вызывает возникновение ШМ «из ничего» (постепенное увеличение свечения ограниченного объема воздуха сферической формы); ее парадоксальная способность проникать в закрытые помещения сквозь малые отверстия и узкие щели, что сопровождается большими деформациями ШМ с последующим восстановлением сферической формы; а также отмеченное выше движение против сильного ветра.

ЭКВ – модель ШМ возникла из электромагнитного обобщения классической задачи об электрокапиллярном движении или дрейфе (ЭКД) хорошо проводящей сферической капли с поверхностным зарядом двойного электрического слоя (ДЭС) в растворе электролита при наличии внешнего электрического поля [10–12]. Наличие ДЭС на границе ШМ является основным предположением в ЭКВ модели, при этом между задачей об ЭКД капли и ЭКВ моделью ШМ существует аналогия: роль внешнего электролита играет ионизированный воздух, проводящего вещества капли – вещество внутри ШМ типа неидеальной, кластерной или пылевой плазмы [13], внешнего электрического поля – естественное АЭП или его сильные возмущения под грозовым облаком (см. схему Симпсона в [3, 12]).

Основное отличие этих задач состоит в гидродинамике: для капли числа Рейнольдса малы ( $Re \ll 1$ ), и поэтому справедливо приближение Стокса, а для ШМ обычно  $Re \gg 1$  и необходимо использовать нелинейные уравнения Навье-Стокса. Обе задачи об ЭКД капли (при  $Re \rightarrow 0$ ) или ЭКД

ШМ в АЭП описываются в безразмерных переменных системой [2, 10–12]:

$$\begin{aligned} r > 1: \Delta \bar{u} &= \nabla p + \text{Re}(\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u}, \text{div} \bar{u} = 0, \Delta \varphi = 0; \\ r < 1: \Delta \bar{u}' &= \nabla p' + \text{Re}'(\bar{u}' \cdot \nabla) \bar{u}', \text{div} \bar{u}' = 0, \Delta \varphi' = 0; \\ r \rightarrow 0: |\varphi'|, |p'|, |\bar{u}'| &< \infty; r \rightarrow \infty: \bar{u} \rightarrow u_e \bar{k}, \nabla \varphi \rightarrow -\bar{k}; \\ r = 1: u_n = u'_n = 0, u_\theta &= u'_\theta = -v_0 \sin \theta, \quad (1) \\ -\frac{\partial \varphi}{\partial r} + \text{div}_\Sigma \bar{j}_\Sigma &= 0, \sigma_* \frac{\partial \varphi'}{\partial r} + \text{div}_\Sigma \bar{j}'_\Sigma = 0, \end{aligned}$$

$$\eta_* p'_{r\theta} = p_{r\theta} - q \nabla_\Sigma (\varphi - \varphi'), \{p_{rr}\} + 2\gamma_0 = \{p\}_{\text{Re}},$$

где  $\text{div}_\Sigma$  и  $\nabla_\Sigma$  – поверхностные дивергенция и градиент;

$\bar{u}$ ,  $p$ ,  $\varphi$  – скорость, давление и электрический потенциал;

$q$  – плотность заряда ДЭС;

$\bar{j}_\Sigma = \pm q \cdot \bar{u}_\Sigma$  – конвективный поверхностный ток внешней и внутренней обкладок тонкого ( $d/R \ll 1$ ;

$d$  – толщина ДЭС;

$R$  – радиус капли или ШМ) ДЭС;

$\sigma_* = \sigma'/\sigma$ ,  $\eta_* = \eta'/\eta$  – отношения коэффициентов электропроводности и динамической вязкости;

$u_e$  – неизвестная величина скорости ЭКД капли или ШМ, отнесенная к  $E_0 R \sqrt{\sigma/\eta}$ ;

$E_0$  – напряженность внешнего электрического поля или АЭП.

Выбор других характерных величин соответствует принятым в [11, 12], а здесь лишь подчеркнем, что в последнем соотношении  $\{p\}_{\text{Re}}$  означает скачок дополнительных давлений, зависящих от чисел Рейнольдса.

Классическое решение Левича задачи ЭКД малой капли при  $\text{Re} = 0$  дает потенциальный поток вне и сферический вихрь Хилла внутри капли, слабое однородное электрическое поле внутри и дипольное возмущение электрического потенциала снаружи, что через гидродинамическую функцию тока Стокса  $\psi$  можно представить в виде [2, 10–12]

$$\psi = \frac{1}{2} u_e \left( r^2 - \frac{1}{r} \right) \sin^2 \theta, \quad \psi' = \frac{3}{4} u_e r^2 (r^2 - 1) \sin^2 \theta,$$

$$\varphi = \left( -r + \frac{\beta}{r^2} \right) \cos \theta + c, \quad \varphi' = -\frac{2q v_0}{\sigma_*} r \cos \theta + c', \quad (2)$$

$$\begin{aligned} u_e &= \frac{2}{3} v_0 = \frac{q}{2 + 3\eta_* + q^2 \left( 1 + \frac{2}{\sigma_*} \right)} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow U_e &= \frac{q R E_0}{2\eta + 3\eta' + \frac{q^2}{\sigma} \left( 1 + \frac{2}{\sigma_*} \right)}, \end{aligned}$$

где  $c$  и  $c'$  – произвольные постоянные, обеспечивающие скачок  $\{\varphi\}$  поперек ДЭС,  $\beta = q v_0 - 1/2$ , а последняя формула дает скорость ЭКД в безразмерных и размерных величинах соответственно.

Конспективно отметим несколько принципиальных моментов:

- из решения (2) следует, что при ЭКД выполняется парадокс Даламбера, т.е. реализуется уникальная для вязких сред ситуация, когда при обтекании однородным потоком отсутствует сила гидродинамического сопротивления, что обусловлено самоогласованностью электрогидродинамических полей через граничные условия и переменностью поверхностного натяжения  $\gamma$  за счет электрокапиллярного эффекта;

- капля Левича или ШМ представляет собой при отсутствии движения на границе раздела фаз электростатический конденсатор (с возможным существованием сильных  $E_* \gg E_0$  электрических полей внутри ДЭС), который превращается в электрогидродинамический при любом движении поверхности раздела, а ДЭС – в двойной токовый слой, что порождает ТЭМС (тройной электромагнитный слой) – новую векторную структуру типа сэндвича [11, 12];

- при равенстве  $\rho = \rho'$  плотностей воздуха и вещества ШМ решение (2) является точным решением нелинейной задачи (1) для любых чисел Рейнольдса [2, 12], ибо для конвективного члена от динамически обратимого вихря Хилла можно доказать соотношение

$$(\bar{u}'_x \cdot \nabla) \bar{u}'_x = \frac{9}{16} u_e^2 \nabla [3r^2 - 2r^4] \cos 2\theta, \quad (3)$$

что (с учетом определения добавочного давления в потенциальном внешнем потоке из

интеграла Бернулли) приводит при  $r = 1$  к нулевому скачку  $\{p\}_{\text{re}} = 0$  дополнительных давлений, зависящих от чисел Рейнольдса.

Таким образом, учет конвективных членов в уравнениях движения системы (1) приводит лишь к перераспределению давления вне и внутри ШМ, не нарушая ее сферической формы, электрической и кинематической картины течения. Этот важный факт лежит в основе последовательного объяснения почти всех характерных свойств и мнимых парадоксов ШМ из вышеперечисленных пунктов, а также большинства других странностей ее поведения [2, 12].

1. Излучение видимого света является одним из наиболее известных свойств ШМ, которое и позволяет обычно ее обнаружить. Из решения (2) следует, что внутри ШМ при ее ЭКД в АЭП постоянной напряженности существует постоянный электрический ток  $\vec{j}' = -\sigma_* \cdot \nabla \varphi' = 2qv_0 \vec{k}$ , который и обеспечивает электролюминесценцию вещества ШМ типа тлеющего или тихого разряда. Наблюдаемое в ряде случаев изменение цвета ШМ может быть объяснено изменением силы тока (за счет изменения скорости ЭКД в АЭП), как в экспериментах Теплера, когда слабый ток давал голубоватое свечение, переходившее по мере его усиления до 10 ампер в темно-красное, оранжевое и, наконец, в белое [7].

2. Наличие ДЭС и связанного с ним переменного поверхностного натяжения за счет электрокапиллярного эффекта является основным и, по сути, единственным предположением в ЭКВ модели ШМ. При  $\rho = \rho'$  поверхностное натяжение обеспечивает сохранение сферической формы ШМ даже при больших скоростях ЭКД и  $\text{Re} \gg 1$ . Возникающий ТЭМС на границе раздела фаз способствует сохранению ШМ своей формы, придавая ей дополнительную упругость. При  $\rho \neq \rho'$  это можно считать первым приближением к решению задачи (1) в общем случае, если характеризующее деформацию границы раздела фаз число Вебера меньше двух. Парадоксальной способности ШМ проникать сквозь малые отверстия и узкие щели здесь касаться не будем, ибо это – су-

щественно нестационарный процесс, требующий отдельного анализа и, скорее всего, сложного численного счета.

3. Удивляющая непредсказуемость движения ШМ в большинстве случаев объясняется достаточно просто: причиной ЭКД обычно является АЭП (открытое 250 лет назад М.В. Ломоносовым) и его сильные возмущения под грозовыми облаками, где возможно не только возрастание его напряженности на несколько порядков со средних 100 в/м, но и двойной реверс направления электрического поля (см. схему Симпсона в [3, 12]). В подобном поле сложного строения и ШМ будет двигаться по сложной траектории. В зонах с однородной и повышенной напряженностью АЭП при  $\rho = \rho'$  ШМ будет двигаться с большой скоростью ЭКД, задаваемой формулой (2), не испытывая при этом гидродинамического сопротивления и почти независимо от направления ветра.

В окрестности зон реверса, где  $E_0 \rightarrow 0$  ветер может играть существенную роль, однако при его отсутствии и  $\rho = \rho'$  возможна «абсолютная» левитация ШМ, когда на ее поверхности нет движения, отсутствуют касательные напряжения и она временно превращается в электростатический конденсатор без электрического тока внутри и видимого свечения. Изумляющее появление ШМ как бы «из ничего» объясняется ее выходом из этого неустойчивого состояния кратковременного покоя. В ряде случаев (особенно вблизи заостренных предметов – концентраторов поля или внутри помещений за счет взаимодействия с наведенными зарядами) возможна «относительная» левитация с образованием внутри ШМ тороидальных вихрей Тейлора вместо вихря Хилла и, как следствие, неоднородного электрического поля и ее разноцветного свечения. Любой порыв ветра будет сносить ШМ вдоль эквипотенциальной поверхности этого состояния квазиневесомости. Почти аналогичная ситуация возникает при гидрировании ШМ вдоль телефонных проводов или ЛЭП, когда она попадает в «электромагнитную яму» типа бобслейной трассы, и лишь порыв ветра

может ее оттуда вытолкнуть. Ибо из электродинамики известно, что диэлектрическое тело с большей проницаемостью, чем в окружающей среде, будет втягиваться в область с большей напряженностью электрического поля, т.е. в пространство между проводами.

В случае  $\rho \neq \rho'$ , наряду с ЭКД и ветром, необходимо учитывать баланс сил тяжести Архимеда и вязкого сопротивления, что можно сделать лишь в линейной постановке типа краевой задачи (1) при  $Re \ll 1$  и соответствующем изменении граничных условий. Например, при  $E_0 \rightarrow 0$  и в отсутствие ветра ШМ будет оседать при  $\rho' > \rho$  (или всплывать при  $\rho' < \rho$ ) в окружающем воздухе со скоростью

$$U_0 = \frac{2}{3} \frac{gR^2}{\eta} \frac{\eta + \eta' + q^2/3\sigma}{2\eta + 3\eta' + q^2/\sigma} (\rho' - \rho), \quad (4)$$

что следует из обобщения классической задачи Адамара-Рыбчинского для сферической капли с поверхностным зарядом ДЭС [2, 10]. А если учесть внешнее геомагнитное поле с индукцией  $\vec{B}$ , направленной под углом  $\alpha$  к силе тяжести, то обобщение задачи о МГД-обтекании капли с ДЭС на поверхности показывает, что скорость оседания (4) изменится на величину порядка числа Гартмана  $M = BR\sqrt{\sigma/\eta} < 1$ , а на ШМ будет действовать дополнительная боковая сила

$$F_1 = \frac{\pi}{16} \eta R U_0 M \left( \frac{2\eta + 3\eta' + q^2/\sigma}{\eta + \eta' + q^2/3\sigma} \right)^2 \sin 2\alpha.$$

Кроме этого, ШМ будет еще совершать «индуцированное» ЭКД с размерной скоростью по формуле (2), где вместо  $E_0$  надо подставить  $[\vec{v}_0 \times \vec{B}]$ . Внутри ШМ течение задается в этом случае суперпозицией трех вихрей Хилла разной интенсивности, направленных под углами друг к другу. А вот когда внутри ШМ скорости задаются суперпозицией сонаправленных вихрей Хилла и Тейлора [11], то снаружи возможно образование присоединенного вихря-«бороды» [14] не только позади ШМ (что для  $10 < Re < 60$  реализуется при обтекании сферы вязким потоком), но и впереди (что в обычной гид-

родинамике невозможно). Где находится «борода», зависит от структуры деформационно-сдвигового потока (натекает ли он на ШМ с полюсов и растекается вдоль экватора или наоборот), что по ЭКВ модели определяется лишь знаком дипольного коэффициента  $\beta$  в решении (2) для электрического потенциала и величиной параметра электровихревых течений [5, 14].

В заключение этого пункта отметим, что ЭКД капли или ШМ по ЭКВ модели за счет электрокапиллярного эффекта аналогичен термокапиллярному дрейфу капли или пузыря при малых числах Пекле за счет эффекта Марангони – зависимости поверхностного натяжения от температуры [10].

4. По ЭКВ модели ШМ имеет поверхностный заряд ДЭС, что и позволяет последовательно объяснить все характерные черты, мнимые парадоксы и большинство странностей ее поведения, отмеченные выше. Из-за подвижности границы раздела фаз ДЭС при наличии любого движения порождает ТЭМС, особые свойства которого [11] позволяют рассматривать поверхность ШМ как обособленную  $\Sigma$ -фазу. Именно  $\Sigma$ -фаза препятствует диффузии завихренности из ШМ в окружающее пространство и обеспечивает сохранение ее массы, а также импульса  $J = 2\pi R^3 U_c$  и кинетической энергии

$T = \frac{10}{7} \pi R^3 U_c^2$ . ШМ как вихревого сгустка при ее ЭКД в однородном АЭП, однако в общем случае не препятствует обмену ШМ импульсом и энергией с внешней средой.

По ЭКВ модели ШМ как вихревой сгусток может существовать до тех пор, пока концентрация ионов в окружающем пространстве будет достаточна для поддержания заряда внешней обкладки ДЭС в квазиравновесном состоянии. В грозу это меньше времени прохождения центра грозового облака над данным местом, тогда как в областях тектонических разломов за счет сейсмоэлектрического эффекта аномальное увеличение значений АЭП (следовательно, и концентрации ионов в воздухе) может продолжаться несколько суток [15]. Косвенным подтвержде-

нием существования долгоживущих ШМ служат визуальные и радарные наблюдения в долине Хесдален (Норвегия, зимой 1984 и 1985 г.) за «фальшивыми болидами» (долгоживущими ШМ?), которые порой двигались с достаточно большими скоростями (~10 м/сек) по причудливым траекториям в течение нескольких часов, изредка останавливались, пропадая иногда визуально, но отражаясь на экране радара [16].

Быстрое разрушение внешней обкладки ДЭС и  $\Sigma$ -фазы в результате, например, импульса тока при контакте с проводником, имеющим другой потенциал или заряд противоположного знака, приводит к разрушению ТЭМС,  $\Sigma$ -фазы и «взрыву» ШМ. Этот импульсный ток (до 10 и более ампер) может вызвать не только оплавление металлических проводников, повреждение деревьев, но и срабатывание реле, перегорание предохранителей, электрических и радиоприборов, находящихся на расстояниях в десятки метров от места контакта с ШМ. Подобный сценарий не противоречит предположению [9], что ШМ часто служит триггером для освобождения электрической энергии, накопившейся на заряженных проводниках и других предметах, особенно в грозовую погоду.

5. Из ЭКВ модели следует, что ШМ является изолированной системой по обмену массой с окружающей средой, но частично открытой системой в энергетическом смысле. Первоначальный запас электростатической энергии ШМ легко определяется по классической формуле для сферического конденсатора и не превышает  $10^{-1}$  джоуля. Однако внешнее поле  $E_0$ , в силу особых электрокинетических свойств подвижного ДЭС, является не только источником механического импульса ШМ, но и внешним источником энергии, которая расходуется на джоулев нагрев, «холодное» свечение ШМ и ее кинетическую энергию как вихревого сгустка. Это подтверждает и прямой подсчет дивергенции вектора Умова-Пойнтинга  $\vec{\Pi} = [\vec{E}_0 \times \vec{H}]$  (где  $\vec{H}$  – собственное магнитное поле приложенного поля  $\vec{E}_0$ ), которая явля-

ется плотностью энергии электромагнитного поля [17]

$$\operatorname{div} \vec{\Pi}' = -\frac{4(qv_0)^2}{\mu\sigma_*} = \operatorname{const} < 0,$$

$$\operatorname{div} \vec{\Pi} = \frac{1}{\mu} \left[ -\left(1 + \frac{2\beta}{r^3}\right)^2 + \frac{3\beta}{r^3} \left(2 + \frac{\beta}{r^3}\right) \sin^2 \theta \right] < 0. \quad (5)$$

Из выражений (5) следует, что вещество ШМ при ее ЭКД в АЭП получает электромагнитную энергию из окружающего пространства, причем  $\operatorname{div} \vec{\Pi} \rightarrow 0$  при  $\beta \rightarrow 1$  и  $\theta \rightarrow \pi/2$  или  $\beta \rightarrow -1/2$  и  $\theta \rightarrow 0, \pi$ . Интересно отметить, что при  $r \rightarrow 1_+$  и  $-1/2 < \beta < 0$  поглощение энергии поля в окрестности ШМ падает у полюсов ( $\theta \rightarrow 0, \pi$ ) и возрастает у экватора ( $\theta \rightarrow \pi/2$ ), тогда как при  $0 < \beta < 1$  у полюсов поглощение энергии поля максимально, а у экватора – минимально. Из анализа линий уровня  $\operatorname{div} \vec{\Pi}$  следует, что при увеличении положительных  $\beta$  из экваториальной зоны ШМ (точнее, ТЭМС на ее границе) как бы идет поток электромагнитной энергии во внешнее пространство, а поступает эта энергия в ТЭМС в основном у полюсов. При некоторых условиях у полюсов ШМ (как концентраторов поля) возможно появление тлеющего или коронного разряда, что и дает свечение типа узконаправленных лучей, как у фонарика. Определенную роль при этом может играть и переходное или тормозное излучение вблизи ТЭМС как границы раздела сред с разными диэлектрическими проницаемостями.

Сильные импульсы тока и серьезные последствия при «взрыве» ШМ обусловлены не большим запасом собственной энергии ШМ, а ее способностью иногда замыкать внешнюю электрическую цепь между предметами с большой разностью потенциалов, т.е. высвобождением взаимной энергии проводников.

В реальных условиях движение ШМ обусловлено динамическим балансом многих сил разной природы и происходит (особенно в грозовую погоду) в стратифицированной атмосфере. При движении ШМ вдоль земной поверхности на высоте  $h \gg R$  ее

можно рассматривать как электрический диполь, который будет притягиваться к земле независимо от своей ориентации. Однако из гидродинамики известно, что при движении сферы в перпендикулярном направлении к плоскости она будет испытывать отталкивание. Поэтому даже при  $\rho \approx \rho'$  ЭКД ШМ в однородном АЭП будет сопровождаться незначительными колебаниями относительно направления  $\vec{E}_0$ , а также формы и объема ШМ за счет свойств сжимаемости. Введение модифицированной частоты Вайсяля приведет к появлению в (2) для  $\varphi$  вне ШМ переменной части дипольного возмущения. А любой переменный электрический диполь (как обобщение классического вибратора Герца) будет излучать электромагнитные волны [17] в дальней или волновой зоне. Этим объясняется иногда регистрируемое от ШМ радиоизлучение [7, 9].

Таким образом, все характерные свойства, мнимые парадоксы и большинство других «странностей» поведения ШМ в зрелой стадии ее существования непротиворечивым образом следуют из ЭКВ модели, что является весомым (хотя и косвенным) свидетельством или необходимым условием ее соответствия реальному строению ШМ. Более того, эта модель на качественном уровне позволяет описать возможный сценарий «рождения» ШМ из разрядного канала линейной молнии через промежуточную стадию четочной молнии и ЭКД нескольких одинаковых ШМ под одним углом к линии их центров.

В качестве заключения к этому разделу отметим, что академик В.Л. Гинзбург хотя и не включил явным образом загадку ШМ в свой известный список основных проблем физики на XXI век (аналог математического списка Гильберта на XX век), но признал, что проблема ШМ этого заслуживает и подчеркнул, что *«природа шаровой молнии будет четко и однозначно выяснена лишь после создания этих объектов в лаборатории при ясном контроле всех условий и параметров»*. ЭКВ модель дает надежду, что скоро экспериментаторы получат и достаточные условия ее соответствия природе реальной ШМ.

### Сценарий рождения шаровой молнии из разрядного канала линейной

По сравнению с ШМ еще более редко наблюдается четочная молния (ЧМ), связь которой с обычной или линейной (ЛМ) часто трактуется противоположным образом [3, 9, 18]. В [19] представлена качественная модель возможного сценария образования ШМ в результате следующей цепочки физических превращений: разряд ЛМ – преобразование плазменного канала ЛМ из-за «сосисочной» неустойчивости в межкомпонентной паузе непрерывного тока [4] в ЧМ – распад ЧМ на отдельные ШМ – движение двух и более одинаковых ШМ вдоль и под углом к линии их центров. Заметим, что даже в исследовании ЛМ до сих пор остается много вопросов по тонкой структуре ее строения, динамике состояния плазмы в разрядном канале, развитию и роли М-компонентов в фазе непрерывного тока [4] и т.д. Поэтому предложенный сценарий невозможно описать даже в упрощенной форме математически единообразным способом в силу существенной нелинейности, нестационарности и многофакторности протекающих физико-химических процессов, особенно – переходы из одной стадии этого сложного явления в другую, что условно обозначено тире (–). Однако для описания отдельных стадий данного сценария можно предложить адекватные физико-математические модели.

Наиболее изучена первая стадия сценария – разряд ЛМ, где можно выделить несколько фаз [4] и основных моментов: лидерная фаза формирования проводящего канала типа своеобразного волновода для следующих импульсов тока; главная фаза и разряды последующих компонентов по уже готовому «туннелю» с образованием заряженного «чехла» типа ДЭС – двойного электрического слоя [2]; длительная фаза непрерывного тока ( $\approx 100$  А) в межкомпонентных паузах, когда состояние плазмы в «туннеле» с ДЭС близко к состоянию в квазистационарной электрической дуге [4, 5].

ЭГД течение в цилиндрической дуге (здесь и далее  $r, z, \varphi$  – цилиндрические коор-

динаты) можно описать на основе теории электровихревых течений [5, 19] через гидродинамическую  $\Psi$  и электрическую  $\psi$  функции тока, удовлетворяющие уравнениям

$$D^2\psi = 0, \quad D^4\Psi = -\frac{1}{S} \frac{1}{r^2} \frac{\partial\psi}{\partial z},$$

$$D^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2}. \quad (6)$$

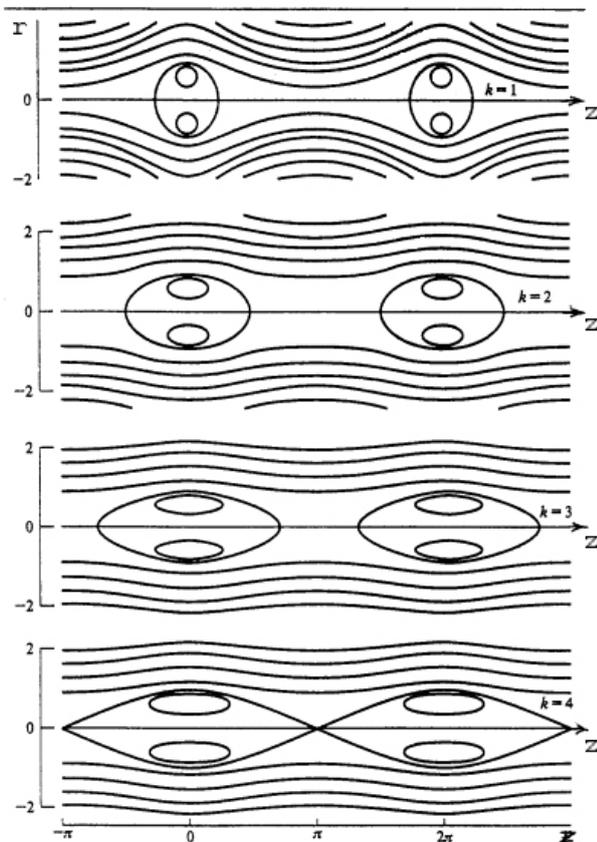
Азимутальное магнитное поле периодического по  $z$  меридионального электрического тока  $\vec{j} = [\nabla\psi \times \vec{e}_\varphi]/r$  и соответствующее электровихревое течение, ограниченное при  $r \rightarrow 0$ , задаются рядами

$$\psi = C_0 r^2 + b_0 + r \sum_n C_n I_1(nr) e^{inz},$$

$$\Psi = A_0 r^4 + B_0 r^2 + \sum_n \left[ \begin{matrix} A_n r^2 I_0(nr) + \\ + B_n r \cdot I_1(nr) \end{matrix} \right] e^{inz} + \Psi_1, \quad (7)$$

где  $I_0, I_1$  – модифицированные функции Бесселя;

$\Psi_1$  – частное решение второго уравнения системы (6).



Рисунок

Специальный случай однородного решения (7) вида

$$\Psi = \frac{1}{2} (r^4 - r^2) \cos z_0 - r^4 I_1(1) + r I_1(r) \cos z \quad (8)$$

задает при  $z_0 = k\pi/4$  ( $k = 1, 2, 3, 4$ ) бесконечную периодическую цепочку вихревых образований [19], представленных на рисунке. Это можно рассматривать как отдельные «стоп-кадры» (снизу-вверх) финальной стадии пересжатия канала ЛМ в ЧМ вплоть до ее распада на отдельные ШМ. Сложные вопросы устойчивости решений здесь не рассматриваются, как и стабилизирующая роль ДЭС на границе.

Следует подчеркнуть, что специальный вид решения (8) удовлетворяет не только уравнению (6) в приближении Стокса с учетом электромагнитных сил взаимодействия приложенного тока с собственным магнитным полем, но и общему уравнению Навье-Стокса при любых числах Рейнольдса, ибо относится к важному классу динамически обратимых течений, как и сферический вихрь Хилла в электрокапиллярновихревой (ЭКВ) модели ШМ [2]. После распада ЧМ на отдельные ШМ (верхние «стоп-кадры» на рисунке) возможно описание движения нескольких ШМ не только вдоль линии их центров на основе решения (8), но и под углом к этой линии на основе ЭКВ модели ШМ [2] и установленной Бьеркнесом электрогидродинамической аналогии (ЭГДА) с движением двух шаров в идеальной жидкости.

В общем случае формула Бьеркнеса имеет вид

$$F = \pi \rho V_1 V_2 \frac{R_1^3 R_2^3}{L^4} [\cos(V_1, V_2) - 3 \cos(V_1, L) \cos(V_2, L)]$$

Тогда при равенстве радиусов ШМ  $R_1 = R_2 = R$  и их скоростей ЭКД-электрокапиллярного дрейфа  $V_1 = V_2 = U_e$ , в соответствии с формулой (2), сила ЭГД взаимодействия между одинаковыми ШМ при их ЭКД под углом  $\alpha = \arccos(1/\sqrt{3}) \approx 54^\circ 40'$  к линии центров в первом приближении будет отсутствовать. Аналогичный результат получается из выражения электростатической энергии двух электрических диполей.

Описание совместного движения двух и более ШМ, соединенных «нитью мелких светящихся бусин», встречается в литературе. По ЭКВ модели ШМ [2, 12] эта «нить» при ЭКД должна иметь  $S$ -образную форму, как линии тока работы [19] между двумя сферами, если только ШМ не движутся в соответствии с решением (8) вдоль канала ЛМ.

По поводу полученного выше динамически обратимого решения (8) следует подчеркнуть три момента.

#### I

Тот факт, что это решение одновременно удовлетворяет уравнениям (6) теории электровихревых течений в приближении Стокса ( $Re \rightarrow 0$ ) и нелинейному уравнению Навье-Стокса для любых чисел  $Re$  (без учета электромагнитных сил) не является чистой случайностью. Ибо сравнение структуры нелинейного инерционного и электромагнитного членов в уравнении движения выявляет их полную аналогию с точностью до переобозначений электромагнитной и гидродинамической функций тока [5].

#### II

Возможность различных периодических пульсаций в разрядном канале была теоретически показана для идеальной проводящей жидкости в [20] при исследовании поведения плазменного шнура в рамках лагранжевого подхода.

#### III

Подобные плазменные пульсации и полученное решение (8) отражают, скорее всего, обнаруженный недавно феномен диффузионной буферности [21], возникающий при переходе из класса простых в класс сложных физических систем. Это сказывается в росте числа сосуществующих и устойчивых диссипативных структур (в данном случае – периодических вихревых цепочек) при соответствующем уменьшении диффузионных коэффициентов (в данном случае – вязкости). При необходимости в разрядном канале можно получить и непериодические цепочки вихревых образований.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 05-01-00280).

### Библиографический список

1. Ломоносов М.В. Избранные произведения. Т. 1. Естественные науки и философия. – М.: Наука, 1986.
2. Натяганов В.Л. Электрокапиллярно-вихревая модель шаровой молнии // ДАН, 2003. – Т. 390. – № 6.
3. Френкель Я.И. Теория явлений атмосферного электричества. – Л.-М.: ГИТТЛ, 1949.
4. Базелян Э.М., Райзер Ю.П. Физика молнии и молниезащиты. – М.: Физматлит, 2001.
5. Электровихревые течения / Ред. Щербинин Э.В. – Рига: Зинатне, 1985.
6. Леонов Р.А. Загадка шаровой молнии. – М.: Наука, 1965.
7. Сингер С. Природа шаровой молнии. – М.: Мир, 1973.
8. Смирнов Б.М. Проблема шаровой молнии. – М.: Наука, 1988.
9. Стаханов И.П. О физической природе шаровой молнии. – М.: Научный мир, 1996.
10. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Физматгиз, 1959.
11. Натяганов В.Л. Электрокапиллярновихревая модель сферического вихря Хилла-Тейлора // ДАН, 2001. – Т. 381. – № 1.
12. Натяганов В.Л. Ломоносов и парадоксальный феномен атмосферного электричества – шаровая молния. Сб. «Газовая и волновая динамика». – М., 2005.
13. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Якубов И.Т. Физика неидеальной плазмы. – М.: Физматлит, 2004.
14. Натяганов В.Л. Электрокапиллярновихревая модель и мнимые парадоксы шаровой молнии. Сб. тез. Междунар. конф. «Колмогоров и современная математика». – М., 2003.
15. Натяганов В.Л. Магнитогиродинамическая аналогия и сейсмoeлектрический эффект // ДАН, 2003. – Т. 391. – № 1.
16. Немчинов И.В. Электрические поля и токи вблизи поверхности раздела земля-атмосфера при возникновении «огней землетрясений». Сб. труд. «Нестационарные процессы в верхних и нижних оболочках Земли». – М.: ИДГ РАН, 2002.
17. Никольский В.В. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Наука, 1978.
18. Барри Дж. Шаровая молния и четочная молния. – М.: Мир, 1983.
19. Натяганов В.Л. Четочная молния как промежуточная стадия между линейной и шаровой. Сб. докл. VII Междунар. конф. «Совр. проблемы электрофизики и ЭГД жидкостей». – СПб., 2003.
20. Куликовский А.Г., Любимов Г.А. Магнитная гидродинамика. – М.: ГИФМЛ, 1962.
21. Мищенко Е.Ф., Садовничий В.А., Колесов А.Ю., Розов Н.Х. Автоволновые процессы в нелинейных средах с диффузией. – М.: Физматлит, 2005.
22. Vonnegut B. Electrical theory of tornadoes. J. Geophys. Research, 1960, vol. 65, N1.

## КАВИТАЦИОННАЯ ГЕМОДИНАМИКА

А.И. ГОНЧАРЕНКО, *Аналитический центр сердца,*  
С.А. ГОНЧАРЕНКО, *Аналитический центр сердца*

**Ф**изиологической проблемой со времен открытия контура кровообращения Гарвеем и до настоящего времени является регуляция объема крови. Ее количество занимает объем 5–6 литров, но в организме она каким-то образом одновременно заполняет всю емкость сосудистой системы в 25–30 литров.

Об этом функциональном несоответствии между объемом сосудистого русла и количеством крови, заключенной в нем, указывали И.Ф. Цион (1873), Г. Паппенгеймер (1953), Г.П. Конради (1969), S. Mellander (1970), Г.С. Мазуркевич (2004) [1–3, 19, 20].

Однако механизмы, с помощью которых это количество крови способно заполнить емкость, превосходящую ее по объему, до сих пор остаются неизвестны.

Кроме того, накоплено множество фактов, свидетельствующих о том, что объем крови в организме может спонтанно увеличиваться или сокращаться без каких-либо принудительных вливаний и кровопотерь.

Если человек переходит из состояния покоя к физической активности, объем его крови увеличивается в среднем на 15 литров, а при интенсивных нагрузках – до 40 литров [4]. Марафонцы во время бега теряют 4 кг жидкости, однако объем крови к концу дистанции возрастает еще на 6–8 % [21], а у штангистов в момент поднятия тяжести на 60 %.

Частое дыхание или его задержка, массаж, стресс, эмоции увеличивают объем крови в 1,5–2 раза [5–7]. Поразительно быстрый прирост объема крови до 50 % наблюдается у беременных женщин при перемене положения их тела: из – лежа на боку, в– вертикальное положение [8].

Состояние тревоги у больных перед операцией снижает объем крови, а после

операции, несмотря на невозмещенную кровопотерю, он возрастает [9].

Но самый быстрый прирост объема крови происходит в сердце. Допплеровская эхокардиография регистрирует возрастание объема крови в полости левого желудочка с 41 мл до 130 мл только за одну фазу изометрического напряжения [10].

Для снятия приступа фибрилляции предсердий в них производят электрический разряд в 300–400 дж, в результате чего в месте разряда каким-то образом мгновенно возрастает объем крови на 60 % [11].

Такие же явления наблюдаются и в экспериментах. Например, при электрическом или механическом раздражении отдельных коронарных, мозговых или кишечных артерий можно вызвать в них обособленное увеличение объема крови до 500 %.

Однако в организме действует и противоположный эффект, который столь же быстро снижает объем крови от исходной величины до 5–6 литров. Это случается при всех видах шока, анемии, при возникновении артериовенозных шунтов, болезни Бери-Бери [6, 12], при ограничении сократительных функций самого сердца, вызванных трепетанием предсердий, миопатией, мерцательной аритмией, острым инфарктом миокарда, операционными вмешательствами [9].

Снижение объема крови производили в эксперименте на добровольцах. Когда их после нескольких часов пребывания в горизонтальном положении без собственных усилий переводили в вертикальное, то у всех испытуемых падало давление и уменьшался объем крови до 66 %, но через 5–8 минут исходный объем крови восстанавливался. Подобные изменения с количеством крови всегда происходят и у космонавтов в момент выхода из невесомости [14].

Дефицит объема крови в организме регистрируется при наркозах: морфином, эфиром, хлороформом, пентаталом, при введении ацетилхолина, пенициллина, змеиного и паучьего ядов, алкогольном опьянении [22].

Невероятно, но реаниматологи наблюдали случаи, когда вливание 1,5–2 литров чужеродной крови не увеличивало, а уменьшало ее общий объем в теле пациента.

Каждая остановка сердца, подключение аппарата искусственного кровообращения (АИК) всегда сопровождается уменьшением объема крови. Зная это, хирурги, чтобы не допустить запустевания сосудов и гибели внутренних органов от обескровливания, к имеющейся уже крови доливают еще 7–15 и более литров донорской крови [15]

Снижение объема крови отмечают и патологоанатомы. Если кровь откачивается из тела вскоре после смерти, то ее объем занимает от 7 до 8 литров, а через сутки после отстаивания это количество снижается до 5–6 литров. При бальзамировании, чтобы наполнить все сосуды, прозекторы вливают уже около 30 литров специальных жидкостей. Таким же количеством латекса заливаются сосуды тела человека для получения анатомических каррозионных препаратов.

Самопроизвольное сокращение объема крови доноров, хранящейся в герметично замкнутых сосудах, служит причиной постоянной 'головной боли' руководителей станций переливания крови, поскольку объем забираемой плазмы всегда больше ее фактического количества.

Внезапное увеличение объема крови в организме физиология объясняет за счет роста частоты сердечных сокращений и ударного объема желудочков сердца за одну минуту. Из чего следует, что скорость циркуляции одного и того же количества крови должна увеличить свой объем и заполнить им превосходящую емкость сосудов. Но очевидно, что только за счет скорости перемещения по кругу кровообращения нельзя превратить 5–6 литров крови в 25–30.

Поэтому физиологи продолжают искать и иные объяснения этому явлению,

предлагая гипотезы о скоплении крови в емкостных сосудах (депонирование) или наполнения ею отдельных органов (секвестрация) медленно или быстро циркулирующими фракциями, действием нервной системы на величину диаметра сосудов и их тонус, химически активных гормонов и газового наполнения крови. Однако исследования последних десятилетий окончательно установили, что депонирования крови в теле человека не происходит и во всех сосудах кровь находится в постоянном движении. Она обладает свойством спонтанно увеличивать или уменьшать свой объем по ходу своего движения, а также свою скорость независимо от сокращения окружающих мышц, просвета сосудов и влияния нервной системы. Стало быть, выдвигаемые гипотезы не внесли определенности в это гемодинамическое противоречие.

Кроме того, из кровеносного русла в межклеточное пространство ткани и в обратном направлении перемещается 225 литров жидкости в одну минуту, что превышает минутный объем кровообращения в 45 раз. Все эти гемодинамические явления происходят в сосудистом русле суммарной длиной, равной  $10^5$  км. [16] При этом пульсовое давление крови в сосудах составляет всего лишь 100–120 мм рт.ст., из которых только 5 % приходится на долю мышечных сокращений сердца [16]. Эти факты говорят о том, что в организме действуют еще какие-то силы, которые способны за одну минуту увеличить объем крови, протолкнуть его по длине сосудов в 100 000 км и профильтровать четверть тонны плазмы сквозь поры сосудов. Однако такой быстродействующей и мощной кинетической энергией, способной одновременно произвести все эти процессы, не обладают ни биохимические, ни осмотические явления.

Путь к разгадке этого феномена нам подсказали явления, происходящие с кровью в аппарате искусственного кровообращения. Когда кровь вакуумным насосом откачивается из вен, в ней появляются пузырьки, она вспенивается и увеличивается в объеме. Это происходит из-за ускоренного выхода из нее

газа в разряженную полость оксигенатора АИКа. Анестезиологи для ликвидации этой пены вводят в кровь антифоны или добавляют капли спирта, которые, как известно, имеют свойства подавлять кавитацию в воде.

Такое специфическое действие пеногасителей натолкнуло нас на гипотезу, что и в крови кавитация может быть причиной изменения ее объема. Тем более что это явление было зарегистрировано в сердце по его фоновой частоте тонов еще в 70-е годы институтом Акустики АН СССР. Однако из всех эффектов, сопутствующих кавитации, рассматривались только звуковые как источник шумов сокращений миокарда. Кавитация в крови венозных сосудов регистрировалась и в экспериментах при смене положения тела, упражнениях на центрифугах и при переходе к невесомости [16]. В целом же ее эффекты в кровообращении не рассматривались, и тем более, ее силы не связывались с регуляцией объема крови и ее движением.

Как известно, явление кавитации представляет собой возникновение каверн, полостей или пузырьков, заполняемых газом в тех точках текущей жидкости, где ее скорость возрастает, а давление становится ниже критического значения ее структурной прочности.

В местах ее разрыва при наличии растворенных в жидкости газов в условиях переменного давления происходит неограниченный рост кавитационных пузырьков, потому что в них из жидкости диффундирует газ. Они увеличиваются в размере и повышают внутри себя давление, превосходящее его в окружающей среде. Энергия движения таких пузырьков и их вибрации порождают вокруг себя новые пузырьки. Происходит рост их количества, и этот увеличенный объем создает пондеромоторные силы, приводящие к вытеснению окружающей жидкости и к ее самодвижению.

Если же в ней мало газов, а давление периодически меняется, то возникающие пузырьки быстро «схлопываются», что порождает кумулятивные струи, развивающие давление, превосходящее тысячи атмосфер. Столь мощная энергия сопровождается зву-

ковыми, электромагнитными, люминесцентными, температурными и кинетическими эффектами.

Когда же растворенных в воде газов много, то пузырьки, не схлопываясь, сохраняются в ней долгое время и своим количеством увеличивают ее объем, что служит источником пондеромоторных сил.

Плазма крови на 90 % состоит из воды, что составляет примерно 4,5 литра.

Именно в ней, по-видимому, и должна возникать гидродинамическая кавитация.

Для того чтобы удостовериться, что кровь обладает свойствами менять свой объем под действием кавитации, были проведены модельные эксперименты, имитирующие фазу изометрического напряжения сердца, в полостях которого наблюдается наибольший прирост объема крови.

Эта фаза наступает вслед за диастолой, когда желудочки сердца уже заполнены кровью. Все клапаны и коронарные артерии перекрыты напряжением мышц миокарда. В этот момент нет дополнительного притока крови, но ее объем в герметично замкнутой полости желудочка как-то увеличивается на 300 % за 0,06 с. Миокард растягивается, и сердце приобретает шаровидную форму [18]. Динамику перепада давления в этом периоде работы сердца мы попытались воспроизвести в эксперименте.

Имитатором полости желудочка служил специально реконструированный стеклянный 20 мл «рекордовый» шприц. Площадь его рукоятки была увеличена до 6 см<sup>2</sup> и покрыта скотчем липкой поверхностью наружу. Стержень поршня продевался сквозь отверстие в тонкой резине, которое завязывалось нитью вокруг него. Свободная часть резины натягивалась на «поршневое» отверстие шприца и герметично зажималась фиксатором. На столе укрепляли толстую резину, которая так же была покрыта скотчем липкой поверхностью наружу. К канюле (конусная трубка шприца для иглы) подсоединялся тройник с краном, и в него вставлялась прозрачная полиэтиленовая трубка длиной 60 см и диаметром 2 мм для наблюдения за кровью в случае увеличения ее объ-

ема. На торцовый выход тройника надевалась пробка и зажималась большим пальцем.

Для проверки адекватности способа воспроизводства кавитации первый опыт провели с водопроводной водой, наполовину заполнявшей полость шприца.

Чтобы имитировать изменение давления в фазу изометрического напряжения сердца, рукояткой поршня ритмично каждую секунду ударяли по резине на столе и резко отрывали от нее. Удары производили 15 раз с высоты 80–90 см, а развиваемое давление калибровали манометром.

Каждый удар вызывал в воде выше поршня подъем давления, а ниже поршня давление падало. Его перепад составлял от (-)12 до 220 мм рт.ст. В момент отрыва шприца липкая поверхность удерживала рукоятку, а тонкая резина на мгновение возвращала его назад. В результате давление воздуха над водой на миг падало. Одновременно менялось и направление движения воды, и она оказывалась в разреженном пространстве. После серии ударов вода становилась молочно-мутного цвета с микробузырьками на поверхности мениска.

Затем шприц поворачивался вверх рукояткой, открывался кран тройника, и в полиэтиленовую трубку выталкивалась вода, наполненная пузырьками на 10–15 мм. Через 2–3 с пузырьки в ней схлопывались, она становилась прозрачной и втягивалась обратно в полость шприца.

Было видно, как быстрая, периодическая смена давления производит в воде кавитацию, которая увеличивает ее объем за счет образования пузырьков, при схлопывании которых объем возвращался к исходной величине.

Следующие опыты были проведены с артериальной и венозной кровью. В обработанную силиконом полость шприца всасывались 10 мл крови, а 10 мл воздуха, оставшихся за поршнем, герметично закрывались натянутой резиной на его торце.

После 15 ударов кровь вспенилась, и ее объем увеличился, сдвигая поршень. При открытии крана артериальная кровь заполняла трубку на 110–130 мм, венозная кровь –

на 140–210 мм. В бинокулярную лупу было видно, что кровь в трубке наполнена пузырьками. После 4–5 минут покоя кровь сворачивалась, и ее верхняя граница постепенно снижалась.

Эксперимент показал, что рост объема одной и той же массы воды или крови действительно возможен за счет образования в них пузырьков.

Чтобы удостовериться, что пузырьки в крови являются следствием кавитации, опыты были усложнены.

В полости шприца на отметке 5 см<sup>3</sup> крепилась платиновая сетка, одновременно служившая имитатором сердечных хорд, электродом и частью полярографического датчика напряжения кислорода. К ней фиксировались датчики температуры и давления. Вторым электродом служил металлический стержень рукоятки поршня.

На всю длину вокруг цилиндра шприца наматывалось несколько сотен слоев из тысяч витков тонкой медной проволоки. Они заливались изоляционным лаком, поверх них надевался ферритовый цилиндр. Сделанный соленоид служил электромагнитным индуктором.

Через тройник, проводники от электрода, хемотронного и термодатчиков вместе с внешними проводами катушки выводились на усилители многоканального осциллографа. В шприц набиралось 10 мл свежей крови. Чтобы она быстро не сворачивалась, к ней добавлялся цитрат натрия, а для усиления люминесцентного свечения – люминол. Канюлю герметично закрывали, устройство оборачивали поролоном. Все манипуляции со шприцем повторялись по схеме предыдущего опыта.

Любое встряхивание этого сооружения с кровью, не говоря уже об ударах рукояткой поршня, приводило к появлению на экране осциллографа сначала магнитных импульсов соленоида, затем потенциалов от электродов. После них следовали сигналы от датчика давления, указывающие на его рост в течение 9–12 с. За это время кровь поднималась в полиэтиленовой трубке до 200–220 мм. Если же после ударов кран перед

трубкой не открывался, то давление крови в шприце увеличивалось до 17–23 мм рт.ст., и в ней возникала самопроизвольная пульсация. Стоило внешним усилиям создать постоянное давление выше 140 мм рт.ст., то ритм самопульсации спанился реже, а при снижении давления до 50–70 мм рт.ст. частота самопульсации крови увеличивалась.

Температура крови поднималась на 0,7–0,9 градусов за 15–20 секунд.

Люминесценция пузырьков проявлялась в сине-зеленом свечении и была видна в трубке на темном фоне. Интенсивность этого свечения пульсировала в ритме, превосходящем частоту ударов, и сохранялась после них еще в течение 8–10 минут. Показатели напряжения кислорода в крови менялись волнообразно, подобно люминесценции.

В опыте прирост объема водопроводной воды составил 0,5–1,5 %, а крови – 12–22 %. Такое 10-кратное увеличение объема

указывает на то, что структурная прочность воды в крови на порядок ниже водопроводной.

Особенность воды в плазме в том, что ее 4,5 литра находятся среди дисперсных, ламеллярных (слоистых) частиц взвеси электрически заряженных миллиардов эритроцитов и лейкоцитов, триллионов белковых и жировых мицелл, общая площадь которых более 1000 м<sup>2</sup>. В результате вода распределяется на ней в виде двухмерной пленки. К тому же она наполнена десятками неорганических солей, органических кристаллоидов, протеинов и газов O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, пребывающих в ней как в растворенном состоянии, так и в микропузырьках под давлением около 100 мм рт. ст., что приводит к огромному осмотическому давлению в крови – 7,6 атм. Кроме того, трехмерная сетка молекулярных связей пленки воды находится в непрерывных флюктуационных колебаниях со скоростью 10<sup>-11</sup> с.

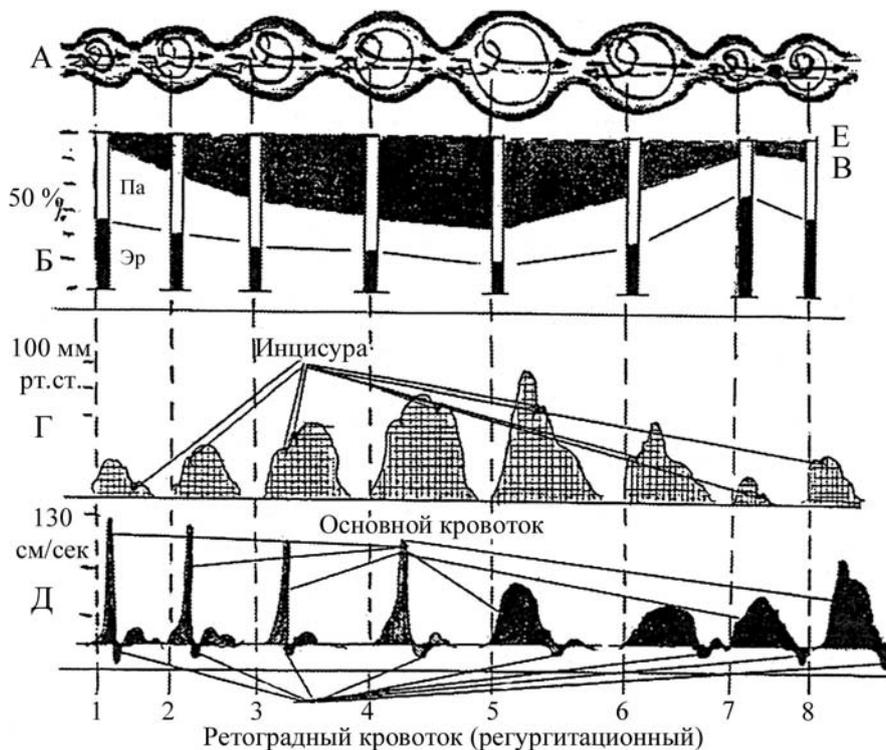


Рис. 1. Кавитационные циклы гемодинамики. А – основной кровоток, регургитационный кровоток; Б – гематокрит; Па - плазма; Эр – эритроциты; Г – пульсовое давление; Д – скорость кровотока; В–Е – изменение объема плазмы после оттаивания. 1 – легочные вены, 2 – левое предсердие, 3 – левый желудочек, 4 – аорта, 5 – бедренная артерия, 6 – бедренная вена, 7 – нижняя полая вена, 8 – правое предсердие

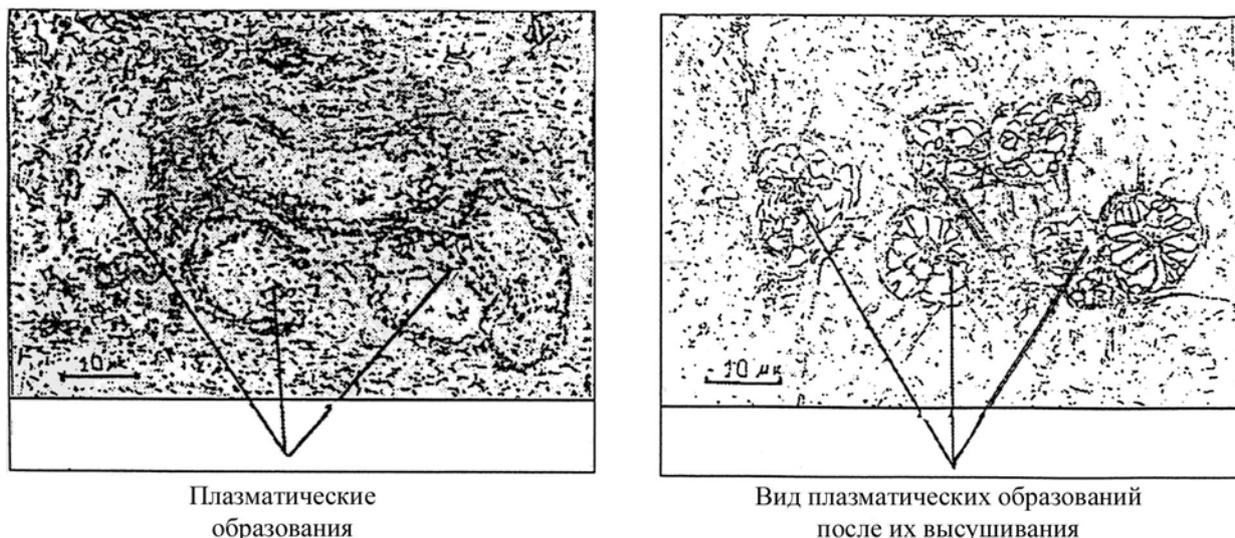


Рис. 2

Все эти факторы придают неустойчивость в поверхностном натяжении воды плазмы. Поэтому любые механические, температурные, электромагнитные и химические воздействия на кровь легко рвут в ней молекулярные связи. В эти вакуумные микрополости моментально устремляются газы. Возникают кавитационные зародыши, которые при низком давлении растут в диаметре в тысячи раз, сливаются между собой и превращаются в кавеолы. Вместе с ними увеличиваются в объеме и находящиеся в крови микропузырьки с газом. Все они вместе становятся морфологической структурой и меняют объем одной и той же массы крови. Своим давлением они создают в ограниченном пространстве крови постоянное напряжение, подобно сжатой пружине, способной в любой момент произвести силовой импульс ее движения.

Чтобы убедиться, что кавитационные пузырьки действительно являются постоянной морфологической субстанцией крови, был проведен следующий эксперимент.

У крупных собак измерялось давление и скорость кровотока в легочных артериях и венах, полостях предсердий и желудочков, аорте, бедренных артериях и венах и нижней полой вене. Из них затем бралась кровь в седиментационные трубки для определения гематокрита, СОЭ, на предметные стекла для высушивания и в камеру Горяева,

а также в полиэтиленовые пробирки по 10 мл для моментального замораживания в жидком азоте.

На рисунке представлены результаты эксперимента, которые показывают, как меняется гематокрит по ходу увеличения емкости сосудистого русла (рис. 1 б).

Наблюдения за кровью, вынесенной из организма и помещенной в стеклянные седиментационные трубки, показали, что она обладает эффектом самодвижения.

Он выражался хаотическим спуском и подъемом эритроцитов между дном трубки и поверхностным слоем плазмы, прилипшей к внутренней поверхности трубки. Самые активные и длительные перемещения происходили в крови, взятой из периферических артериол, где гематокрит составлял 10–15 %. Под угловым освещением было видно, как одни эритроциты спускаются, а другие пробиваются вверх толкающими их снизу полупрозрачными блестящими пузырьками, как бы их фантомами. На границе с воздухом они исчезали. Эти пузырьки обладали подъемной силой, способной выносить конгломераты эритроцитов со дна на поверхность трубки.

Подобные эффекты движения отдельных газовых пузырьков в плазме крови были зафиксированы в марте 2005 г. на кафедре органической химии биологического факультета МГУ д.б.н В.Л. Воейковым на

видеоустановке, созданной инженером И.П. Коганом Эта установка позволяет наблюдать под максимальным увеличением светового микроскопа за движением клеток крови в кювете в течение десятков часов и производить их видеозапись. На ней видно, что самодвижение крови продолжается в течение двух суток, имеет определенную направленность и фазы своей активности. Движение крови инициируют морфологически структурированные газовые пузырьки. Их диаметр составляет от 2 до 16 микрон. С течением времени размер пузырьков уменьшается, а поднимаясь к поверхности плазмы, они исчезают или сливаются в один большой пузырь над поверхностью плазмы.

Наше исследование гематокрита (количество эритроцитов в объеме крови) выявило, что по ходу движения крови от легочных вен до бедренных артерий он снижался, а в венозной крови от нижних конечностей до правого сердца гематокрит повышался, т.е. основное прибавление объема крови происходило в артериальной системе не за счет количества форменных элементов крови, а вследствие разбавления ее газовыми пузырьками в плазме и снижалось в венах по мере приближения к сердцу.

Микроскопические исследования мазков крови на расположение отдельных эритроцитов и их агрегатов в зависимости от места забора крови показали, что в крови из легочных вен промежутки, заполняемые микропузырьками между эритроцитами, равномерно распределены и составляют 7–10 микрон. Когда же кровь проходила через предсердия и желудочки, картина менялась: в ней появлялись разрывы от 20 до 50 мк и более, толщина эритроцитов возрастала на 0,5–1,5 мк. На темном фоне наблюдались прозрачные промежутки, в которых встречались образования, напоминающие тромбоциты, но превосходящие их по размеру в несколько раз.

Когда эти мазки высыхали, то их размеры сокращались на 1/4–1/5 часть, они приобретали вид многократно разорванных внутри колец с множеством пустых ячеек (рис. 2). По всей вероятности, это были те

самые лопнувшие пузырьки с газом, которые поднимали эритроциты к поверхности плазмы. Поскольку в крови из легочных вен они редко встречались, то их образование должно было происходить в полостях сердца и в сосудах. И, судя по тому, что в седиментационных трубках они сохранялись от 5 до 7 минут, можно утверждать, что это временно живущие структуры. Такие пустоты не определялись в дегазированной желудочковой и аортальной плазме крови или отстоявшейся в течение двух суток.

При оттаивании мгновенно замороженной артериальной крови, взятой из разных полостей сердца и регионов сосудистой системы, обнаружилось, что чем дальше кровь находилась от легочных вен, тем она больше сжималась в своем объеме (рис. 1 в-е).

Эксперимент показал, что кровь, прошедшая через сердце, действительно претерпевает изменения, вызванные кавитацией. Она становится более разбавленной за счет увеличения в ней полых плазменных образований, заполненных газами крови и, таким образом, увеличивающим ее объем. На рис. 1 видно, что движение крови в артериях направлено в сторону снижения гематокрита, а в венах, наоборот, навстречу его повышения.

По сравнению с экспериментами, сердце за один цикл увеличивает объем крови на 300 %. Столь значительное изменение связано, видимо, с какими-то скрытыми в сердце функциями. Чтобы понять их, была детально проанализирована гемодинамика сердечных циклов.

До начала диастолы предсердий, прежде чем откроются устья легочных вен, поток крови перед ними останавливается и давление в них повышается. В диастолу, в пустые полости предсердий, где в этот момент низкое давление, устремляются навстречу друг другу два потока: один из легочных вен, а второй возвращается (регургитирует) из желудочка, и за ним захлопываются атриовентрикулярные клапаны. Объем крови в предсердиях увеличивается, давление в них растет, а движение крови затормаживается. Часть этой крови из них регур-

гитирует в легочные вены. В предсердиях на миг падает давление, и сфинктеры легочных вен сжимаются. Полости предсердий оказываются изолированными от притока крови. В это время в них наступает вторая волна прироста объема крови, напор которого открывает атриовентрикулярные клапаны в желудочки, находящиеся в состоянии диастолы, давление в третий раз повышается, и кровь начинает вливаться в них еще до начала систолы предсердий.

Этот эффект самодвижения крови происходит потому, что в ее увеличенном объеме появляются силы, опережающие мышечные сокращения на 0,02–0,04 с. Наступившая вслед за этим систола предсердий выталкивает оставшуюся в них кровь в желудочки, навстречу которой из аорты регургитирует часть крови, и за ней захлопываются аортальные клапаны. Ускоренный поток крови замедляется, увеличивается в объеме, и часть его возвращается обратно в предсердия, а в желудочках кратковременно падает давление. Вслед за этой регургитацией атриовентрикулярные клапаны захлопываются (несмотря на то, что давление в желудочках в этот момент меньше, чем в предсердиях), и желудочки оказываются изолированными от притока крови. В них так же, как было в предсердиях, второй раз увеличивается объем крови, придавая сердцу шаровидную форму. Под напором увеличенного объема крови открываются клапаны аорты, и кровь ускоряется в нее. Несмотря на то, что происходит выброс крови из желудочков, ее объем и давление в желудочке продолжают расти. И лишь спустя 0,02 с мышцы миокарда начинают сокращаться уже вслед за уходящим объемом крови. Большая часть вытолкнутой крови уходит в аорту, а ее меньший поток – «остаточная кровь» – возвращается в желудочки, и за ней захлопываются аортальные клапаны.

Контрастная доплеровская эхокардиография, исследующая регургитацию, зарегистрировала появление пустот (каверн) в объеме крови полостей сердца в тот момент, когда его покидает возвратная струя крови [10]. Появление каверн в полостях сердца по

времени совпадает с кратковременным уменьшением объема крови и падением в ней давления. Это позволяет понять механизм «спонтанного» увеличения объема крови в сердце.

Возвратная струя уходит со скоростью от 3 до 15 м/сек, развивая давление на 30–40 мм своего пути в межклапанном пространстве до 800 мм. рт. ст., оставляя после себя в объеме крови полость (вакуумную каверну) с отрицательным давлением и обнаженными ионными связями. Это действующий источник «чистой» физической силы. К нему устремляется окружающая ее кровь из зоны с повышенным давлением. Но так как в этот момент кровь уже ограничена герметически замкнутой полостью сердца, то движение ее частиц к каверне возможно только при массовом разрыве слоев воды крови. В образовавшиеся микрополости устремляются газы крови, возникают пузырьки. Своим множеством они увеличивают объем крови. Эта вакуумная провокация сердца мгновенно извлекает из крови растворенные в ней газы и увеличивает в размере находящиеся в крови газовые пузырьки, что и является причиной столь значительного увеличения ее объема в фазу изометрического напряжения. Мгновенный рост этого объема наделяет кровь пондеромоторными силами, которые действуют быстро и обособленно от мышечных сокращений сердца.

Чтобы удостовериться, что именно пострегургитирующая каверна провоцирует основной рост кавитационного объема крови в сердце, был проделан модельный эксперимент.

Он проводился по предыдущей схеме с той разницей, что на канюлю шприца вместо герметической пробки надевалась резиновая груша лабораторной микропипетки объемом в 5 мл, из полости которой на глубину середины крови (в 10 мл.) в шприце вставлялась полиэтиленовая трубка диаметром 3 мм. Во время удара рукояткой шприца груша сдавливалась большим пальцем до упора, а в момент отрыва от липкой поверхности отпускаясь, и в нее по трубке из полости шприца втягивались 1–1,5 мл крови.

После 15 таких периодических «регургитаций» 10 мл крови увеличились в объеме на 55–60 %, и каждое всасывание части крови в трубку на экране осциллографа сопровождалось магнитным импульсом солиноида, вслед за которым появлялся длительный подъем электрического потенциала, опережающего рост сигнала хемотронного датчика давления в крови. Увеличивающийся за этим объем крови отодвигал наружу поршень шприца.

Эксперимент сделал понятным энергетическое действие регургитирующей струи: когда она выносит часть крови из полости сердца, то оставляет после себя вакуумную каверну. Она вызывает цепную реакцию размножения кавитационных пузырьков в плазме с обнажением в них ионных связей, сопровождающихся электромагнитными эффектами, что в конечном счете переводит осмотические силы крови в пондеромоторные.

Компьютерные исследования оцифрованных ЭКГ в МГУЛ, полученных на аппарате «Cardiag» и проанализированных с помощью сечения Пуанкаре [17], показали, что локальные вихревые токи составляют основу ЭКГ и соответствуют шумовой частоте фонокардиограммы в диапазоне 600–800 гц сердечных тонов. Тем самым из ЭКГ была выделена электромагнитная составляющая отдельных кавитационных пузырьков, по динамике которых можно судить об

изменении объема крови в полостях сердца. Это позволяет по-новому оценить природу ЭКГ и, соответственно, открывает новые возможности ее диагностики.

На появление пондеромоторных сил кавитации указывают и данные доплеровской эхокардиографии. Измерения начальных и конечных интервалов движения регургитирующей струи крови в промежутке 30–40 мм в межклапанном пространстве желудочков и предсердий, происходящей в 0,02 с, показали, что в ней возникают скорости от 3-х и более м/с и давление – от 32 до 800 мм. рт. ст. (рис. 3) [10].

Из всех процессов организма такой концентрированной энергией обладает только регургитирующий поток.

Сопоставление всех данных эксперимента выявило закономерность, заключающуюся в том, что кавитационный прирост объема крови прямо пропорционален скорости и давлению регургитационного потока и обратно пропорционален гематокриту (рис.1 а-е).

Эту зависимость можно выразить следующим уравнением

$$Q = (v - v_1) \cdot (p - p_1) / (h - h_1),$$

- где  $Q$  – кавитационный объем;  
 $v$  – скорость основного потока;  
 $v_1$  – скорость регургитации;  
 $p$  – систолическое давление;  
 $p_1$  – давление в потоке регургитации;  
 $h$  – гематокрит в основном потоке;  
 $h_1$  – гематокрит в регургитации.

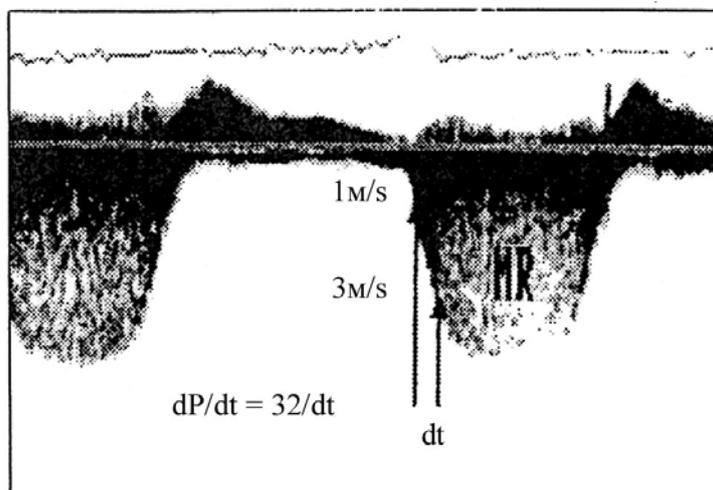


Рис. 3. Фото митральной регургитации (по Н. Шиллеру, 1993)

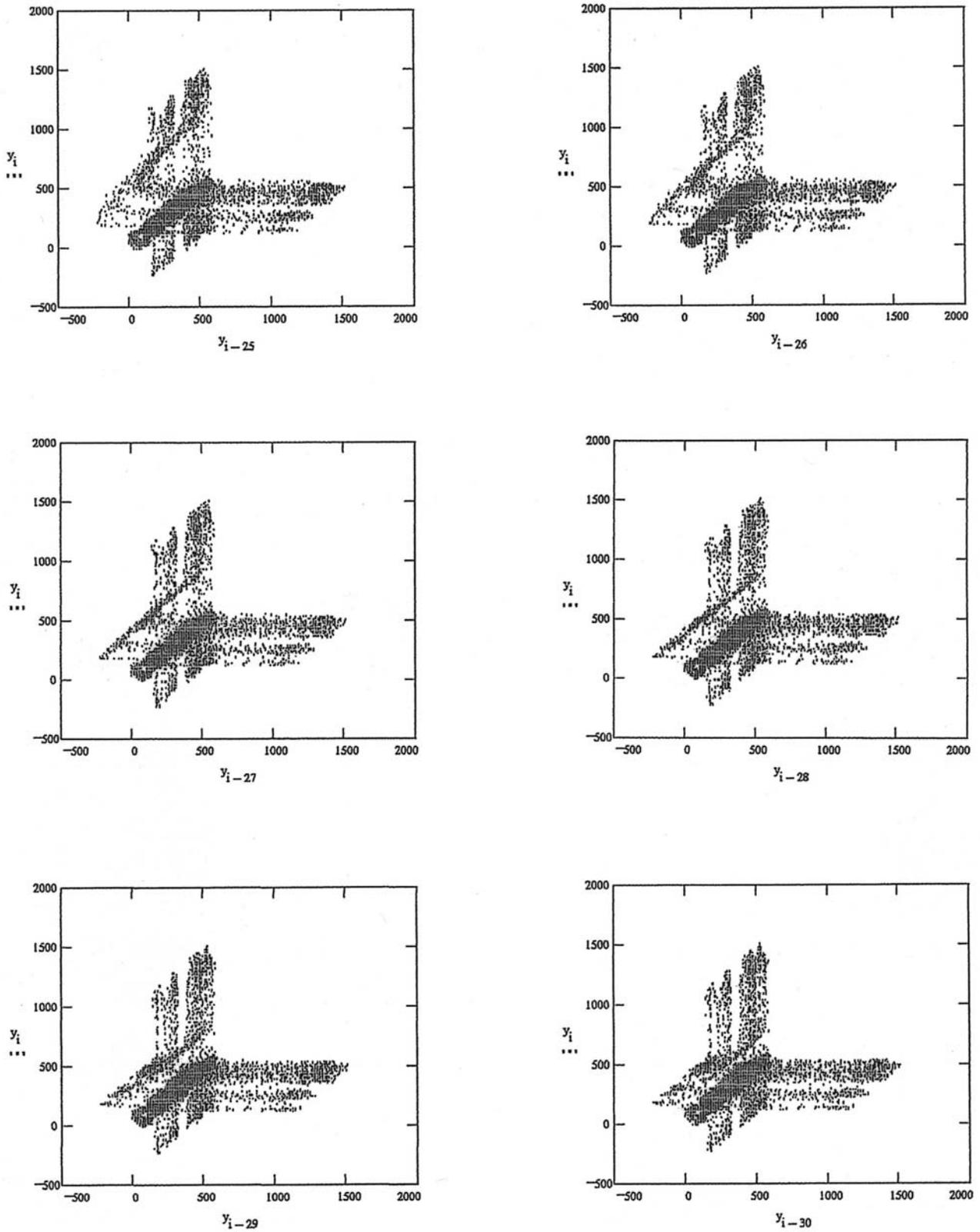


Рис. 4. ЭКГ здорового человека в сечении Пуанкаре

Если в это уравнение внести данные наших экспериментов, то получим объем крови регургитирующего потока, равный  $\sim 5 \text{ см}^3$ , оставляющий после себя каверну такого же размера. Именно ее вакуумные силы создают кавитационный рост объема крови в полостях сердца.

Эффект регургитации длится 0,02 с и не имеет очевидных морфологических исполнителей. Ее силовой импульс возникает внутри сердечных объемов крови, а его вектор всегда направлен навстречу ее кругохождению. Именно эта парадоксальность удерживает движение крови только в одном направлении. Волна регургитационной струи из правого предсердия регистрируется даже в печеночных, бедренных и подкожных венах. Своим появлением она вызывает кавитационный рост объема крови в этих сосудах и тем самым создает пондеромоторные силы для ее возврата в правое сердце.

Поскольку в перемещении крови сила мышечных сокращений сердца составляет только 1/6 часть [13] или 0,3 Вт, то остальные 5/6 – 1,5 Вт приходятся на пондеромоторные силы кавитации, которые, как видно, являются силой *vis a fronte*.

Таким образом, можно утверждать, что у сердца есть еще функция: создание кавитационного объема в крови, являющегося основным силовым источником ее кругохождения.

Сделанное открытие переводит традиционные многовековые гидродинамические представления о работе сердца на новый энергетический уровень.

Становится понятным, как имеющаяся в организме масса крови способна менять свой объем и заполнять им емкость сосудов, превосходящую ее в 5–6 раз. Благодаря этому нашему телу не надо депонировать кровь и носить в себе лишних 25–30 кг.

Эффектами кавитации крови можно объяснить непонятную до сих пор этиологию многих сердечно-сосудистых заболеваний:

гипертонии, мозговых инсультов, разрывов сердца, внезапной смерти от тампонады сердца и многих других. В причине этих патологий явно просматривается неадекватный рост объема крови, приводящий к разрушению окружающих тканей или же к схлопыванию ее объема.

### Библиографический список

1. Цион И.Ф. Курс лекций по физиологии. – СПб, 1873. – Т. 2. – С. 147
2. Конради Г.П., Левтов В.А, Теплов С.И. Вопросы регуляции регионарного кровообращения. – Л.: Наука, 1969. – С. 13
3. Мазуркевич Г.С. и др. в кн.: Шок. – СПб, Политехника, 2004. – С. 235
4. Фолков Б., Нил Э. Кровообращение. – М.: Медицина, 1976. – С. 14.
5. Маршалл Р.Д. Шефферд Д.Т. Функция сердца у здоровых и больных. – М., 1972. – С 182.
6. Гайтон А. Минутный объем сердца и его регуляция. – М., 1969. – С. 23.
7. Бехтурсонова Н.С. // Сов.мед. – 1963. – №3. – С. 12.
8. Физиология и патофизиология легочных сосудов. – М., 1995. – С. 143.
9. Соловьев Г.М., Радзивил Г.Г. // Кардиология – 1968. – №6. – С. 16–26.
10. Шиллер Н. Осипов М.А. Клиническая эхокардиография. – М., 1993. – С. 70, 118, 261.
11. Кушаковский М.С. Аритмии сердца. – СПб.: Фолиант, 2004. – С. 561.
12. Селезнев С.А. Комплексная оценка кровообращения в экспериментальной патологии. – Л., 1976. – С. 120.
13. Соловьев Г.М., Радзивил Г.Г. Кровопотеря и регуляция кровообращения в хирургии. – М., 1973.
14. Атьков О.Ю. Бедненко В.С. Гипокинезия. Невесомость. – М., 1989. – С. 83.
15. Осложнения при операциях на открытом сердце. – М., 1972. – С. 22, 243, 174.
16. Руководство по кардиологии. – М.: Медицина, 1982. – С. 15, 200.
17. Гончаренко А.И., Пахомова Е.Е., Короткина М.Р. Компьютерное моделирование минисердце // Лесной вестник. – 2004. – №3(34). – С. 169–186.
18. Фатенков В.Н. Биомеханика сердца. – М.: Медицина, 1990. – С. 51, 125.
19. Pappenheimer J.R. Physiol. Rev. № 33, 1953. P. 387
20. Mellander S. Acta Physiol. Scand. 1960. Vol.50. P. 81-86.
21. Pugh L.G. J.Physiol. 1969, 200, №2. P. 345-351.
22. Wiggers H.C. Am.J.Physiol., 140. 519. 1944 a.

## БИТОРСИОННЫЕ ПОЛЯ

М.Р. КОРОТКИНА, МГУЛ и МГУ,  
А.Б. БУРЛАКОВ, МГУ

Эмбрионы ранней стадии развития в процессе деления клеток испускают очень сильное излучение, которое Гурвич назвал митагенетическим. Возможность изучения этого излучения позволит понять механизмы развития эмбрионов ранней стадии развития.

Аналогичное излучение наблюдали Вавилов и Черенков в растениях. Это излучение, которое они фиксировали с помощью физических приборов, получило название «свечение Вавилова и Черенкова». Объяснения физической природы этого свечения до настоящего времени нет. Они сделали следующее утверждение: «Если световой поток попадает в среду с большей плотностью, чем плотность окружающей среды, то в такой среде появляется „свечение“». Известно, что биологические объекты обладают большей плотностью и в них появляется это свечение.

Открыть природу этого явления с помощью физических приборов очень сложно, практически невозможно.

Луи Пастер, проводя эксперименты на кислотах, впервые обнаружил эффект проявления левого и правого.

Математическая философия левого и правого [1] и [2].

С точки зрения научного мышления между левым и правым не существует полярной противоположности. Чтобы определить, что является левым, а что правым, требуется произвольный акт выбора. После того как этот выбор сделан для одного тела, понятия левого и правого определены для всех тел.

В пространстве различие между правым и левым связано с ориентацией винта: поворот налево подразумевает направление, в котором мы поворачиваемся вместе с направлением вверх от ног к голове нашего

тела, образуя левый винт. Если задавать ось вращения в противоположном направлении, то движение образует правый винт.

Существуют некоторые кристаллические вещества (оптически активные), которые обнаруживают внутреннюю асимметрию своего строения, поворачивая плоскость поляризации пропускаемого через них поляризованного света влево или вправо (направление, в котором совершается поворот плоскости поляризации, когда свет проходит в определенном направлении, образует вместе с этим, последним, соответственно левый или правый винт).

Пользуясь терминологией Лейбница, левое и правое неразличимы: внутренняя структура пространства не позволяет нам отличить левый винт от правого, что заставляет нас сделать произвольный выбор.

Пространство изучает геометрия. Структура реального мира существует в физическом пространстве и отражается во всеобщих законах природы. Последние формулируются в терминах некоторых основных величин, являющихся функциями пространства и времени.

Если бы эти законы не были во всех случаях инвариантными относительно отражения, тогда структура пространства должна «содержать винт».

Во всей физике не существует правила, позволяющего найти внутреннее различие между левым и правым. Левое и правое эквивалентны так же, как все точки и все направления в пространстве. Положение, направление, левое и правое, являются относительными понятиями.

Симметрия левого и правого присуща общей организации природы. Эта симметрия не всегда будет проявляться в законченной форме в каждом отдельном объекте природы.

Низшие формы животных – мелкие организмы, взвешенные в воде, – имеют формы, близкие к шарообразной форме. Для видов, живущих на дне океана, направление силы тяжести является важнейшим фактором для формирования форм тела. Для животных, обладающих способностью самостоятельно передвигаться в воде, в воздухе или по земле, решающее влияние оказывает сила тяжести и направление (от заднего к переднему концу тела), в котором движется животное.

После установления переднезадней, спинно-брюшной, а тем самым и лево-правой осей произвольным остается различие между правым и левым. На этом этапе нужно предположить зеркальную симметрию. В случае асимметричного развития организма должно возникнуть винтовое, а не прямолинейное движение.

Поразительным примером симметрии в неорганическом мире являются кристаллы. Если зеркальная симметрия не имеет места, то возможны энантиоморфные кристаллы, существующие в левой и правой формах.

Оптически активное вещество, т.е. вещество, вращающее плоскость поляризованного света влево или вправо, кристаллизуется в таких несимметричных формах. Если в природе существует левая форма, то можно предполагать, что существует соответствующая ей правая форма и в среднем обе формы встречаются одинаково часто.

Проблема филогенеза левого и правого (филогенез – от греческих слов *φίλη* – племя и *γένος* – род) – процесс развития всех органических форм или отдельных видов).

В 1948 г. Л. Пастер (/1822–1895/, знаменитый французский микробиолог, начал свою научную карьеру как химик, и в этой области ему удалось сделать несколько значительных открытий) открыл, что если растворенную в воде натриево-аммониевую соль оптически неактивной виноградной кислоты подвергнуть кристаллизации при низкой температуре, то из водного раствора выпадает осадок, состоящий из мельчайших кристаллов двух видов, причем кристаллы одного вида являются зеркальными образами кри-

сталлов другого вида. Эти кристаллы были тщательно отделены друг от друга. При этом оказалось, что кислоты, получающиеся из кристаллов каждого вида в отдельности, обладают тем же химическим строением, что и виноградная кислота, но одна из этих двух кислот оптически активна и вращает плоскость поляризации влево, а другая оптически активна и вращает плоскость поляризации вправо. Последняя из них совпадает с винной кислотой, получающейся при брожении виноградного сока, а первая никогда не наблюдалась в природе.

Установлено, что большинство многочисленных углеродистых соединений встречается в природе только в одной – левой или правой – форме.

Изучение химического строения человеческого тела показало, что мы «содержим винт», направление которого одно и то же в каждом из нас. Наше тело содержит правовращательную форму глюкозы и левовращательную форму фруктозы.

За счет асимметрии химического состава живых организмов следует отнести успех пастеровского метода разделения левых и правых форм веществ посредством энзиматического действия бактерий, плесени, дрожжей и т.п.

Л. Пастер обнаружил, что раствор соли виноградной кислоты, первоначально оптически активной, постепенно становится левовращающим, когда на нем выращивали культуру серо-голубой плесени (*Penicillium glaucum*). Организм отбирал в пищу ту форму молекул винной кислоты, которая наилучшим образом соответствовала его собственному несимметричному химическому составу.

Известен один точно установленный случай – реакция нитрокоричной кислоты с бромом, когда свет, подвергшийся круговой поляризации, производит оптически активное вещество.

Л. Пастер считал, что производство оптически активных соединений в одной-единственной форме является исключительной привилегией жизни.

Проблема онтогенеза левого и правого (онтогенез (от греческих слов *ὄντα* – сущее

и  $\gamma\acute{\iota}\nu\omicron\varsigma$ ) – процесс развития одного индивидуума от зарождения до гибели).

Возникают два вопроса. Первый вопрос. Во-первых, фиксирует ли первое деление оплодотворенного яйца животного на две клетки плоскость симметрии так, что из одной клетки развивается левая, а из другой – правая половина тела? Во-вторых, чем определяется плоскость первого деления?

Второй вопрос. В яйце всякого животного с самого начала имеется некоторая полярная ось, соединяющая те части яйца, из которых должны развиться анимальный и вегетативный полюсы бластулы. Эта ось вместе с тем местом, где сперматозоид при

оплодотворении проникает в яйцо, определяет некоторую плоскость. Считаем, что это есть плоскость первого деления.

Положение полярной оси и направление плоскости симметрии может определяться и другими факторами.

Первый вопрос: приводит ли первый митоз клетки к разделению ее на левую и правую части.

Согласно экспериментам Дриша (*Hans Driesch*) над морским ежом установлено, что один бластомер, изолированный от своего партнера на двухклеточной стадии развития, превращается в целую гаустулу. Последняя отличается от нормальной несколько меньшими размерами (рис. 1).

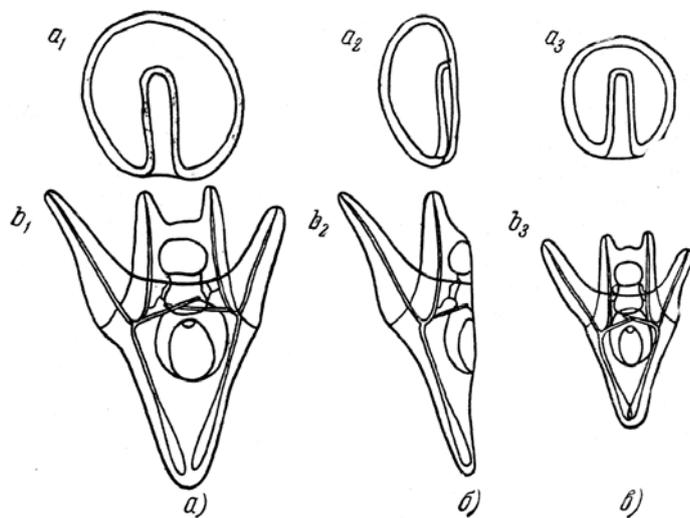


Рис. 1



Рис. 2

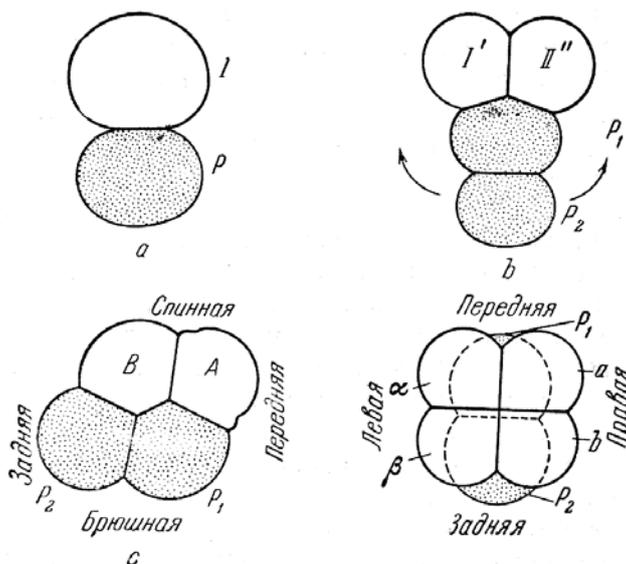


Рис. 3

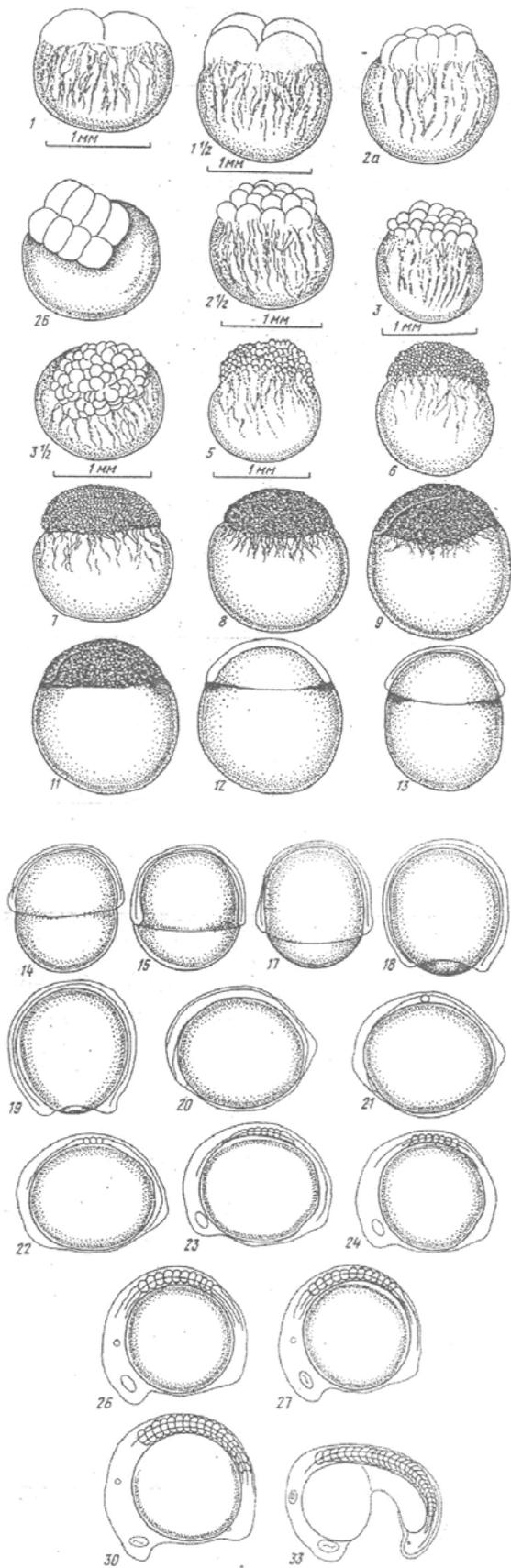


Рис. 4

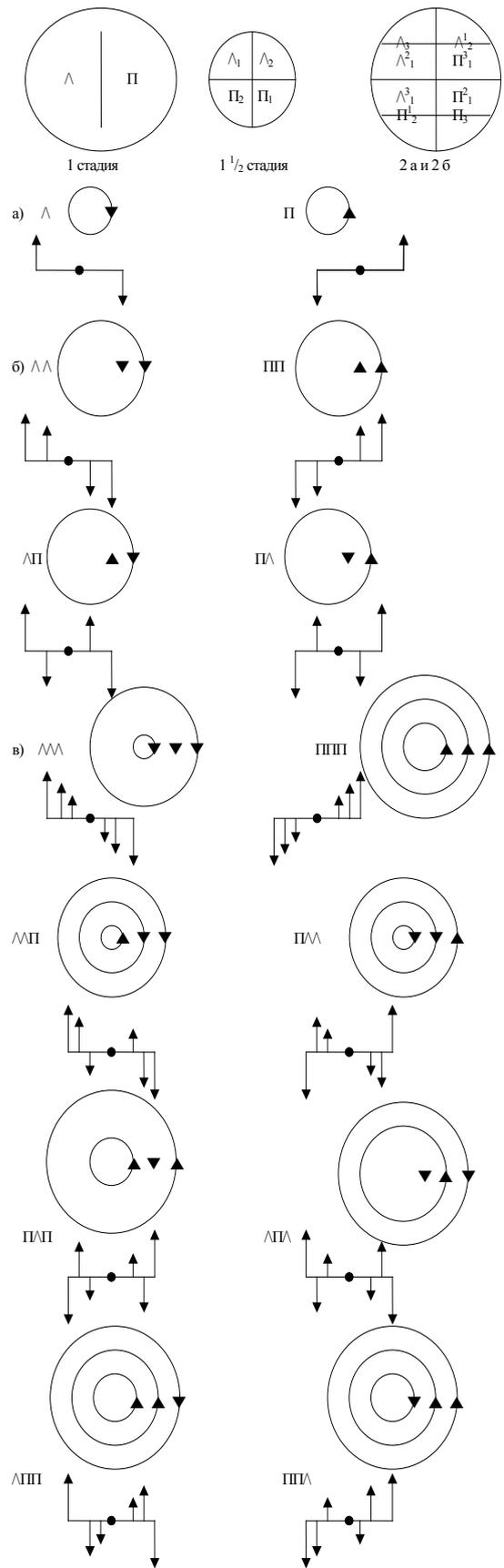


Рис. 5. Бигорсионные поля



клетку, которая соприкасается с  $P_1$ , а другую обозначим буквой  $B$ . Получится параллелограмм:  $AP_2$  есть переднезадняя, а  $BP_1$  – спинно-брюшная ось. Следующее деление вдоль плоскости, перпендикулярной той, которая разделяет  $A$  и  $B$ , расщепляет  $A$  и  $B$  на две симметричные половины:  $A = a + \alpha$ ,  $B = b + \beta$ . Это деление определяет левое и правое.

Различие между правым и левым связано с проблемами, относящимися к филогенезу и онтогенезу организмов.

Биоторсионное поле подробно рассмотрено в работе [3]. Для случая эмбрионов ранней стадии развития (рис. 4) биоторсионные поля схематично представлены на (рис. 5).

Согласно схеме (рис. 5) в эмбрионах ранней стадии развития торсионное поле представляет собой «сплошную винтовую систему». Направление винта определяется

расположением «шапочки» и первой плоскости деления (два бластомера). При первом делении зафиксировано самое сильное излучение эмбрионов ранней стадии развития. Все остальные излучения при последующем делении эмбриона «подстраиваются» под основное излучение.

Зафиксировать эти излучения очень сложно физическими приборами. Необходимо искать новые приборы и методы исследования этих сверхслабых, но биологически «очень сильных излучений».

#### Библиографический список

1. Вейль Г. Симметрия. – М.: Наука, 1968. – 191 с.
2. Вернадский В.И. Переписка с математиками. – М.: МГУ, (механико-математический факультет) 1996. (составитель М.И. Кратко). – С. 112.
3. Короткина М.Р. Бурлаков А.Б. Биофотонная эмиссия // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – № 4. – 2004.

## ДИСКРЕТНОСТЬ ПРОСТРАНСТВА И ВРЕМЕНИ

М.Р. КОРОТКИНА, МГУЛ и МГУ

Во вступительном слове на открытии биоматематического кружка в 1930 г. [1] В.И. Вернадский сформулировал его основную задачу:

«Нашей задачей должно быть ознакомление с происходящим сейчас вхождением в биологическую мысль математического мышления – с одной стороны, а с другой – ознакомление с теми математическими проблемами, которые ставятся нашей научной работой: изучение жизни с геохимической точки зрения... Та новая постановка проблем, которая должна вытекать из математического охвата новых явлений природы, должна иметь значение и для математики, вызывать интерес и в их среде; это исконный путь развития математического мышления, величайшей силы человеческого разума; математик исходит не только из логики, но и из новых задач, которые ему ставятся изучением при-

родных явлений, в том числе и явлений жизни в возможно широком ее охвате».

В своем письме В.И. Вернадский к С.А. Чаплыгину от 2 апреля 1929 г. писал:

«Мне, кажется, удалось подойти к обобщениям и новым представлениям, которые мне кажутся важными, но, думаю, потребуются много усилий, пока они войдут в общее сознание. Может быть, конечно, я уже стал фанатиком этих идей и теряю перспективу, но не думаю, т.к. найденные мною законности – числовые и выражены в числовых формулах. В истории планеты живые тела в своем геохимическом эффекте – в размножении – столь же охватываются числом, как охватывались им движения небесных тел.»

В своем письме Н.Н. Лузин к В.И. Вернадскому писал:

«... Я ознакомился с работами *Pierre Curie* о симметрии [2, 3], поражен их силой

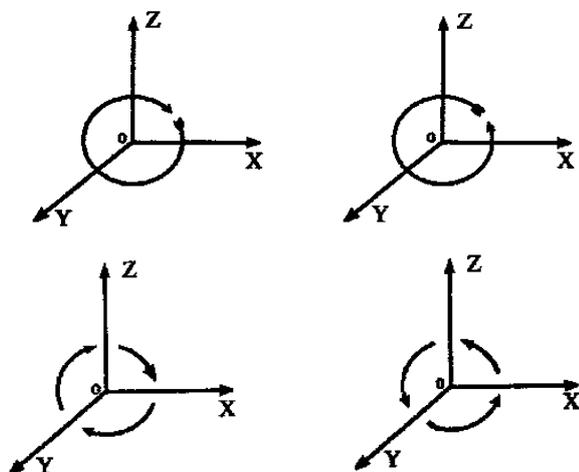
и философской значительностью. Теперь только я понял Ваш важный намек на глубочайшую, не выявленную еще изначальную роль симметрии в явлениях природы. Очевидно, что вроде того, как теория вероятностей охватывает «законы хаоса» (= законы больших чисел), так и теория симметрии охватывает какие-то изначальные законы, но чего? Что им соответствует в реальности?

Вообще дожидаюсь с нетерпением окончания составления обещанного мною трактата по теории функций, чтобы уйти в поразительной красоте и пленительной общезначимости законы кристаллографии».

Из письма Н.Н. Лузина к В.И. Вернадскому от 13 мая 1937 г. [1, 4]:

Для меня Ваша проблема звучит так: «Узнать, можно ли чисто логическим путем в евклидовом пространстве 3-х измерений, отправляясь от его аксиом, отличить левое вращение от правого?»

Следовательно, геометрически начертив, нужно логически отличить друг от друга оба вращения, переводящие ось  $OX$  в ось  $OY$ , ось  $OY$  – в ось  $OZ$  и ось  $OZ$  – в ось  $OX$ , т. е.



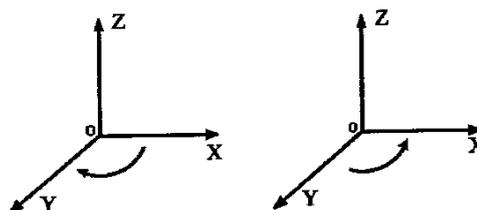
Для полного разрешения этого вопроса, очень трудного и глубокого, надо прежде всего иметь перед глазами список аксиом трехмерного евклидова пространства.

Логически представляются лишь две возможности:

1) или логическое различие правого вращения от левого вполне возможно на основе списка аксиом трехмерного пространства;

2) или такое различие невозможно.

Самым интересным был бы, конечно, второй случай, т. е. случай логической неразличимости обоих вращений друг от друга. Ибо это, с одной стороны, показывало бы, что список аксиом неполон, потому что не позволяет дедуцировать столь важного и столь простого факта, каково различие обоих указанных вращений. А с другой стороны, это показывало бы, что скелет аксиом не охватывает нашей физиологии, ибо различие обоих вращений есть эффект чисто физиологический и, по крайней мере для наблюдателя, стоящего на плоскости  $XOY$ , имеющего голову на положительной части оси  $OZ$  и наблюдающего вращение оси  $OX$  до совмещения ее с осью  $OY$ . Здесь эффект есть чисто физиологический, связанный, может быть, с помещением сердца в левой стороне нашего тела, – словом, связанный с дисимметрией, которая делает иллюзорным известный опыт профессора *Bouridan'a* (извините за шутку!).



Но даже если будет иметь место первая возможность, т.е. случай осуществимости формальной дедукции из аксиом различения правого вращения от левого, то здесь возникает соблазнительная и дерзкая мысль: исследовать природу этих аксиом и указать, какие именно связаны с дисимметрией нашего организма.

Это исследование не слишком пустячное, ибо, раз *Pierre Curie* выставил свои три аксиомы относительно симметричного и дисимметричного в причинах (*causes*) и следствиях (*effets*) – аксиомы, чудесно выражающие своеобразный закон сохранения симметрии (или инвариантность симметричности), то, право, извинительно спросить себя, какие именно аксиомы геометрии Евклида трехмерного пространства связаны тесно с симметрией и с физиологией различие-

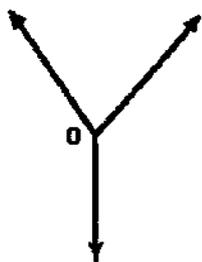
ния правого от левого? Я с большим удовольствием и живым интересом прочел первые три главы Вашей книжки «*Les grands hommes de France. Pierre Curie*», но нахожу изложение идей гениального *Pierre Curie* слишком популярным, беглым и недостаточно глубоким, здесь надо взяться за «*Ouvies*» самого *P. Curie*.

Обращаюсь теперь к системе аксиом трехмерного пространства Евклида такой, какая дана Давидом в его знаменитых «*Grundlagen der Geometrie*». Мы видим, что аксиомы эти делятся на 5 групп.

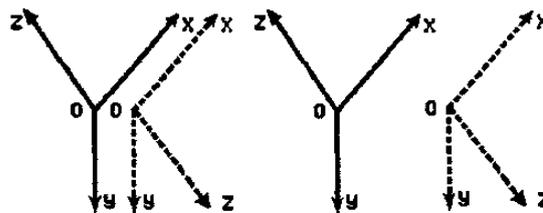
Из письма Н.Н. Лузина к В.И. Вернадскому от 14 мая 1937 г. [1, 4]:

«...Я зашел к Сергею Павловичу Финикову и имел с ним беседу относительно Вашей проблемы».

Его мнение совпало с моим, т.е. что аксиомы геометрии Евклида позволяют установить существование двух различных вращений, не сводимых одно к другому с помощью непрерывного движения.



Он указал на следующий факт: если возьмем триэдр, т. е. три взаимно перпендикулярные полупрямые, исходящие из одной точки  $O$ , то мы можем одну полупрямую назвать  $OX$ , другую полупрямую  $OY$ , и третью полупрямую  $OZ$ . Всего у нас будет таких способов  $3! = 1 + 2 + 3 = 6$ . И С.П. Фиников указал, что три из этих именованных триэдра будут тождественны друг другу, т. е. переводимы один в другой простым наложением и что три других триэдра тоже будут наложимы друг на друга, но что можно строго доказать, что никакой представитель первых трех триэдров не накладывается на представителя последних трех триэдров, потому что последние три триэдра суть зеркальные отражения первых трех триэдров:



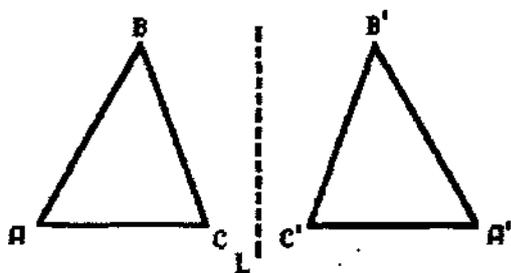
Он сообщил, что невозможность наложения триэдра второй группы на триэдр первой группы строго доказана.

Со своей стороны, я думаю, что было бы интересно найти в точности те аксиомы, благодаря которым получается доказательство невозможности такого наложения. Но при этом думаю, что работа эта, конечно, уточненная, не будет для Вас представлять большого значения, потому что результат ее негативен и притом формален. Действительно, раз Вы ищете связей – в некотором новом смысле между явлением жизни и вращением левосторонним и правосторонним, – то Вам уточненное отыскание (вернее, отбор) системы аксиом, производящих различие между вращениями правым и левым, покажется лишь ненужным топтанием на месте.

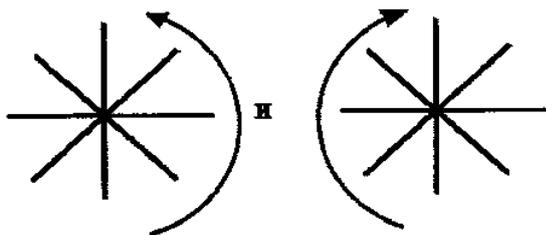
Я еще укажу на то, что при выходе в пространство 4-х измерений триэдр второго рода совместим наложением на триэдр первого рода. Следовательно, непрерывное движение триэдра как твердой системы совмещает наложением любой именованный триэдр на любой другой именованный триэдр, но при условии выхода из рассматриваемого пространства 3-х измерений в пространство 4-х измерений и снова возвращения в первоначальное пространство 3-х измерений.

Это как на плоскости два равных симметричных треугольника  $ABC$  и  $A'B'C'$  совместимы наложением при условии переворачивания треугольника  $A'B'C'$  на другую сторону путем вращения около прямой  $L$ , причем это вращение уже выводит треугольник  $A'B'C'$  за пределы первоначального пространства 2-х измерений. Возможно, что явления жизни, связанные с различием вращений правого и левого как-то связаны с таким преобразованием правых и левых

кристаллов. Но наше формальное математическое мышление о таком преобразовании с помощью ухода в пространство 4-х измерений и возвращения в наше первоначальное пространство 3-х измерений, мне кажется, в корне неприменимо к Вашей проблеме, потому что пространство 4-х измерений существует лишь в формальном мышлении математика, но я не верю в его реальное существование (ибо тогда надо верить и в пространство – реальное – 5,6,7,...,  $n$ ,... измерений, а это мне кажется не имеющим большого вкуса). Возможно, впрочем, что истинное пространство просто безмерно и что 3-мерность создана лишь нашей организацией. Это было бы хорошим решением некоторых загадок стереохимии.

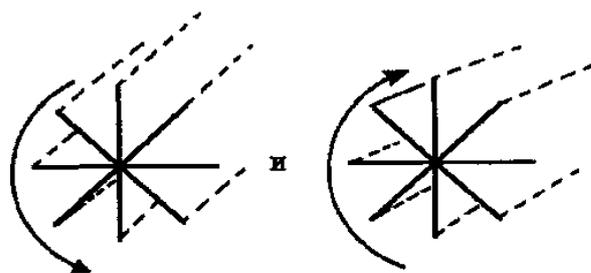


В дальнейшем путь, естественно, намечается такой: надо доказать, что на плоскости  $a$  имеется два и только два различных вращения пучка прямых:



причем эти два различных вращения неприводимы одно к другому непрерывным перемещением в плоскости, но переводимы выходом в 3-мерное пространство и переворачиванием плоскости на другую сторону.

И, наконец, последний этап – это доказательство того, что в пространстве 3-х измерений имеется два и только два различных вращения пучка плоскостей:



причем эти два различных вращения неприводимы одно к другому непрерывным перемещением в пространстве 3-х измерений, но переводимы выходом в 4-мерное пространство.

Из письма Н.Н. Лузина к В.И. Вернадскому от 28 июня 1937 г. [4, 1]:

«... Ваш вопрос о вращениях очень глубок. Вопрос в том, имеются ли два пространства Евклида, одно из которых левовращающее, а другое – правовращающее? И какими безупречными аксиомами характеризовать то или другое пространство?»

Ведь вводит же Эйнштейн новое пространство, имеющее кручение в каждой точке!

Ваши же проблемы – классического натурфилософского характера: именно наблюдение над предпочтением Природы к вращениям определенного типа не означает ли свойств самого пространства в тех частях, где проносится наша Солнечная система, и нет ли иных его частей, где геометрически вращение должно быть противоположным, в зависимости отчего и физические феномены должны быть иными?»

Из письма Н.Н. Лузина к В.И. Вернадскому от 20 сентября 1938 г. [1]:

«... В новом естествознании для меня нет ничего более увлекательного, как идея космического времени и взаимоотношения жизни и пространства. Восточное учение о силе символов также получит со временем место в нем».

Из письма Н.Н. Лузина к В.И. Вернадскому от 8 июля 1940 г. [1]:

«... Лично я думаю, что число измерений пространства – вещь очень, очень тонкая. Вероятно, истинное пространство – просто безмерно. Но с идеей числа измерений».

ний связаны глубочайшие проникновения в теорию целых чисел.

Сейчас у меня создается вот такая картина: свойства натуральных чисел  $1, 2, 3, \dots, n, \dots$  *in inf* бывают двух родов: (а) индуктивные и (б) неиндуктивные. Официальная (классическая?) теория чисел свойств второго рода (б) совсем не признает. По ее мнению, все свойства натуральных чисел индуктивны, т.е. могут быть доказаны «математической индукцией», иначе говоря рассуждением от  $n$  к  $n + 1$ . Лично я этого не думаю, и, по-моему, свойства второго рода (б) вполне реальны. Может быть, утраченные методы *Fermat* и *Frenicle* также были неиндуктивной природы, я думаю, что смутное, очень трудное созерцание в гиперпространствах является источником неиндуктивных свойств натуральных чисел. Но здесь вот курьезно, что мы напрягаемся видеть в гиперпространствах и выносим оттуда глубокие свойства натуральных чисел, которые не умеем доказать «индуктивно».

Но спрашивается, что в нас натягивается в момент видения в гиперпространствах? Физическая реальность гиперпространств? Не думаю. Просто, какая-то реальность гиперпространств? И этого не думаю. Мне думается, это своеобразный метод, природа которого не разгадана, которым надо идти и который отнюдь не связан с определенным числом измерений реального пространства. Таковое мне представляется бесконечно глубоким понятием и вполне безмерным».

Из письма Н.Н. Лузина к В.И. Вернадскому от 7 августа 1940 г. [1, 4]:

«На этом мне, собственно, следовало бы закончить мое письмо, еще раз поблагодарив Вас за присылку Вашей работы, доставившей огромное удовольствие и живейшим образом заинтересовавшей меня, если бы не один пункт в Вашей работе, который не терпит, по моему мнению, отлагательства и на который следует немедленно реагировать каждому, кто сколько-нибудь понял важность его. Это самый последний пункт, 18-й, Вашей работы. Ввиду исключительно-

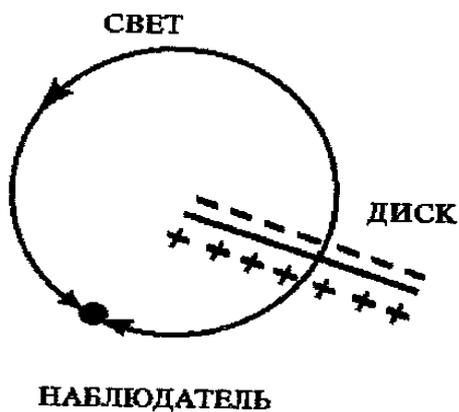
го его значения и обусловленной им спешности, я прошу Вашего разрешения остановиться на нем сейчас же.

В этом пункте Вы предлагаете сделать проверку правой и левой закрученностей небесных спиральных туманностей в интересах проверки научной гипотезы Пастера. Это настаивание и эта Ваша идея столь важны, что проверка, в самом деле, должна быть осуществлена немедленно. И вовсе не в интересах только теории Пастера, но и теории Эйнштейна. Судите сами:

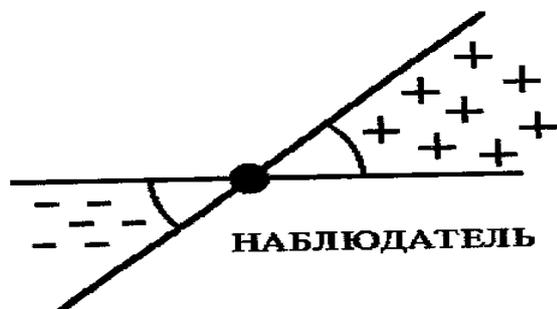
1. Предположим, что спиральные туманности суть диски или нечто вроде двояковыпуклой чечевицы. Тогда правизна и левизна закручивания зависит лишь от положения наблюдателя: перед диском или за диском. Назовем на мгновение ту сторону диска, где спираль кажется закручивающейся вправо, положительной и в обратную сторону – отрицательной.

Речь теперь идет об объективном, т.е. не зависящем от наблюдателя распределении спиральных туманностей в мировом пространстве. Без сомнения, есть спиральные туманности, видимые с «ребра». Таковые в расчет не берутся. Но остальные туманности повернуты друг к другу положительными или отрицательными сторонами, и среди таковых, вероятно, можно наметить течения, струи или потоки в мировом пространстве. Ведь вряд ли распределение положительных и отрицательных сторон дисков являет закон Гаусса, т.е. равномерную вероятность. Более вероятно, что здесь нет броунова движения, но именно струи положительных и отрицательных сторон дисков. Все это, – предполагая пространство классическим (т.е. евклидовым) и держась старых точек зрения.

2. Новая точка зрения начинается с теории Эйнштейна. Если мировое пространство эйнштейново, т.е. конечное, то тогда Вы каждую туманность должны видеть по крайней мере два раза: один раз с положительной стороны, другой раз – с отрицательной, конечно, в двух противоположных направлениях и тогда Ваша проверка должна дать следующее:



если в какомнибудь конусе зрения преобладают положительные туманности, то в противоположном конусе должны преобладать отрицательные туманности.



Если это явление подтвердится наблюдением, теория Эйнштейна верна. На такую проверку идти нужно.

3. Но есть еще пункт, связывающий воедино теорию Пастера и Эйнштейна. Это следующее. Мы исходим из дискообразности спиральной туманности. И тогда, конечно, нет положительной спиральной туманности *fur und an sich*, а каждая из них, будучи диском, являет одновременно лишь две стороны, положительную и отрицательную, для разных наблюдателей. Но если спиральная туманность являет, например, сферическую чашку, с выпуклостью в одну сторону и с вогнутостью – в другую, то тогда различие спиральных туманностей уже не относительное (т. е. для наблюдателя), но абсолютное, как в конхиологии. В этом случае мы имеем право классифицировать спиральные туманности абсолютным образом. Но если пространство эйнштейново, то оно имеет различную кривизну, и одна и та же спиральная туманность, попадая в различные части пространства, изгибается различ-

но – и из положительной становится отрицательной, как и обратно, правда, в конхиологическом смысле.

Это размышление есть лишь интерпретация Вашего, ибо Ваш текст невозможно понимать буквально. Вы пишете: „В проекцию на плоскость мы спиральное пространственное тело отличить не можем, правое от левого, но в проекции на кривую поверхность – небосвод – и при сложности явления, расстояние частей которого от нее явно очень различное, – задача, мне кажется, небезнадежная”. Буквально понимать нельзя, ибо небосвод нематериален, и расстояние от него мерить нельзя. Но если мое понимание Вашего текста правильное, то тогда кривизна пространства обуславливает самые важные на свете вещи: тяготение и жизнь.

Эйнштейн учит, что ньютоново тяготение обусловлено кривизной пространства. Вы указываете, что кривизной пространства, может быть, обуславливается и жизнь (через правизну и левизну).

Вы видите, что в проверке спиральных туманностей содержатся все элементы спешности, ибо изошедшая от Вас идея имеет важность, которую даже приблизительно оценить невозможно».

Из письма В.И. Вернадского к Н.Н. Лузину от 14 августа 1940 г. [1]:

«... Как раз сейчас я обдумываю одну из проблем биогеохимии – о «ноосфере». Мне представляется неубедительным ее образование – переход биосферы в ноосферу. Он подготовлялся всем миллионным прошлым человечества (сотнями тысяч поколений) и не может быть изменен случайностями человеческой истории – отдельными личностями и течениями. ...

...Без вашего разъяснения мне трудно разобраться и в отличии натуральных чисел от других, и в мерах пространства, но я как эмпирик и натуралист, опирающийся на понимание мира, созданное тысячами тысяч поколений, считаю с реальностью, где разные геометрические пространства – трехмерные, в реальности явно отличаются от многомерных и никоим образом не могут быть поставлены в единый ряд.»

Из письма Н.Н. Лузина к В.И. Вернадскому от 30 октября 1940 г. [1, 4]:

«... А в отношении появления живого из неживого, я не удивлюсь, если Ваши идеи о правом и левом и их связи с жизнью соприкоснутся с обнаружением роли кривизны пространства. Эта кривизна велика вблизи белых карликов. И если она такова, что правый кристалл может быть внутренне изогнут и преобразованным в левый, то это значило бы, что имеются участки пространства, живоносные по существу, создающие жизнь из мертвого. Это же как раз Ваши идеи и *Paster'a*».

Из письма В.И. Вернадского к П.Л. Драверту от 1 мая 1942 г. [1, 4]:

«... Я все это время был чрезвычайно занят, очень интенсивно работал над своей книгой и, между прочим, совершенно неожиданно для себя понял вдруг, что такое симметрия, над которой я думал с 1881 г., следовательно, более 60 лет тому назад. Симметрия в природе, т.е. на нашей планете, есть проявление геометрических свойств природных тел и дает нам возможность судить о геометрии природных тел, т.е. об их пространстве. Для меня это особенно важно, т.к. Вы, может быть, помните, я считаю, что пространство, занятое телами живых орга-

низмов, может быть объяснено не эвклидовой, а одной из римановых геометрий и как раз у них существуют оси симметрии 7-го, 10-го и т.д. порядков, а вместе с тем явление дисимметрии, открытое Пастером, которое в пространстве 3-х измерений, по-видимому, не может существовать.

Обратили ли Вы внимание на кристаллографию Падурова, Александрова и Делоне? Они там правильно доказали, что в монокристаллах существует 240 федоровских групп, но если поставить вопрос, каким же эвклидовым, трехмерным, векториальным пространствам они отвечают, то окажется, что таких пространств всего 219. Я считаю одним из важнейших достижений наших кристаллографов и геологов то, что они ввели понятие о кристаллических пространствах. Я хочу выделить из книги моей и отдельно напечатать экскурс о геохимическом значении симметрии. Один из таких экскурсов, о котором я Вам, кажется, писал, – „О геологических оболочках Земли как планеты” печатается сейчас в „Известиях Академии”».

Дискретность пространство и время можно изучать с помощью фракталов [5].

Зависимость  $x_n$  от  $a$  представлена на рис. 1.

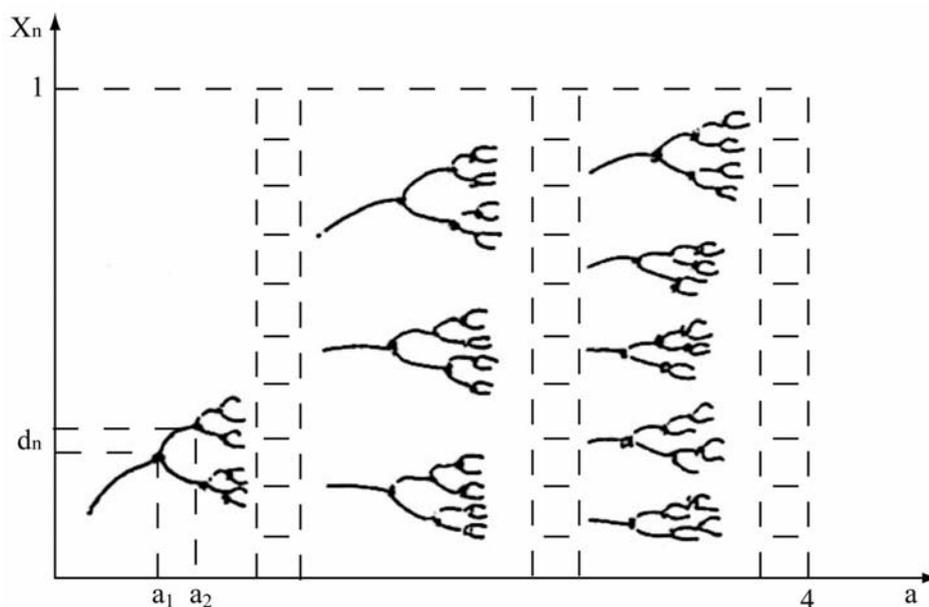


Рис. 1

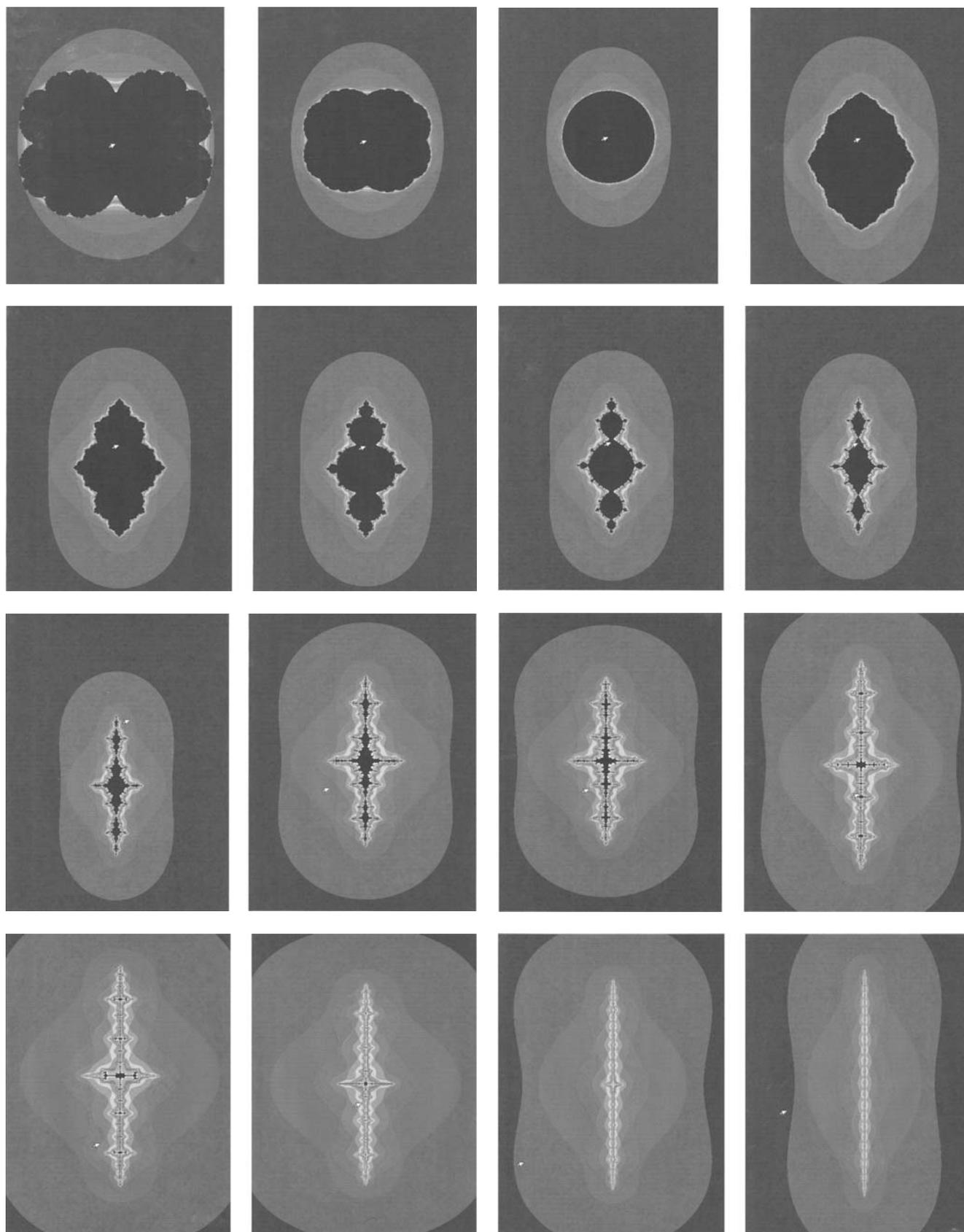


Рис. 2

При  $a = a_k^*$  имеет место спонтанное разветвление решения (детерминированный хаос). При переходе через  $a_k^*$  решения размножаются, сохраняя самоподобие. В точках  $a_k^*$  наблюдается фрактальность «пространства и времени». Роль «пространства» играют значения  $x_n$ , которые группируются по определенному закону. Точки  $a_k, a_{k+1}, \dots$  стремятся к  $a_k^*$  по определенному закону. Эти масштабы были получены Фейгенбаумом, по формуле

$$\delta = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{a_{n+1} - a_2}{a_{n+2} - a_{n+1}}; \quad \alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( -\frac{d_n}{d_{n+1}} \right).$$

В первом интервале  $0 < a < a_1^*$  эти величины имеют значения

$$\delta = 4,66920160910299097\dots\dots\dots$$

$$\alpha = 2,502978750958928485\dots\dots\dots$$

В следующих интервалах  $a_k^* < a_{k+1}^*$  эти величины имеют значения  $\delta_k, \alpha_k$ .

Эволюция популяции идет по схеме:

– в интервале  $0 < a < a_1^*$  динамика системы проходит по схеме удвоения (вилке) до бесконечного числа удвоений (детерминированный хаос);

– при переходе через  $a_1^*$  возникают три ветки, полностью повторяющие динамику системы при  $0 < a < a_1^*$ ;

– в интервалах  $a_k^* < a < a_{k+1}^*$  динамика системы определяется масштабами «пространства – времени» ( $a_k, \delta_k$ );

– стрела эволюции «пространство – время» определяется формулой

$$(a_1^*, \bar{x}_1) \Rightarrow (a_2^*, \bar{x}_2) \Rightarrow \dots \Rightarrow (a_n^*, \bar{x}_n) \Rightarrow \dots,$$

где  $\bar{x}_k$  – собственное пространство системы в момент  $a = a_k^*$ .

Значения  $a_1^*, a_2^*, \dots$  определяют интервалы собственного времени системы с масштабами  $\delta_n$  в каждом интервале  $(a_n^*, a_{n+1}^*)$ . Собственное пространство системы определяется последовательностью  $\bar{x}_n = x(a_n^*)$  с масштабами  $a_n$ .

В точках «хаотических структур»  $a_k^*$  построены фракталы рис. 2.

При  $a = 4$  фрактальных структур нет.

Они появляются при  $a_1^*, \dots, a_n^*$ , изменяют свою форму, но сохраняя число основных элементов, из которых они состоят.

Таким образом, научная гипотеза о структуре пространства и времени, предложенная В.И. Вернадским и развитая в математических исследованиях Н.Н. Лузина, находят подтверждения при исследовании движений в «хаотических структурах» через фракталы [6].

Многомерность пространства и времени можно доказать через биотелепортацию, подробно рассмотренную в работах [6, 7]

### Библиографический список

1. Вернадский В.И. Переписка с математиками / (составитель М.И. Кратко). – М.: МГУ, (мех.-мат. ф-т.), 1996. – С. 112.
2. Кюри П. Избранные труды. – М., 1966.
3. Шубников А.В. О работах П. Кюри в области симметрии // УФН. – 1956. – Т. 59. – Вып. 4.
4. Рыбников К.К., Короткина М.Р. Николай Николаевич Лузин // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2005. – №3.
5. Короткина М.Р. Фрактальность пространства и времени // Лесной вестник (специальный выпуск физика). – 2000. – № 2(11). – С. 158–162.
6. Короткина М.Р. Стрела пространство – время // Лесной вестник (специальный выпуск физика). – 2002. – № 3.
7. Короткина М.Р., Бурлаков А.Б. Биофотонная эмиссия // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2004. – Вып. 4. – С. 89–100.

## ИНИЦИИРОВАНИЕ СВЕЧЕНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА УФ-ФОТОНАМИ

В.Л. ВОЕЙКОВ, МГУ,  
С.Ф. ЧАЛКИН, РКА,  
Р.Р. АСФАРАМОВ, МГУ

При изучении особенностей работы нового детектора одиночных фотонов [1], предназначенного для одновременной регистрации фотонов отдельно в видимой и УФ-областях спектра, нами была обнаружена существенная зависимость скорости счета фотонов (ССФ) от влажности воздуха в камере. Прибор оснащен двумя ФЭУ: ФЭУ-142, предназначенного для регистрации фотонов в УФ- и вакуумной УФ-областях спектра (УФ-ФЭУ), и ФЭУ-101, предназначенного для регистрации фотонов в видимой области (Вид-ФЭУ). Было обнаружено, что так называемый «темновой ток» УФ-ФЭУ (скорость счета импульсов в отсутствие в камере прибора, излучающего фотоны объекта) существенно возрастает с ростом влажности в камере воздуха. Кроме того, при наличии оптического контакта между двумя ФЭУ скорость счета фотонов Вид-ФЭУ также возрастает при работе УФ-ФЭУ, причем интенсивность роста зависит от влажности воздуха в помещении.

Целью настоящей работы было выяснение природы нового явления – сверхслабого свечения влажного воздуха, возникающего при работе УФ-ФЭУ.

### Материалы и методы

На рис. 1 представлена блок-схема прибора «Биотокс 7с». Прибор оснащен двумя фотоэлектронными умножителями – ФЭУ-101, максимально чувствительным в области 380-490 нм и практически нечувствительным к фотонам с  $\lambda < 300$  нм, и ФЭУ-142, предназначенным для исследований в вакуумной ультрафиолетовой (до  $\lambda = 112$  нм) и ультрафиолетовой областям спектра. Мак-

симальная спектральная чувствительность ( $\approx 10\%$ ) ФЭУ-142 лежит в диапазоне 200–250 нм, а чувствительность к фотонам с  $\lambda \geq 400$  нм менее 0,1%. Окна ФЭУ направлены друг на друга и расположены на расстоянии 5 см. Окно ФЭУ-101 выполнено из стекла (пропускание  $\lambda > 320$  нм), а ФЭУ-142 – из  $MgF_2$  (пропускание  $\lambda > 110$  нм). Диаметр окон обоих ФЭУ равен 1 см. Рабочее напряжение на ФЭУ-142 составляло 1700 в (допустимое напряжение – до 2200 в), а на ФЭУ-101 – 800 в (допустимое напряжение – до 880 в). Фотокагоды обоих ФЭУ заземлены.

Камера для образцов представляет собой выполненную из дюралюминия цилиндрическую гильзу с двумя отверстиями на противоположных стенках. В режиме регистрации излучения от образца, помещенного во внутреннюю полость гильзы, она повернута отверстиями к окнам ФЭУ; для смены образца гильзу поворачивают на  $90^\circ$  так, что окна ФЭУ закрываются сплошной стенкой гильзы для предотвращения их засветки. Поворот гильзы осуществляется вращением светонепроницаемой крышки камеры для образцов.

Влажность и температуру воздуха в камере для образцов измеряли с помощью комбинированного зонда, присоединенного к сетевому микропроцессору ИВТМ-7 МК-С (ОАО «Практик-НЦ», Москва, Зеленоград). Зонд был встроен в крышку камеры. В ней также имелись отверстия для шлангов для продувания камеры газами, которые либо предварительно осушали пропусканием через колонну, заполненную сухим силикагелем, либо увлажняли при пропускании сквозь заполненную водой емкость. В ряде

экспериментов на дно камеры вне поля видимости ФЭУ устанавливали емкость с дистиллированной водой. В качестве газов использовали лабораторный воздух, баллонные газы: азот, аргон или гелий (категории не ниже «высокой чистоты») по отдельности или в смеси с лабораторным воздухом.

## Результаты

Как видно из рис. 2, при включении УФ-ФЭУ скорость счета фотонов Вид-ФЭУ возрастает более, чем в 3 раза, по сравнению с таковой до включения УФ-ФЭУ, при влажности воздуха в камере около 20 %.

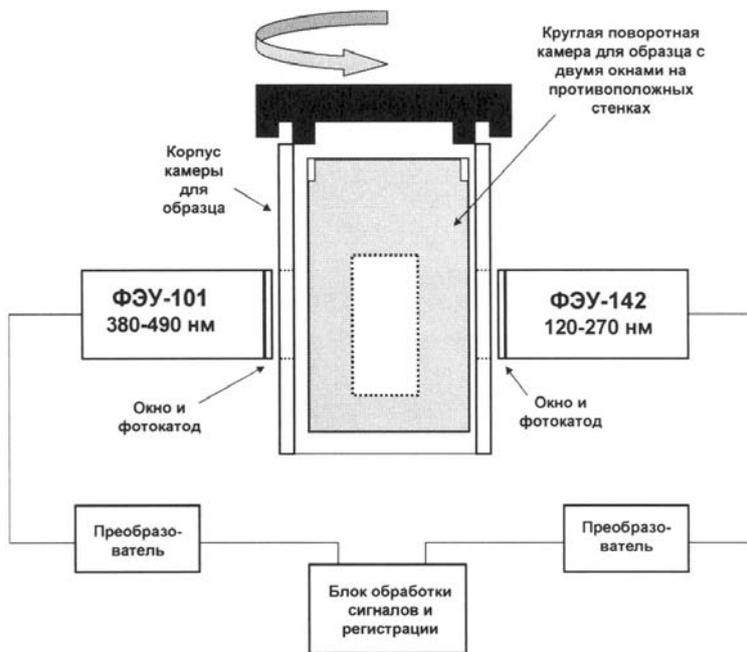


Рис. 1. Блок-схема прибора «Биотопе 7с» (масштаб не соблюден)

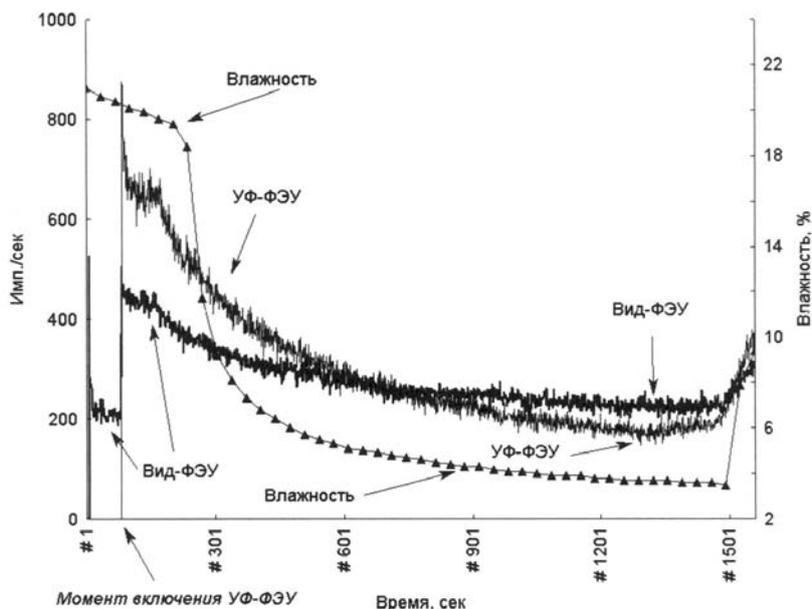


Рис. 2. Влияние УФ-ФЭУ на показания Вид-ФЭУ в зависимости от влажности воздуха в камере для образцов при наличии между ними оптического контакта. Абсцисса – время с начала эксперимента (сек), левая ордината – скорость счета фотонов (имп./сек), правая ордината – влажность (%)

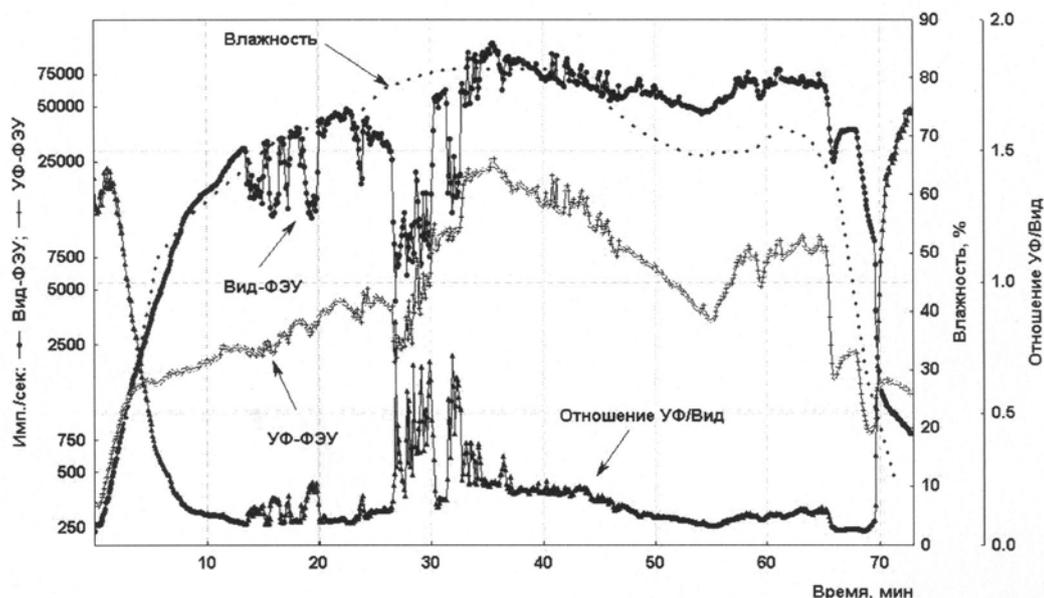


Рис. 3. Влияние повышения влажности воздуха в камере, в которую обращены окна Вид-ФЭУ и УФ-ФЭУ на скорость счета фотонов в видимой и УФ-областях спектра – левая ордината и на отношение ССФ в УФ- и видимой областях спектра – вторая правая ордината

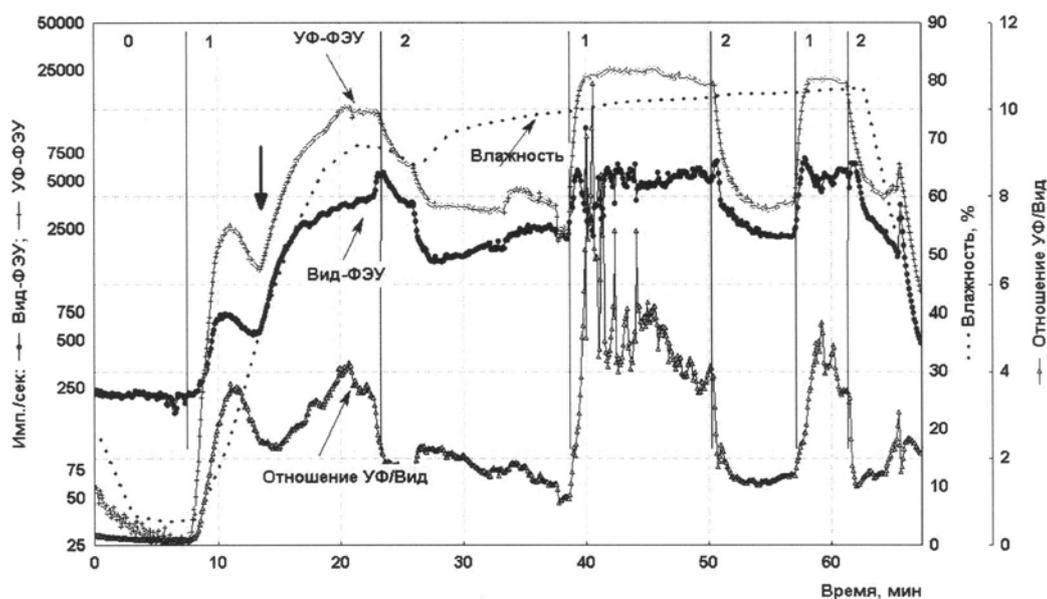


Рис. 4. Влияние на скорость счета фотонов последовательной продувки камеры влажным воздухом, обогащенным аргоном (сектора № 1) и влажным воздухом (сектора № 2). Сектор № 0 – камера продувалась сухим воздухом, толстая стрелка в первом секторе № 1 – увеличение скорости продувки камеры

При снижении влажности воздуха в камере (пропускание сухого воздуха) наблюдается одновременное уменьшение скорости счета фотонов как Вид-ФЭУ, так и УФ-ФЭУ, причем скорость счета фотонов УФ-ФЭУ снижалась быстрее. При выключении тока сухого воздуха (отсчет времени

1500 сек), когда в камеру начал диффундировать более влажный лабораторный воздух, счет фотонов обоими ФЭУ начинает возрастать (рис. 2).

При пропускании через камеру воздуха со 100 %-й влажностью показания обоих ФЭУ при наличии контакта между ними

возрастают с увеличением влажности. При этом ССФ Вид-ФЭУ возрастает быстрее, чем ССФ УФ-ФЭУ, и многократно превышает последнюю. При влажности воздуха свыше 50 % ССФ Вид-ФЭУ приобретает ярко выраженный колебательный характер (рис. 2).

При длительной регистрации ССФ во влажной камере колебательный режим ССФ сохраняется в течение многих часов, причем наблюдаются как периоды высоко регулярных всплесков излучения, так и хаотические вариации ССФ.

При увеличении концентрации во влажном воздухе инертных газов (гелия, аргона) ССФ обоими ФЭУ возрастает, но скорость счета УФ-фотонов возрастает особенно резко и превышает таковую при продувке камеры обычным влажным воздухом (рис. 4).

При выключенном УФ-ФЭУ влияния влажности воздуха на показания Вид-ФЭУ зарегистрировано не было. Это видно из графика на рис. 5. В этом опыте на дно просушенной камеры устанавливали сосуд с водой и в течение длительного времени, когда влажность воздуха увеличивалась за счет испарения воды, регистрировали ССФ Вид-ФЭУ при выключенном УФ-ФЭУ. Как видно из этого рисунка, на фоне установивше-

гося в камере примерно стационарного уровня влажности воздуха около 62 % сразу после включения УФ-ФЭУ наблюдается резкий скачок ССФ Вид-ФЭУ, сопровождаемый интенсивными колебаниями ССФ как Вид-ФЭУ, так и УФ-ФЭУ. Включение УФ-ФЭУ сопровождается еще двумя интересными явлениями. Во-первых, сразу наблюдается постепенный рост температуры (почти на 2 градуса за последующие 3 часа), а также рост стационарного уровня влажности, по-видимому, связанный с повышением температуры.

Следует отметить, что на первом этапе эксперимента, когда работал только Вид-ФЭУ, температура в камере несколько снижалась, что было обусловлено, по-видимому, затратами энергии на испарение воды. Учитывая, что камера выполнена из металла и не теплоизолирована, столь сильное повышение температуры воздуха при включении УФ-ФЭУ свидетельствует о значительном освобождении энергии в ходе процессов, протекающих в воздухе при работе этого прибора.

Помимо приведенных выше данных следует указать и на ряд других феноменов, которые наблюдались при работе УФ-ФЭУ.

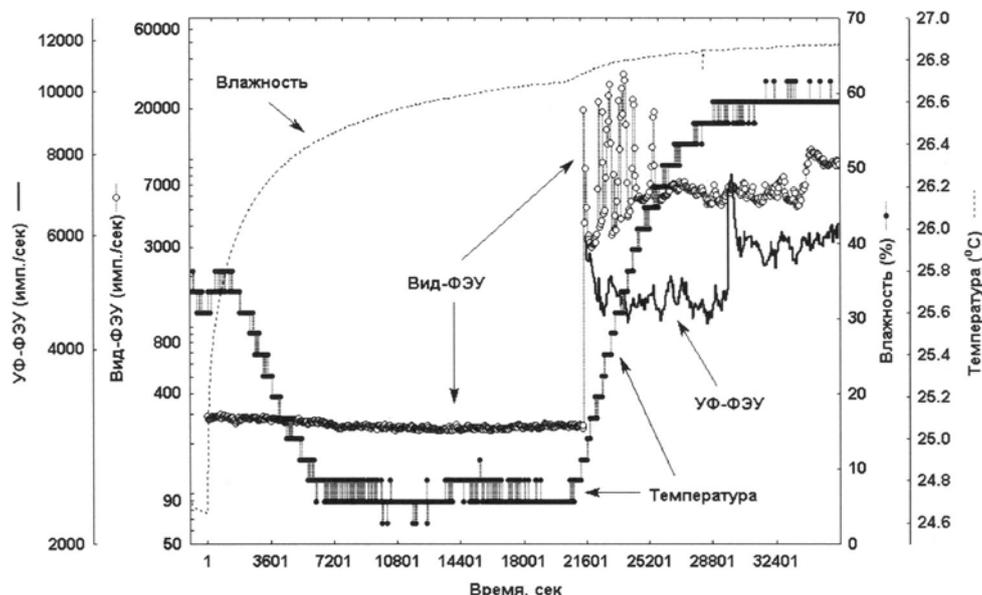


Рис. 5. Отсутствие влияния влажности на показания Вид-ФЭУ при выключенном УФ-ФЭУ (до отметки времени 21600 сек.). Влияние работы УФ-ФЭУ на температуру и влажность воздуха в камере. Все графики представлены после их сглаживания по 60 точкам

Так, ССФ в УФ-области спектра значительно увеличивалась, если перед окном УФ-ФЭУ на расстоянии не более 1 см было установлено зеркало.

Как отмечалось, при работе обоих ФЭУ наблюдалось развитие колебательных режимов ССФ. При длительной регистрации ССФ в условиях постепенного нарастания влажности воздуха в камере (подобно условиям, при которых проводился эксперимент, иллюстрированный рис. 5) нередко колебания ССФ Вид-ФЭУ выходили на режим строго упорядоченных колебаний.

Чрезвычайно интенсивные колебания ССФ УФ-ФЭУ наблюдались при значительном обогащении влажного воздуха в камере гелием. Амплитуды таких колебаний достигала сотен тысяч импульсов за 1 сек, а колебания совершались с периодичностью в несколько секунд.

### Обсуждение

Таким образом, при работе с детектором одиночных фотонов одновременно в видимой и УФ-областях спектра и оснащенном двумя ФЭУ с разной спектральной чувствительностью было обнаружено два основных эффекта, зависящих от влажности воздуха, заполняющего пространство между двумя ФЭУ. Во-первых, при наличии оптического контакта между окнами Вид-ФЭУ и УФ-ФЭУ при включении последнего повышалась скорость счета фотонов в видимой области спектра.

Во-вторых, влажность воздуха оказывала влияние на скорость счета фотонов УФ-ФЭУ и стабильность его показаний вне зависимости от наличия его контакта с Вид-ФЭУ. При минимальной влажности воздуха первый эффект был слабо выражен, а второй практически отсутствовал, и степень выраженности обоих эффектов возрастала с увеличением влажности воздуха. В доступной нам литературе сведений о таких явлениях обнаружить не удалось.

Обнаруженные эффекты не могут быть объяснены наводками в электронных схемах, влиянием влажности воздуха на работу электронных схем и другими артефак-

тами. Объяснение им следует искать исходя из того, что УФ-ФЭУ, находящийся под рабочим напряжением, воздействует на газовую фазу, с которой контактирует его окно. В то же время, поскольку показания Вид-ФЭУ при отсутствии его оптического контакта с включенным УФ-ФЭУ не зависят от влажности воздуха, его можно рассматривать как пассивный регистратор событий, происходящих в газовой фазе.

Для выяснения механизмов обнаруженных эффектов следует рассмотреть некоторые общие свойства фотоэлектронных умножителей, особенности конструкции ФЭУ-142 и проанализировать явления, при которых возможно возникновение сверхслабого излучения в наших экспериментальных условиях.

1. Известно, что в фотоумножителях за счет электронных ударов фотоэлектронами, разогнанными в электрическом поле до энергий, превышающих 100 эВ, возникает люминесценция остаточных газов и поверхности динодов. В спектре люминесценции представлены УФ-фотоны с энергией в несколько электрон-вольт, часть которых может направляться и в сторону фотокатода.

2. Контактующее с воздухом окно ФЭУ-142 выполнено из кристалла  $MgF_2$ , который прозрачен вплоть до 110 нм и не является препятствием для фотонов, возникающих при работе ФЭУ.  $MgF_2$  гигроскопичен, и при контакте с влажным воздухом на поверхности окна ФЭУ-142 образуется водяная пленка. Если поверхность, на которой сорбируется вода, представляет собой мозаику из частично положительных и частично отрицательных зарядов, то адсорбированная ею вода упорядочена. Поскольку молекулы воды представляет собой диполи, то в первом адсорбционном слое каждая молекула воды окружена со всех четырех сторон молекулами, дипольные моменты которых направлены относительно нее антипараллельно. На этом слое адсорбируется новый слой воды, который, в свою очередь, адсорбирует следующий и т.д. [4]. В результате поверхность может удерживать многие тысячи прилежащих друг к другу поляризо-

ванных монослоев воды [5, 6], и эта трехмерная вода отлична как от обычной жидкой воды, так и ото льда. Весьма вероятно, что водяная пленка на поверхности полированного кристалла  $MgF_2$  также хотя бы частично многослойна и поляризована. Высокоэнергетические фотоны, возникшие при работе УФ-ФЭУ, неизбежно встречаются ее на своем пути.

3. Под действием коротковолновой радиации  $100 < \lambda < 190$  нм (12,3–6,5 эВ) молекулы воды, как известно, диссоциируют на атом водорода и гидроксильный радикал ( $H-O-H \rightarrow H \cdot + \cdot OH$ ). Недавно выполненные расчеты свидетельствуют, что микрокапли и кристаллы чистой воды эффективно поглощают ультрафиолет с еще более низкой энергией – до 4 эВ (<sup>5</sup>), что также может сопровождаться гомолитичной диссоциацией молекул воды.

4. Повышение ССФ в УФ-области спектра с возрастанием влажности воздуха в камере указывает, что в пленке воды развиваются процессы, при которых освобождается энергия в форме электронного возбуждения, что характерно для разветвленно-цепных реакций с участием кислорода. Если в пленке, поглотившей УФ-фотон, возникают свободные радикалы  $H \cdot$  и  $\cdot OH$ , они могут реагировать с кислородом с образованием перекисных радикалов, обеспечивающих рост и разветвление цепей. Вклад в развитие цепных процессов может вносить и недавно обнаруженная реакция окисления воды электронно-возбужденным (синглетным) кислородом до перекиси водорода с образованием малоустойчивых более высоких перекисей ( $HO_2O_2$ ,  $HO_2O_2O_2$ ,  $HO_2O_2O_2O_2$ ), которые могут порождать новые активные центры. Эту реакцию катализирует определенным образом организованная вода [7]. К тому же, если активные центры возникают в организованной среде, то освобождающаяся в ходе их реакций энергия электронного возбуждения может в ней накапливаться и даже «складываться» до более высоких уровней, соответствующих УФ-области спектра, что способствует возникновению новых активных центров.

Указанные выше особенности работы ФЭУ, в частности, ФЭУ-142, свойства разветвленно-цепных процессов с участием кислорода позволяют с единых позиций объяснить все результаты, полученные при анализе влияния влажности воздуха на ССФ УФ-ФЭУ. В частности, возникновение колебательных режимов излучения может объясняться тем, что при высокой влажности воздуха толщина пленки достигает таких размеров, что инициированные в ней окислительные процессы сопровождаются столь интенсивным освобождением энергии, что пленка разрушается. Процесс затухает до формирования новой пленки.

Распространение возбуждения от тонкой пленки воды, адсорбированной на окне УФ-ФЭУ на расстоянии 5 см и, к тому же, с усилением является новым и неожиданным наблюдением, говорящим, что во влажном воздухе в мягких условиях может быть инициировано образование и размножение активных центров, протекание окислительных реакций разветвленно-цепного типа с участием кислорода. Возникновение колебательных режимов счета фотонов Вид-ФЭУ может быть обусловлено волнообразным переносом возбуждения по влажному воздуху, подобным тому, что наблюдается в реакциях Белоусова-Жаботинского в конденсированных фазах.

Весьма вероятно, что такие процессы реализуются во многих природных системах, где существуют упорядоченные пленки воды. В неживой природе к таким системам могут относиться водяные кластеры и микрочастицы льда, находящиеся в верхних слоях атмосферы, на которые воздействует космическая радиация. Не они ли лежат в основе полярных сияний? В пленках воды на гигроскопичных кристаллах сходные процессы возбуждает распад природных радиоизотопов, например,  $K^{40}$ . Не с этим ли связан терапевтический эффект спелеотерапии? В живой природе это явление может быть распространено еще в большей степени. Значительная часть клеточной воды, воды на поверхностях раздела клетка-среда, поверхностях раздела живая ткань-воздух структури-

рована и многослойна [8], а кванты энергии, достаточные для расщепления молекул воды, регулярно генерируются в ходе метаболических процессов в виде так называемого митогенетического излучения [2].

Указанное явление может обеспечить организованное распространение возбуждения от локальных источников на значительные расстояния как в жидкой среде организма, так и в окружающей его среде, внося свой вклад в энерго-информационную целостность живых систем.

### Библиографический список

1. Воейков В.Л., Чалкин С.Ф. Способ газового анализа и газоанализатор для его осуществления. Патент РФ на изобретение № 2235311, зарегистрирован 27 августа 2004 г.
2. Гурвич А.Г., Гурвич Л.Д. Митогенетическое излучение, физико-химические основы и приложения в биологии и медицине. – М.: Медгиз, 1945.
3. Новаковская Ю.В. Ультрафиолетовое излучение и роль воды в озоновом слое земли // Ломоносовские чтения.– М.: МГУ, хим. фак., 2002.
4. Ling G.N. A new theoretical foundation for the polarized-oriented multilayer theory of cell water and for inanimate systems demonstrating long-range dynamic structuring of water molecules // *Physiol. Chem. Phys. & Med. NMR*. 2003. 35. P. 91-130.
5. Pashley R.M., Kitchener J.A. Surface forces in adsorbed multilayers of water on quartz // *J. Colloid and Interface Sci.* – 1979. – 71. – P. 4910–500.
6. Fisher J.R, Gamble R.A., Middlchurer J. The Kelvin equation and the condensation of water // *Nature*. 1981. 290. P. 575-576.
7. Xu X., Muller R.P., Goddard W.A. 3rd. The gas phase reaction of singlet dioxygen with water: a water-catalyzed mechanism // *Proc Natl Acad Sci USA*. 2002. 99. P. 3376-3381.
8. Pollack G.H. Cells, gels and the engines of life. A new unifying approach to cell function // *Ebner & Sons, Seattle, WA, USA*. 2001. 320 pp.

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИЙ

А.Д. СИЗОВ, МГУ

Сопоставление изменений темнового тока фотоэлектронных умножителей (ФЭУ), размещенных в географических пунктах, отстоящих по долготе на несколько тысяч километров друг от друга, выявило сходство таких изменений при сопоставлении результатов в одинаковые моменты местного времени [16].

Это свидетельствует, в частности, о том, что, по крайней мере, некоторые изменения темнового тока, обычно квалифицируемые как «шум» ФЭУ, следует рассматривать как отклик (сигнал) на внешнее воздействие, проявляющееся в планетарном масштабе и наступающее в различных географических пунктах в одни и те же моменты местного времени.

Эти факты вполне согласуются с представленными ниже результатами наблюдений.

Ранее [1] были рассмотрены экспериментальные данные, указывающие на существование проникающего неидентифициро-

ванного излучения звезд, которое воспринимается сенсорной системой человека на бессознательном уровне и может быть зарегистрировано путем измерения значений дифференциального зрительного порога человека. Вместе с тем оно может быть зарегистрировано физическими приемниками [2], аналогичными тем, которые ранее были описаны Н.А. Козыревым [3].

Физический приемник в рассматриваемых опытах представляет собой неуравновешенный мостик Уитстона с полупроводниковыми резисторами в плечах и регистрирующим устройством, включенным в диагональ моста. Мост помещен в термостабилизированный, светонепроницаемый и заземленный металлический кожух, питаемый от источника постоянного тока, и находится в произвольном, но фиксированном относительно окружающих предметов положении весь тот период, за который проводится сопоставление и анализ результатов измерений. Регистрируемым параметром является

отклонение значения тока в диагонали моста от стационарного уровня и последующее возвращение к исходному значению продолжительностью от 3 секунд и более (до нескольких десятков минут). Традиционно такие отклонения рассматриваются как электрический шум.

Показано, что после выполнения обязательного условия – предварительной настройки такой схемы на качественное соответствие вида регистрируемых отклонений тока результатам, получаемым в измерениях дифференциального зрительного порога человека [1] – по крайней мере, часть наблюдаемых изменений тока в диагонали моста следует рассматривать как отклик на воздействия проникающего фактора (излучения), источниками которого являются звезды.

Экспериментальные данные [4] позволяют также утверждать, что избирательность произвольно ориентированного детектора Н.А. Козырева по направлению на звезды обусловлена выделенностью плоскости небесного меридиана в том смысле, что наибольшая вероятность регистрации отклика на воздействие гипотетического излучения существует для звезд в пределах 0,5 часа от момента их кульминации. Моментом кульминации называется время пересечения произвольной точкой небесной сферы плоскости небесного меридиана [5].

Таким образом, на основе полученных результатов выстраивается следующая последовательность утверждений:

1) сенсорная система человека реагирует на воздействие какого-то проникающего излучения звезд;

2) Существуют физические приборы, способные регистрировать это воздействие, моделируя, тем самым, сенсорную систему человека;

3) плоскость небесного меридиана физически выделена повышенной вероятностью регистрации отклика на излучение от звезд в момент пересечения ими этой плоскости (в моменты кульминации).

Последнее утверждение о выделенности плоскости небесного меридиана удивительно перекликается с наблюдениями Ми-

шеля Гоклена (*Michel Gauquelin*) [6, 8]. Им описана большая группа явлений, указывающих, в частности, на выделенность плоскости небесного меридиана физиологическим откликом человека на действие какого-то проникающего агента космической природы.

М. Гоклен занимался анализом моментов рождения людей в группах лиц, предварительно выделенных по какому-то профессиональному признаку. Согласно его представлениям, определенный профессиональный признак указывает на общие психофизиологические черты, в той или иной степени свойственные членам такой группы. Чтобы быть выдающимся спортсменом (а М. Гоклен исследовал, например, группы чемпионов), мало одного желания, необходимо еще и характер и соответствующие физические данные. Оказалось, что максимумы числа рождений в таких группах приходятся на моменты времени, когда разные планеты (для каждой из групп свои) находятся или вблизи плоскости горизонта или плоскости небесного меридиана, т.е. кульминируют. Это позволило говорить о наличии корреляции между положением конкретной планеты вблизи момента ее кульминации (или момента восхода) и психофизиологическим типом характера человека, появившимся в это время на свет, что до сих пор оставалось лишь темой астрологических изысканий. Вместе с тем М. Гоклен не обнаружил связи между характером и деятельностью человека, с одной стороны, и положением планеты в конкретном созвездии Зодиака или взаимным угловым расстоянием между планетами по эклипике (аспектами) – с другой, а именно эти соотношения считаются важными в астрологической практике.

Тем не менее, открытая М. Гокленом связь между типом характера и положением определенной планеты у горизонта или в меридиональной плоскости на момент рождения данного человека заставляет вспомнить о планетарном символизме, принесенном астрологической традицией в современность. Для объяснения этих наблюдений М. Гоклен обращается к концепции Сол-

нечно-Земных связей, отмечая однако [7], что привлекаемые им аналогии отвечают далеко не на все возникающие в этой связи вопросы.

В отсутствие механизма, допускающего количественную проверку и раскрывающего эту связь, трудно представить существование множества разных физических агентов, причем для каждой планеты своего,

через которые такое влияние от разных планет передается, да еще и приводит к разным следствиям.

Основываясь на [1, 2, 4], нам представляется более естественным принять наличие единого космического излучения, степень воздействия которого на приемник (как биологический, так и физический) может изменяться во времени.

РИС. 1-а

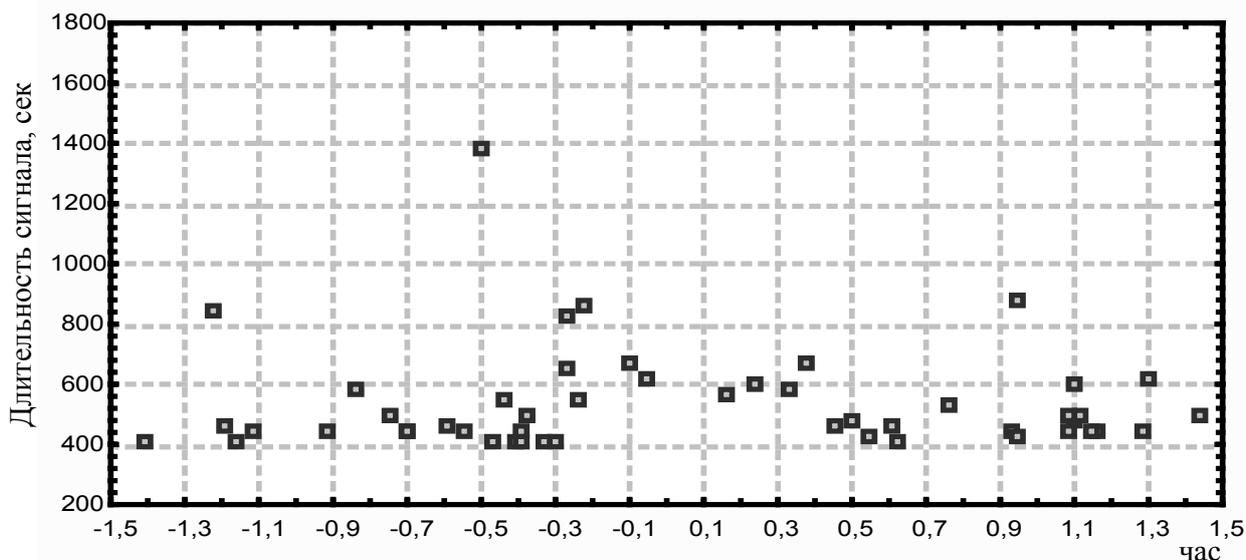


РИС. 1-б

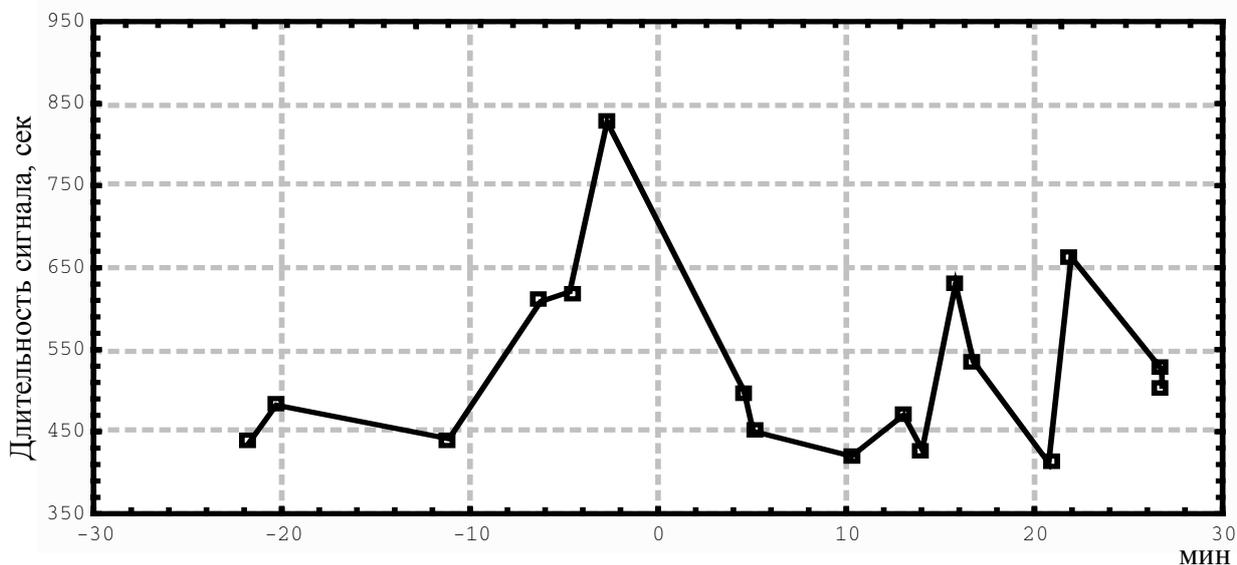


Рис. 1. Распределение значений длительности сигналов в детекторе Н.А. Козырева, зарегистрированных вблизи моментов верхней кульминации Луны (рис. 1-а) и Солнца (рис. 1-б). По абсциссе – интервал времени между моментом времени соответствующим середине длительности сигнала и моментом кульминации (доли часа на рис. 1-а и минуты на рис. 1-б). Нуль абсциссы соответствует моменту кульминации. По ординате – длительность сигнала, секунды

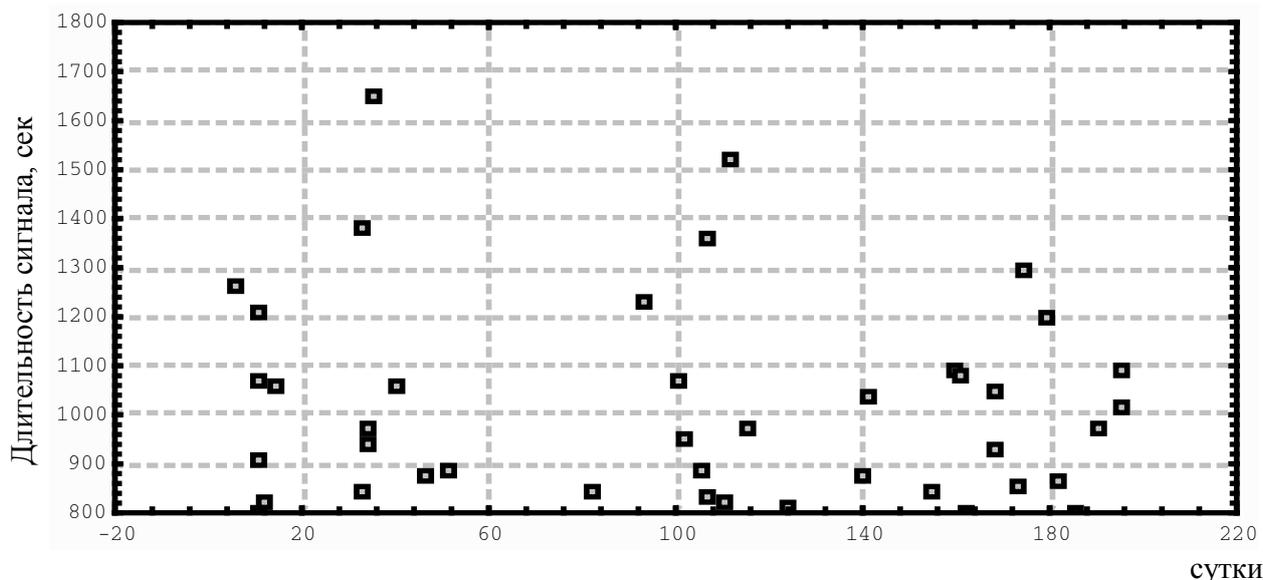


Рис. 2. Распределение значений длительности сигналов больших 800 секунд по суткам опыта. По абсциссе – порядковый номер суток опыта. По ординате – длительность сигнала, с

Источником такого излучения являются звезды, а их воздействие на приемник происходит, преимущественно, в момент пересечения звездой-источником плоскости небесного меридиана или плоскости горизонта. Тогда различие «планетных влияний по М. Гоклену» на биологический приемник можно объяснить различием отклика биологического объекта на поглощенную дозу излучения, а роль планет при этом сводится к изменению параметров излучения от области неба, в которую планета проецируется вблизи момента своей кульминации. В пользу такого предположения говорит главным образом то, что М. Гоклен не обнаружил соответствий между характером человека и положением звездной сферы на моменты рождений, т.е. положение планет среди звезд на исследуемую связь не влияет.

Если такое предположение соответствует действительности, а детектор Н.А. Козырева является адекватной моделью сенсорной системы человека, то вблизи моментов кульминации планет параметры сигналов, регистрируемых детектором, должны изменяться. Поставленные с целью проверки этого утверждения эксперименты дали результаты, представленные на рис. 1, которые показывают, что это действительно имеет место.

Так, на рис. 1-а вполне отчетливо выступает факт возрастания длительности сигналов по мере приближения момента их регистрации к моменту верхней кульминации Луны. Аналогичный характер изменений длительности наблюдался также и вблизи моментов верхней кульминации Солнца – рис. 1-б. Поэтому можно заключить, что предположение об увеличении продолжительности воздействия на биологический приемник, когда планеты или Солнце проецируются в область неба, содержащую звезды – источники сигналов, не противоречит результатам эксперимента.

Но увеличение продолжительности воздействия на мишень-приемник должно приводить к увеличению поглощенной дозы излучения. Тогда для биологического объекта различие «планетарных влияний» от разных планет должно свестись к различию в поглощенной дозе излучения, которое в последующем опосредуется в процессе онтогенеза.

Итак, исходным пунктом в сопоставлении данных М. Гоклена с результатами наблюдений на «детекторе Н.А. Козырева» явилось допущение о том, что такой физический приемник является адекватной моделью сенсорной системы человека. В результате оказалось, что с его помощью действи-

тельно проявляется своеобразная астрологическая символика в том смысле, что длительность сигналов возрастает по мере приближения времени их регистрации к моментам кульминации Луны или Солнца.

Но если применительно к рассматриваемой феноменологии детектор Н.А. Козырева является настолько хорошей моделью сенсорной системы, что регистрируемые им воздействия обнаруживают один из типов корреляций, известных из астрологической традиции (а нам пока не известно ни одного физического прибора, который бы умел это делать!), то разумно поставить вопрос о том, какие еще известные типы астрологических соотношений может обнаружить анализ данных, полученных с помощью такого детектора. Важным параметром, используемым в астрологии, является оценка на заданный момент времени углового расстояния по эклиптике между планетами (оно называется аспектом [10]). Расстояние до планет при этом не учитывается. Естественно задаться вопросом о том, способен ли детектор Козырева обнаружить также и эти соотношения?

Быть может, учет этих соотношений полнее объяснит особенности распределения хотя бы наиболее длительных из сигналов.

На рис. 2 представлено распределение по суткам опыта всех сигналов длительностью более 800 с, зарегистрированных на протяжении 7 месяцев круглосуточной работы прибора. Сопоставление значений угловых расстояний между планетами на моменты появления этих сигналов представлено в таблице, откуда следует, что все эти сигналы оказались зарегистрированы при наступлении таких планетных конфигураций, когда угловые расстояния в парах сопоставляемых планет близки значениям 0, 180, 90 или 270°. При этом в дни регистрации столь длительных сигналов особые планетные конфигурации наблюдаются для более чем одной пары планет, поэтому можно заключить, что конкретные угловые расстояния между планетами также способствуют увеличению длительности сигналов и, следовательно, увеличению поглощенной дозы проникающего излучения.

Т а б л и ц а

**Разность эклиптической долготы планет на моменты регистрации 43 сигналов длительностью более 800 секунд (название столбцов – см. примечание)**

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	11	9	<b>0,95</b>	800	Солнце	<b>226,77</b>	Меркурий	<b>225,82</b>	4,942	10,672	21585
1	11	9	<b>0,96</b>		Венера	<b>273,82</b>	Уран	<b>272,86</b>			21585
1	11	9	<b>-0,28</b>		Сатурн	<b>279,99</b>	Нептун	<b>280,27</b>			21585
2	4	9	<b>-92,40</b>	801	Луна	<b>192,17</b>	Нептун	<b>284,57</b>	11,749	3,421	41315
2	4	9	<b>172,81</b>		Луна	<b>192,17</b>	Солнце	<b>19,36</b>			41315
3	5	2	<b>-1,66</b>	803	Солнце	<b>42,26</b>	Меркурий	<b>43,92</b>	22,788	16,000	48286
3	5	2	<b>-80,94</b>		Луна	<b>145,49</b>	Плутон	<b>226,43</b>			48286
4	3	2	<b>0,69</b>	812	Марс	<b>292,91</b>	Сатурн	<b>292,22</b>	1,289	14,434	29146
5	2	15	<b>1,17</b>	818	Венера	<b>292,01</b>	Сатурн	<b>290,84</b>	21,536	9,751	10531
6	11	9	<b>0,62</b>	823	Солнце	<b>227,31</b>	Меркурий	<b>226,69</b>	17,765	23,531	21708
6	11	9	<b>1,46</b>		Венера	<b>274,35</b>	Уран	<b>272,89</b>			21708
6	11	9	<b>-0,24</b>		Сатурн	<b>280,04</b>	Нептун	<b>280,28</b>			21708
7	2	12	<b>0,75</b>	828	Венера	<b>291,23</b>	Сатурн	<b>290,48</b>	9,685	21,671	9815
7	2	12	<b>-3,54</b>		Марс	<b>280,00</b>	Нептун	<b>283,54</b>			9815
7	2	12	<b>1,85</b>		Марс	<b>280,00</b>	Уран	<b>278,15</b>			9815
8	4	2	<b>4,03</b>	840	Луна	<b>96,90</b>	Юпитер	<b>92,87</b>	0,772	15,954	38920
9	11	30	<b>1,46</b>	843	Луна	<b>275,43</b>	Уран	<b>273,97</b>	18,940	2,089	13947
9	11	30	<b>2,03</b>		Марс	<b>227,99</b>	Плутон	<b>225,96</b>			13947
9	11	30	<b>1,16</b>		Сатурн	<b>282,07</b>	Нептун	<b>280,91</b>			13947
10	1	19	<b>0,25</b>	845	Солнце	<b>298,74</b>	Венера	<b>298,49</b>	2,191	12,580	4697

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	1	19	-2,93		Меркурий	279,78	Нептун	282,71			4697
10	1	19	2,90		Меркурий	279,78	Уран	276,88			4697
11	4	20	96,00	858	Луна	322,78	Плутон	226,78	5,062	21,438	44488
11	4	20	-179,72		Меркурий	47,06	Плутон	226,78			44488
11	4	20	-184,40		Юпитер	95,23	Уран	279,63			44488
12	4	29	1,88	861	Луна	98,57	Юпитер	96,69	10,984	3,968	47323
13	12	14	-1,02	873	Меркурий	280,37	Нептун	281,39	15,258	23,317	17084
13	12	14	-3,22		Меркурий	280,37	Сатурн	283,59			17084
13	12	14	2,20		Сатурн	283,59	Нептун	281,39			17084
14	3	18	0,64	876	Солнце	357,56	Меркурий	356,92	10,478	0,701	33674
15	12	19	2,47	884	Меркурий	286,58	Сатурн	284,11	4,524	12,882	17835
15	12	19	2,56		Сатурн	284,11	Нептун	281,55			17835
16	2	10	0,72	886	Венера	291,05	Сатурн	290,33	23,527	11,419	9518
16	2	10	0,88		Марс	278,96	Уран	278,08			9518
17	11	8	1,53	912	Солнце	225,81	Меркурий	224,28	5,932	11,599	21326
17	11	8	0,04		Венера	272,86	Уран	272,82			21326
17	11	8	-0,33		Сатурн	279,91	Нептун	280,24			21326
17	11	8	0,75		Солнце	225,81	Плутон	225,06			21326
18	4	15		927	«?»		«?»		20,815	12,905	43218
19	12	1	2,56	939	Марс	228,55	Плутон	225,99	14,484	21,686	14157
19	12	1	1,23		Сатурн	282,16	Нептун	280,93			14157
20	2	7	0,96	952	Венера	290,92	Сатурн	289,96	13,921	1,590	8784
20	2	7	-1,42		Марс	276,50	Уран	277,92			8784
21	12	2	2,85	969	Марс	228,86	Плутон	226,01	1,276	8,508	14266
21	12	2	1,25		Сатурн	282,20	Нептун	280,95			14266
22	2	21	1,05	969	Луна	279,58	Уран	278,53	2,904	15,462	11706
22	2	21	2,54		Венера	293,91	Сатурн	291,37			11706
22	2	21	2,56		Марс	286,36	Нептун	283,80			11706
23	5	6	-180,17	971	Солнце	46,15	Плутон	226,32	23,248	16,725	49481
23	5	6	-94,83		Венера	3,15	Юпитер	97,98			49481
23	5	6	-89,49		Луна	194,98	Нептун	284,47			49481
24	5	12	-89,33	1016	Венера	9,71	Юпитер	99,04	18,444	12,302	51033
24	5	12	-269,59		Венера	9,71	Уран	279,30			51033
24	5	12	-180,26		Юпитер	99,04	Уран	279,30			51033
25	3	19	93,15	1039	Солнце	358,44	Луна	265,29	7,725	22,005	34514
25	3	19	-0,22		Солнце	358,44	Меркурий	358,66			34514
25	3	19	266,81		Солнце	358,44	Юпитер	91,63			34514
26	4	15	-269,41	1049	Солнце	25,63	Сатурн	295,04	21,105	13,196	43227
26	4	15	-182,11		Венера	44,78	Плутон	226,89			43227
27	12	7	-267,19	1058	Луна	7,18	Уран	274,37	17,340	0,944	15503
27	12	7	-4,19		Меркурий	270,18	Уран	274,37			15503
27	12	7	1,68		Сатурн	282,82	Нептун	281,14			15503
28	11	12	-0,83	1062	Солнце	229,75	Меркурий	230,58	4,112	10,037	22459
28	11	12	3,76		Венера	276,76	Уран	273,00			22459
28	11	12	-180,92		Луна	34,42	Марс	215,34			22459
28	11	12	-0,10		Сатурн	280,25	Нептун	280,35			22459
28	11	12	4,53		Солнце	229,75	Плутон	225,22			22459
29	2	6	89,79	1071	Солнце	317,44	Плутон	227,65	11,988	23,586	8497
29	2	6	1,14		Венера	290,98	Сатурн	289,84			8497
29	2	6	4,73		Луна	96,09	Юпитер	91,36			8497
29	2	6	-2,15		Марс	275,71	Уран	277,86			8497
29	2	6	1,90		Меркурий	292,88	Венера	290,98			8497

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
30	11	9	<b>0,98</b>	1073	Солнце	<b>226,71</b>	Меркурий	<b>225,73</b>	3,546	9,273	21564
30	11	9	<b>0,90</b>		Венера	<b>273,76</b>	Уран	<b>272,86</b>			21564
30	11	9	<b>0,63</b>		Меркурий	<b>225,73</b>	Плутон	<b>225,10</b>			21564
30	11	9	<b>-0,28</b>		Сатурн	<b>279,99</b>	Нептун	<b>280,27</b>			21564
30	11	9	<b>-179,60</b>		Юпитер	<b>100,67</b>	Нептун	<b>280,27</b>			21564
31	4	7	<b>-267,22</b>	1084	Солнце	<b>17,34</b>	Нептун	<b>284,56</b>	10,418	1,954	40549
31	4	7	<b>92,82</b>	1084	Марс	<b>319,92</b>	Плутон	<b>227,10</b>			40549
32	4	6	<b>-267,72</b>	1087	Солнце	<b>16,84</b>	Нептун	<b>284,56</b>	22,145	13,648	40436
32	4	6	<b>92,42</b>		Марс	<b>319,53</b>	Плутон	<b>227,11</b>			40436
33	5	12	<b>0,0000</b>	1094	«?»		«?»		15,558	9,408	51023
34	4	25	<b>-3,33</b>	1203	Луна	<b>43,90</b>	Меркурий	<b>47,23</b>	18,887	11,630	46197
34	4	25	<b>-4,98</b>		Уран	<b>279,58</b>	Нептун	<b>284,56</b>			46197
35	11	9	<b>0,87</b>	1212	Солнце	<b>226,91</b>	Меркурий	<b>226,04</b>	8,163	13,902	21620
35	11	9	<b>1,08</b>		Венера	<b>273,95</b>	Уран	<b>272,87</b>			21620
35	11	9	<b>0,93</b>		Меркурий	<b>226,04</b>	Плутон	<b>225,11</b>			21620
35	11	9	<b>-0,26</b>		Сатурн	<b>280,01</b>	Нептун	<b>280,27</b>			21620
35	11	9	<b>-179,61</b>		Юпитер	<b>100,66</b>	Нептун	<b>280,27</b>			21620
36	1	30	<b>-268,91</b>	1235	Луна	<b>1,99</b>	Марс	<b>270,90</b>	19,961	7,071	7155
36	1	30	<b>3,30</b>		Венера	<b>292,40</b>	Сатурн	<b>289,10</b>			7155
36	1	30	<b>-3,51</b>		Меркурий	<b>285,59</b>	Сатурн	<b>289,10</b>			7155
37	11	3	<b>4,37</b>	1259	Солнце	<b>221,30</b>	Меркурий	<b>216,93</b>	18,014	23,386	19718
37	11	3	<b>-0,60</b>		Сатурн	<b>279,54</b>	Нептун	<b>280,14</b>			19718
37	11	3	<b>-3,58</b>		Солнце	<b>221,30</b>	Плутон	<b>224,88</b>			19718
37	11	3	<b>-179,32</b>		Юпитер	<b>100,82</b>	Нептун	<b>280,14</b>			19718
38	4	20	<b>-264,62</b>	1296	Солнце	<b>30,56</b>	Сатурн	<b>295,18</b>	22,101	14,524	44706
38	4	20	<b>2,36</b>		Луна	<b>332,36</b>	Марс	<b>330,00</b>			44706
39	2	12	<b>89,05</b>	1359	Луна	<b>180,10</b>	Юпитер	<b>91,05</b>	21,349	9,367	9914
39	2	12	<b>0,79</b>		Венера	<b>291,32</b>	Сатурн	<b>290,53</b>			9914
39	2	12	<b>-3,21</b>		Марс	<b>280,35</b>	Нептун	<b>283,56</b>			9914
40	1	5	<b>-1,42</b>	1363	Солнце	<b>284,69</b>	Сатурн	<b>286,11</b>	7,187	16,669	2262
40	1	5	<b>2,49</b>		Солнце	<b>284,69</b>	Нептун	<b>282,20</b>			2262
41	11	30	<b>-2,90</b>	1386	Луна	<b>271,05</b>	Уран	<b>273,95</b>	10,462	17,588	13839
41	11	30	<b>1,81</b>		Марс	<b>227,75</b>	Плутон	<b>225,94</b>			13839
41	11	30	<b>1,14</b>		Сатурн	<b>282,03</b>	Нептун	<b>280,89</b>			13839
41	11	30	<b>-181,72</b>		Юпитер	<b>99,17</b>	Нептун	<b>280,89</b>			13839
42	2	17	<b>1,52</b>	1522	Венера	<b>292,53</b>	Сатурн	<b>291,01</b>	13,797	2,123	10921
42	2	17	<b>0,07</b>		Марс	<b>283,77</b>	Нептун	<b>283,70</b>			10921
43	12	2	<b>3,37</b>	1646	Марс	<b>229,41</b>	Плутон	<b>226,04</b>	20,551	3,835	14460
43	12	2	<b>1,31</b>		Сатурн	<b>282,29</b>	Нептун	<b>280,98</b>			14460

Примечание:

Названия столбцов:

1. Последовательные номера сигналов, отсортированные в порядке увеличения их длительности.
2. Месяц регистрации сигнала.
3. День регистрации сигнала.
4. Разность эклиптических долгот (градусы) двух сравниваемых «планет».
5. Длительность сигнала, секунды.
6. Имя (включая Солнце) первой «планеты» в паре, для которой проводится сопоставление.
7. Значение первой «планеты» эклиптической долготы (градусы).
8. Имя эклиптической долготы для второй «планеты» в паре, для которой производится сравнение.
9. Значение эклиптической долготы для второй «планеты» в паре, для которой производится сравнение.
10. Момент (часы и доли часа по всемирному времени) регистрации сигнала, соответствующий середине его длительности.
11. Местное звездное время (часы и доли часа) регистрации сигнала.
12. Цифровой код сигнала.

Основные выводы из изложенного выше можно сформулировать следующим образом:

1. Показано, что экстремальные значения параметров сигналов в детекторе Н.А. Козырева чаще всего наблюдаются при одновременной реализации особых планетных конфигураций, когда угловые расстояния между планетами Солнечной системы в пределах ошибки в несколько градусов равны: 0, 90, 180 или 270 градусов. Справедливо будет отметить, что это именно те значения угловых расстояний, особая роль которых привнесена в современность астрологической традицией [10].

2. Обнаружено, что длительность сигналов в детекторе Н.А.Козырева возрастает в моменты верхней кульминации Луны или Солнца. Следует сказать, что и в астрологии моменты кульминации планет также относятся к информативно значимым [9].

3. Как следствие результатов по п. 1 и 2 можно сделать вывод, что «детектор Н.А. Козырева» является серьезным претендентом на роль объективного физического устройства, способного в отсутствие телескопа в замкнутом помещении вне видимости неба автоматически регистрировать наступление астрологически значимых событий – когда угловые расстояния между планетами (аспекты) принимают определенные значения! До сих пор нам не известно ни одного физического прибора, обладающего подобными свойствами. Разумеется, это не является основанием для беззаветной веры в астрологическую предопределенность.

4. Предполагается, что длительность сигнала, регистрируемая детектором и длительность воздействия проникающего космического излучения от звезд на биологический приемник пропорциональны. Тогда изменение длительности воздействия в данный момент времени приводит к изменению дозы излучения, поглощенной биологическим объектом за время воздействия, что может опосредоваться в процессах эмбрио- и онтогенеза.

5. Поскольку гипотетическое излучение обладает высокой проникающей способностью, то вся жизнь биологических ор-

ганизмов происходит под его непрерывным влиянием, начиная с момента оплодотворения яйцеклетки. Если влияние дозы поглощенной в эмбриогенезе опосредуется в ходе последующего развития, то согласно приводимым М. Гокленом и, как он пишет, «подтвержденным независимым анализом» данным, с необходимостью следует, что в процессе эмбриогенеза неизбежно должна существовать какая-то непродолжительная по времени стадия, или фаза развития (назовем ее критической), когда та или иная доза поглощенного излучения звезд влияет на тип нервной системы (психофизиологический профиль человека).

Но плод развивается не один день, а планеты восходят, заходят и кульминируют ежедневно! Возможно, что уровень поглощенной дозы (оставим в стороне вопрос, кем именно – плодом, матерью или суммарно ими обоими, ведь излучение «всепроницающее») просто запускает механизм родов, когда к этому все готово, и «влияние» планет в момент рождения ребенка на его психофизиологические свойства в будущем здесь не при чем, так как этим свойствам еще предстоит формироваться, используя задатки унаследованные от родителей? В пользу этого свидетельствуют данные самого М. Гоклена, обнаружившего сдвиг момента начала родов в сторону более ранних значений, т.е. к моменту кульминации, при использовании фармакологических средств, облегчающих роды [7].

6. Согласно известным данным [11, 12], излучение можно концентрировать в фокальной плоскости телескопа-рефлектора даже при закрытой крышке телескопа, когда свет в него не проходит. Это позволяет надеяться на обнаружение критических фаз эмбриогенеза, чувствительных к поглощенной дозе, используя яйцеклетки животных, помещенных в фокальной плоскости телескопа при наведении последнего на источники излучения в моменты их кульминации.

7. Согласно полученным данным (рис. 1), максимальные значения длительности сигналов вблизи моментов верхней кульминации Луны и Солнца близки, не-

смотря на то, что сходным параметром у этих двух тел (одно из которых звезда, а другое – планета) является лишь равенство их угловых размеров. Это наводит на мысль о том, что различие «планетных влияний» → длительности сигналов (т.е. продолжительности воздействия → поглощенной дозы → конечного биологического отклика) может быть связано с различием угловых размеров планет, экранирующих излучающую область неба вблизи моментов ее кульминации или восхода.

8. Поскольку орбиты больших планет лежат вблизи плоскости эклиптики, все они, смещаясь относительно звезд, периодически проходят «вблизи» (в смысле угловых расстояний) одних и тех же звезд, «экранируя» если не одни и те же, то «близко» расположенные звезды-источники. Это значит, что, находясь вне видимости неба, детектор Н.А. Козырева, раз уж он такой чувствительный и адекватный (но, увы, не обладающий избирательностью приема), должен иметь способность отслеживать смещение планет относительно хотя бы некоторых звезд-источников излучения. Чтобы зарегистрировать такое движение какой-либо планеты-экрана, необходимо ежедневно вблизи моментов верхней кульминации планеты проводить регистрацию сигналов с детектора, а затем проанализировать распределение только тех сигналов, значения которых попадают в интервал длительностей, характерных для данной планеты и определяемых ее угловыми размерами (тем самым уменьшив, по возможности, долю сигналов, не связанных с кульминирующей планетой, но по необходимости включаемых в анализ). Напомним, что в момент кульминации планеты сигналы от звезд, находящихся на малых угловых расстояниях от планеты, «удлиняются». Таким образом, из всех сигналов, зарегистрированных вблизи момента одновременной кульминации разных источников, мы выделим характерные, т.е. увеличим в общей массе долю тех сигналов, которые обусловлены «исследуемой» планетой. Если моменты появления таких сигналов обнаружат сдвиг моментов регистрации в последо-

вательные сутки, то это будет свидетельствовать о движении планеты-экрана относительно звезд-источников.

Полученное распределение точек надо проанализировать в координатах порядковый номер суток – местное звездное время регистрации сигнала. Если в плоскости графика на фоне хаотичного распределения точек обнаружатся их сгущения вдоль какой-то линии (или линий), то такую линию можно рассматривать как график зависимости времени появления сигнала в последовательные сутки. Наклон такой линии к оси абсцисс даст значение суточной скорости смещения планеты относительно звезд по прямому восхождению.

Ну, а зная, возле каких звезд (в проекции на небесную сферу) смещалась планета, можно определить и сами звезды – источники сигналов.

Здесь, правда, существует неопределенность (будем надеяться преодолимая), связанная с выбором порога дискриминации сигналов по длительности.

Однако существует и другой подход к определению таких звезд, результаты которого представлены далее.

Исходя из предположения, что длительные изменения тока являются не шумом, а откликом (сигналом) «приемника» на проникающее излучение переменных звезд, было проанализировано распределение значений длительности сигналов в пределах часа от момента верхней кульминации Луны. Основанием такого подхода послужили данные о «выделенности» плоскости небесного меридиана [4] и изменение формы спектров амплитуд макроскопических состояний в зависимости от высоты Луны над горизонтом [13]. Всего за 7 месяцев опыта сигналы указанной длительности вблизи моментов кульминации Луны наблюдались 27 раз, при этом было обнаружено увеличение длительности сигналов в зависимости от близости Луны к плоскости небесного меридиана – рис. 1, а. Результатом этого наблюдения стал вывод о том, что наиболее вероятными источниками сигналов в этом случае могут быть только те переменные звезды, которые

в проекции на небесную сферу расположены на малом угловом расстоянии от Луны. Поскольку Луна в этом случае находится вблизи прямой источник – приемник, увеличение длительности сигнала следует рассматривать как следствие влияния Луны на проникающее излучение, регистрируемое приемником.

Если это предположение справедливо и степень «влияния Луны» на проникающее излучение звезды изменяется с изменением углового расстояния от Луны до звезды (т.е. расстояния в единицах дуги на небесной сфере от Луны до линии источник-приемник), то между длительностью сигнала (откликом приемника на воздействие) и угловым расстоянием звезда – Луна должна существовать связь. (Другое дело, можно ли ее обнаружить – см. далее обсуждение результатов пп. 1, а и 2, а).

Чтобы установить наличие такой связи, в области неба размером примерно 5 на 5 градусов (по прямому восхождению и склонению) с центром, соответствующим положению Луны на момент регистрации сигнала, определялись координаты нескольких наиболее близких к Луне переменных звезд (до 12 звездной величины). Соотношение между значением длительности сигнала и

расстояниями по прямому восхождению до таких звезд представлено на рис. 3. Как видно из рисунка, чем больше длительность сигнала, тем ближе к лунному диску расположены переменные звезды в той области неба, куда проецируется диск Луны.

Эту особенность распределения можно объяснить только как следствие того единственного обстоятельства, что в формировании сигнала повышенной длительности одновременно участвуют не одна, а несколько переменных звезд. В противном случае, с увеличением длительности сигнала смещение точек к оси ординат на рис. 3 отсутствовало бы. Ниже приведен предварительный перечень ряда переменных звезд («демонстрирующих» сдвигом к оси ординат «чувствительность» к «Лунным влияниям»), некоторые из которых, вероятно, ответственны за появление «макрофлуктуаций» в биологических, физических и химических системах. Вот номера некоторых из этих звезд (перечислены через запятую) из каталога «Гиппаркос» издания Европейского космического агентства (ЕСА):

88635, 88567, 1645, 106961, 117245, 65639, 26295, 30618, 66015, 26754, 98688, 30827, 90671, 109460....

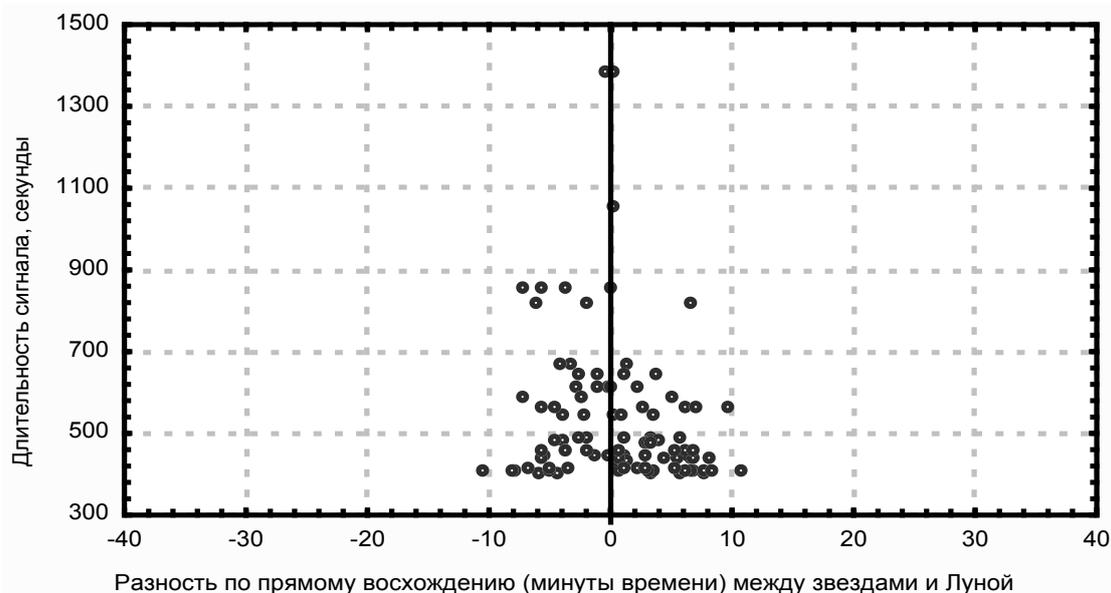


Рис. 3. Соотношение между длительностью сигнала и расстоянием по прямому восхождению (в единицах времени – минуты) между Луной и звездами. По абсциссе – разность по прямому восхождению (в единицах времени – минуты) между звездами и Луной. По ординате – длительность сигнала, с

## Обсуждение результатов

**1.1.** Прикидочный анализ характера ожидаемого распределения точек в координатах «длительность сигнала – угловое расстояние звезда – Луна» оставляет совсем немного надежд на осмысленность такой работы.

Если проникающее излучение от разных «активных» звезд имеет единую природу (например, аналогично свету), то Луна одновременно воздействует (модулирует) излучение всех «активных» звезд, направления от которых на приемник проходят поблизости от ее диска (в рассматриваемом случае – в пределах 10 минут (в единицах времени) по прямому восхождению – рис. 3, т.е. примерно на расстоянии 5 видимых диаметров Луны).

Предположим, что на момент регистрации сигнала лишь одна из нескольких окружающих Луну переменных звезд и воздействует на приемник (т.е. активна), и испытывает «лунное влияние» из-за близости ее координат координатам лунного диска. Но как тогда заметить и выделить «активную» звезду из группы «неактивных» в данный момент времени, но также проецирующихся в область неба вблизи лунного диска? Ведь для данного сигнала всем звездам вблизи Луны соответствует одно значение длительности (одно значение ординаты на графике рис. 3). И поскольку звезды находятся на разном угловом расстоянии от Луны, то одно значение ординаты графика соответствует нескольким значениям абсциссы. Поэтому возможный «сдвиг» вдоль абсциссы всего лишь одной точки соответствующей «активной» звезде выделить невозможно и он останется незамеченным. Следовательно, можно ожидать «равномерного» распределения точек вдоль оси абсцисс в плоскости рис. 3, при этом ближе к абсциссе точки должны быть расположены гуще, т.к. с уменьшением длительности число зарегистрированных сигналов возрастает. И это не дает никаких средств выделить «активную» звезду из группы «бездействующих».

Естественно предположить, что влияние Луны реализуется а участке траек-

тории источник (звезда) – приемник (на Земле) в пространстве около Луны, т.е. Луна модулирует параметры проникающего излучения в зависимости от расстояния Луны до линии звезда-приемник и должно быть тем сильнее, чем ближе Луна к этой линии.

**1.2.** Обнаружение одновременного участия сразу нескольких источников-звезд в формировании длительного отклика приемника, по-видимому, является следствием того счастливого обстоятельства, что применяемая схема детектора оказалась настолько плохой, чтобы быть достаточно хорошей. Дело в том, что сигналы при визуальном анализе записей на ленте самописца практически не разделяются по амплитуде. Поэтому, если следующий во времени сигнал начинается тогда, когда еще не окончен предыдущий, то это мало отражается на амплитуде, и при анализе записей два таких наложенных во времени сигнала воспринимаются как один сигнал увеличенной длительности. Это не вызывает удивления. Но вызывает удивление другой факт – почему за 7 месяцев непрерывных наблюдений столь невелико число длительных сигналов вблизи моментов верхней кульминации Луны – ведь кульминация Луны происходит ежедневно (если быть точным, за исключением 1–2 дней в месяц).

Возможное объяснение этому – указание на зависимость вероятности регистрации приемником сигнала от фазы периода изменения блеска звезды («Биофизика». – Т. 37. – Вып. 6. – 1992. – С. 1116 – О гипотезе биений в механизме возникновения экстремальных значений дифференциального зрительного порога человека). Если это объяснение справедливо, то регистрация длительного сигнала, т.е. одновременно от нескольких звезд сразу, требует, чтобы каждая из этих звезд находилась в определенной фазе своего «периода переменности» для проникающего излучения. Пока неизвестно, насколько правильно сопоставлять его с периодом изменения блеска у звезд разного типа, но для звезд некоторых спектральных классов это, по-видимому, допустимо, иначе трудно объяснить результаты.

При допущении синфазности (или постоянства разности фаз) у «излучающих звезд» (какова же тогда природа излучения, т.е. «проникающего фактора», что оно опосредуется на макроуровне от полупроводников до человека?) как необходимого условия возникновения длительного сигнала в приемнике моменты наступления «синфазности» будут иметь дискретный характер. А это значит, что «воспроизведение результатов» возможно не всегда, а лишь на вполне конкретные даты, т.е. дискретно. Разумеется, эти даты могут быть предварительно рассчитаны, если известны конкретные звезды, составляющие группу звезд, формирующих длительный сигнал и «периоды переменности» этих звезд. И как только такие расчеты сделаны, «дискретность» воспроизводимости результатов (дискретность формы спектров гистограмм...) будет рассматриваться как сама собой разумеющаяся, ведь мы не удивляемся дискретности воспроизводимости восходов и заходов Солнца, которых приходится ожидать целые сутки.

**2.1.** Интуитивно понятно, что чем больше звезд включается в рассмотрение, тем сильнее будет «зашумлена» картина распределения точек в плоскости графика присутствием звезд, не участвующих в формировании сигнала. С другой стороны, чем меньше на каждый момент регистрации включено в анализ звезд вблизи Луны, тем больше вероятность пропустить звезды, имеющие отношение к появлению в приемнике сигналов. В большей части случаев «вылавливание» переменных звезд вблизи Луны прекращалось после отбора 3–5 ближайших звезд. Заметим, что процедура такого отбора проводилась в ощущении полной бессмысленности этой работы, поэтому число в 3–5 звезд является своего рода эмоциональным компромиссом – надо «выполнить свой долг» и, однажды сделав, больше к этому никогда не возвращаться! Поскольку даже в разные сутки переменных звезд возле Луны оказывалось «слишком много», 3–5 звезд «отлавливались» уже на расстоянии от Луны меньшим 10 минут времени по прямому восхождению (или, примерно, 2,5 градуса).

**2.2.** При выборе звездного каталога для анализа учитывались точность данных, их полнота и однородность охвата.

Под полнотой каталога понимается то, насколько полно в нем представлены звезды до некоторой звездной величины; в идеале каталог должен содержать все наблюдаемые звезды, яркость которых выше установленного порога.

Однородность каталога предполагает, что в нем представлены все области небесной сферы, причем между различными областями в указании положений звезд нет систематических расхождений.

Европейское космическое агентство (ЕСА) издало каталоги «Гиппаркос» и «Тихо», которые использовались здесь как источник данных. Эти каталоги появились в результате космического проекта ЕСА, основной целью которого было определение точных астрометрических данных примерно для 100 000 звезд (каталог «Гиппаркос»). В 1982 г. цели проекта были расширены и было решено получить несколько менее точные данные уже для 1 миллиона звезд (каталог «Тихо»). Каталог «Тихо» включает почти все звезды, содержащиеся в каталоге «Гиппаркос».

Наблюдения с искусственных спутников выгодно отличаются от наземных наблюдений тем, что из одной точки и в одной и той же системе отсчета может наблюдаться полное небо. Спутник «Гиппаркос» был запущен 8 августа 1989 г., а данные с него передавались с ноября 1989 г. по март 1993 г. Сами каталоги были изданы в июне 1997 г. То, что подготовка каталогов заняла почти четыре года, свидетельствует об огромной аналитической работе, которая потребовалась для обработки почти 1000 Гбит первичных данных, полученных в ходе проекта.

Из тома I печатного издания этих каталогов взята следующая информация.

Каталог «Гиппаркос».

Число объектов 118 218. Порог звездной величины 12,4 *mag*. Полнота до 7,3–9,0 *mag*

Каталог «Тихо».

Число объектов 1 058 332. Порог звездной величины 11,5 *mag*. Полнота до 10,5 *mag*.

Каталоги «Гиппаркос» и «Тихо» для 118 218 объектов перекрываются. Первый из них в основном полон до звездных величин  $V = 7,3 - 9 \text{ mag}$  (в зависимости от галактической широты и спектрального класса). Другие звезды, плотность которых по небесной сфере, грубо говоря, можно считать постоянной, включены до предела наблюдаемости порядка  $V = 12,5 \text{ mag}$ . Каталог «Тихо» в основном полон до  $V = 10,5 \text{ mag}$  и содержит объекты до предела наблюдений «Тихо»  $V = 11 - 11,5 \text{ mag}$ . Следовательно, большинство объектов «Гиппаркоса» содержится в Каталоге «Тихо», за исключением примерно 2300 объектов, находящихся ниже порога обнаружения «Тихо».

**2.3.** Несколько слов по поводу милой сердцу «выделенности» пространственных направлений плоскостью небесного меридиана.

Настоящий анализ исходит из предположения о том, что степень воздействия источника на приемник уменьшается с увеличением линейного расстояния до источника (т.е. расстояния от Земли до звезды).

Если плоскость небесного меридиана выделена в том смысле, как об этом писалось ранее [4], т.е. «способствует» регистрации сигнала от звезды, когда она находится вблизи меридиана (т.е. на малых угловых расстояниях от него), то можно думать, что (преимущественно) ближе к плоскости меридиана на моменты регистрации сигналов должны находиться те звезды, которые от Земли расположены дальше (в смысле линейных расстояний). Ведь чтобы приемнику их «заметить», «способствовать» со стороны меридиана, надо более «активно», чем для ближе находящихся к Земле звезд.

С учетом представлений о роли относительной скорости приемника в актах регистрации сигналов [1, 15] «выделенность» плоскости небесного меридиана обусловлена просто таким положением приемника, когда вектор его скорости, связанной с суточным вращением Земли, перпендикулярен направлению на звезду. Поэтому для исключения влияния относительной скорости звезда-приемник на параметры сигнала (так сказать,

исследования феноменологии «в чистом виде») необходимо проведение записей сигналов от звезд в моменты, когда не только вектор суточной скорости (моменты кульминации), но и вектор орбитальной скорости Земли перпендикулярен направлению на звезду (особенно для звезд, расположенных вблизи плоскости эклиптики). Для конкретной звезды такие моменты времени разделены полугодовым интервалом, что накладывает дополнительную «дискретизацию» на условия воспроизводимости результатов.

Для цефеид учет скорости пульсационного движения газовых оболочек облегчается благодаря тому, что фаза изменения их блеска связана со скоростью пульсационного движения в этих звездах.

Что касается мнения [13] о гравитационном влиянии Луны на макрофлуктуации, то, по-видимому, авторы правы с той оговоркой, что изменения формы гистограмм во времени отражают изменения «гравитационной обстановки» в том смысле, что ее наиболее существенным компонентом является не столько «положение Луны относительно Земли и Солнца», сколько положение Луны относительно линии источник (звезда) – приемник, что, разумеется, справедливо лишь для тех звезд, которые расположены вблизи плоскости эклиптики. Что касается сигналов от Солнца как их источника, то данное уточнение не нужно.

### Библиографический список

1. Сизов А.Д. О биологической и физической детекции проникающего излучения от звездных источников // Биофизика. – 1995. – Т. 40. – Вып. 4. – С. 897–904.
2. Сизов А.Д. О модели физического устройства для демонстрации эффектов, связанных с появлением экстремальных значений дифференциального зрительного порога человека. – Статья депонирована в ВИНТИ за № 1172-B92 от 7 апреля 1992 // РЖ Биофизика. – 1992. – Т. 37. – Вып. 6. – С. 1116.
3. Козырев Н.А. Астрономические наблюдения посредством физических свойств времени // Вспыхивающие звезды: Труды симпозиума, приуроч. к открытию 2.6-м телескопа Бюраканской астрофиз. обсерв., Бюракан, 5-8 октября 1976 года. Ереван. – 1977. – С. 209–227.

4. Сизов А.Д. Флуктуации тока в мостике Уинстона. Возможные космофизические корреляции // Биофизика – 1998. – Т. 43. – Вып. 4. – С. 726–729.
5. Всесоюзное Астрономо-геодезическое общество. Астрономический календарь. Постоянная часть. Издание шестое. – М.: Наука, 1973. – С. 48.
6. Мишель Гоклен. Досье космических влияний. Характеры и темпераменты. – М.: КРОН-ПРЕСС, 1998. – С. 64, 248.
7. Мишель Гоклен. Досье космических влияний. Характеры и темпераменты. – М.: КРОН-ПРЕСС, 1998. – С. 246–253.
8. Катрин Обье. Астрологический словарь. – М.: КРОН-ПРЕСС, 1996. – С. 337–340.
9. Катрин Обье. Астрологический словарь. – М.: КРОН-ПРЕСС, 1996. – С. 167.
10. Энциклопедия для детей. Т.8. Астрономия. – М.: Аванта+, 1997. – С. 635.
11. Лаврентьев М.М., Гусев В.А., Еганова И.А., Луцет М.К., Фоминых С.Ф. О регистрации истинного положения Солнца. ДАН СССР. – 1990. – Т. 315. – № 2. – С. 368–370.
12. Лаврентьев М.М., Еганова И.А., Луцет М.К., Фоминых С.Ф. О дистанционном воздействии звезд на резистор. ДАН СССР. – 1990. – Т. 314. – № 2. – С. 352–355.
13. Удальцова Н.В., Коломбет В.А., Шноль С.Э. // Возможная космофизическая обусловленность макроскопических флуктуаций в процессах разнотной природы. Пушино: НЦБИ, 1987. – С. 96, см. С. 76–78.
14. Шноль С.Э., Коломбет В.А. О реализации дискретных состояний в ходе флуктуаций в макроскопических процессах (феномен «макроскопическое квантование», феномен «макроскопические флуктуации») // Физическая мысль России. – № 1. – 1995. – С. 87–93.
15. Сизов А.Д., Бурлаков А.Б., Пушкарь В.Я., Голиченков В.А. Об отклике биологических объектов на воздействие проникающего излучения звезд. Пространственно-временная организация онтогенеза. – М.: Изд-во МГУ, 1998. – С. 231–240.
16. Федоров М.В., Белоусов Л.В., Воейков В.Л., Зенченко К.И., Зенченко Т.А., Конрадов А.А., Шноль С.Э. Корреляция тонкой структуры распределения амплитуд флуктуаций темнового тока фотоумножителей с вращением Земли вокруг своей оси // Биофизика. – Т. 46. – Вып. 5. – 2001. – С. 786–789.

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕЙРОНА

К.В. КОЛЕСНИЧЕНКО, МГУЛ,  
И.П. КОЛЕСНИЧЕНКО, НИИ биологии

Нейронная теория разработана в деталях великим испанским нейрогистологом Рамон-и-Кахалем. Именно он, а также итальянский гистолог Камилло Гольджи открыли специфические методы исследования, которые позволили анализировать гистологическую структуру нервной системы, за что оба были удостоены Нобелевской премии в 1906 г.

В то время существовало две гипотезы о строении нервной системы – **теория сети и нейронная теория**. Первую в начале века выдвинул Герлах и поддержали Гельд, Мейнерт и Гольджи, а в последующем активно пропагандировал профессор университета в Страсбурге Альфред Бете и немецкий гистолог Штер, вторую предложили в те же годы Гис и Форель.

Согласно теории сети нервная ткань представляет собой своеобразный синцитий (скелет, структура), в котором клетки фак-

тически лишены индивидуальности, ибо их отростки непрерывно переходят один в другой, так что формируется непрерывная диффузная сеть. Против теории сети выступили в 1886 г. Гис и в 1887 г. Форель, предположившие, что каждая нервная клетка представляет собой морфофункционально самостоятельную единицу и ее отростки заканчиваются свободно, а не сливаются с отростками других клеток. Для обозначения этой автономной единицы немецким ученым Вальдейром еще в 1891 г. был предложен термин «нейрон», который используется в современной неврологии.

Труды Кахаля и его учеников, а также Леношеа, Ван Гехухтена, Ретциуса, Келликера, Лэнгли и других доказали справедливость нейронной модели организации нервной системы. Они продемонстрировали, что нейроны в процессе индивидуального развития изначально формируются как автоном-

ные клетки, лишённые синцитиальных связей друг с другом. Растущие в процессе их дифференцировки отростки не проникают в тела других клеток, но устанавливают с ними контакт, так что индивидуальность каждой клетки сохраняется.

### Основные положения нейронной теории

Вся нервная система построена на нервной ткани. Нервная ткань состоит из нейронов и нейроглии. Нейроглия обеспечивает существование и специфические функции нейронов, выполняет опорную, трофическую, разграничительную и защитную функции. По численности их в 10 раз больше, чем нейронов, и они занимают половину объема Центральной нервной системы (ЦНС). Глиальные клетки окружают нервные клетки и играют вспомогательную роль. Глиальные клетки более многочисленны, чем нейроны: составляют, по крайней мере, половину объема ЦНС. Нейрон (нейроцит) получает, обрабатывает и передает информацию, закодированную в виде электрических или химических сигналов (рис. 1). В коре головного мозга человека их насчитывают, по крайней мере, 14 миллиардов. Каждый нейрон является клеточной единицей, самостоятельной в гистогенетическом, анатомическом и функциональном отношениях. Помимо нейронов, каких-либо других элементов, которым можно было бы приписать нервные функции, не существует.

Каждый нейрон у зародыша развивается из одной зародышевой клетки, нейробласта.

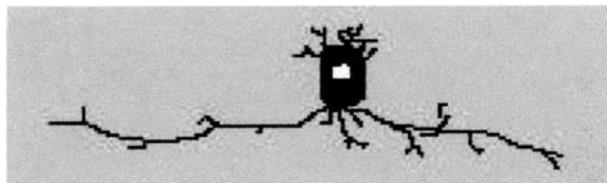


Рис. 1. Нейрон

Во взрослом организме нейрон может обладать разными размерами и формой, но схематически его всегда легко представить как клетку с отростками (рис. 1). Он состоит следовательно, из тела клетки (перикариона или сома), содержащего ядро, и отростков, которые подразделяются на дендриты, по которым к нейронам поступает нервный импульс, и аксон, по которому нервный импульс распространяется от нейрона к другим клеткам (рис. 2).

Аксон всегда один и может быть длинным (до 1 м), коротким, может ветвиться. Аксон часто имеет оболочку (часто – т.е. не везде). Как показано на рис. 3., аксон переходит в т.н. осевой цилиндр нервного волокна, и на начальном участке, около тела, является голым и отдает коллатеральные отростки, далее он покрывается миелиновой оболочкой, формирует дополнительные коллатерали, а затем, выходя из ЦНС и входя в состав какого-нибудь нервного ствола, покрывается миелиновой и т.н. шванновской глиальной оболочкой и превращается в осевой цилиндр периферического нервного волокна с сужениями, которые называются перехватами Ранвье.



Рис. 2. Структура нервной клетки (нейрона)

Пройдя определенное расстояние, аксон теряет миелин, сохраняя лишь шванновскую оболочку, и превращается в осевой цилиндр ветвящегося волокна. Наконец, он становится опять совершенно голым и распадается на т.н. телодендрии, которые оканчиваются на мишенях. Эти окончания еще в 1897 г., по предположению физиолога Шерингтона, были названы синапсами. Различают возбуждающие синапсы, которые передают импульсы, активизирующий нейрон и тормозящие синапсы, которые передают импульсы, тормозящие его активность.

Количество синапсов у разных нейронов разное. Так, на двигательном нейроне передних рогов спинного мозга содержится несколько сот синапсов, распределенных по его телу и дендритам.

Анатомическая самостоятельность нейрона выражается в том, что все его части остаются резко отграниченными от таких же частей других нейронов. Чтобы организовать длинные пути, проводящие нервные импульсы, нейроны складываются вместе наподобие отдельных звеньев, образующих цепь. Каждое звено этой цепи, каждый нейрон не сливается при этом с соседними, лишь тесно соприкасается с ним своими отростками. Каждая такая цепь служит для проведения нервных импульсов в определенном направлении, и один конец ее, где воспринимается импульс, является начальным, рецепторным, другой, где импульс передается исполнительным элементом, конечным, эффекторным.

Нейрон с его отростками является полярно-дифференцированным (принцип динамической поляризации нейрона, впервые сформулированный Кахалем). Так что дендриты несут рецепторную функцию, и только они и сома могут воспринимать нервные импульсы, тогда как аксон проводит эти импульсы от своего начала к конечным телодендриям.

Трофическим центром нейрона является перикарион (сома). Именно там происходят основные синтезы необходимых для функционирования клеток компонентов. От-

сюда они поступают в отдаленные части нейрона с помощью аксоного транспорта.

Специфической компонентой цитоплазмы нейрона является вещество Нисселя (тельца Нисселя), представленное плотно упакованными цистернами гранулярного эндоплазматического ретикулума, в стенках которого расположены рибосомы. Вещество Нисселя является, следовательно, аппаратом для синтеза белка. Распределение телец Нисселя в теле нейрона специфично для разных видов нервных клеток и образует своеобразный рисунок, особенности которого хорошо выявляются с помощью специальной окраски и видны в светооптический микроскоп.

### **Перикарион или сома**

Согласно электронно-микроскопическим данным в ядерной оболочке имеется много пор, через которые происходят активные обменные процессы между ядром и цитоплазмой.

### **Дендриты**

Дендриты – это отростки нейрона, проводящие импульсы к телу нейрона. Они, как правило, короткие, относительно широкие, сильно ветвящиеся, образуют множество синапсов с другими нервными клетками. Для них характерно наличие большого количества микротрубочек и нейрофиламентов, ориентированных вдоль отростка, хорошо развитая сеть цистерн ЭПР, свободные рибосомы. В местах ветвления дендритов в цитоплазме находится скопление митохондрий и свободных рибосом, цистерн гладкого и шероховатого ЭПР, элементы АГ. Характерная структурная особенность дендритов ЦНС – наличие особых цитоплазматических выростов – шипиков. Количество и распределение их по дендриту зависит от типа нейрона. Шипики имеют разные размеры и форму и нередко характеризуются присутствием особой структуры – шипикового аппарата, состоящего из 3–4 уплощенных цистерн, между которыми выявляется прослойка электроноплотного вещества. Они образуют синаптические контакты. При различных воздействи-

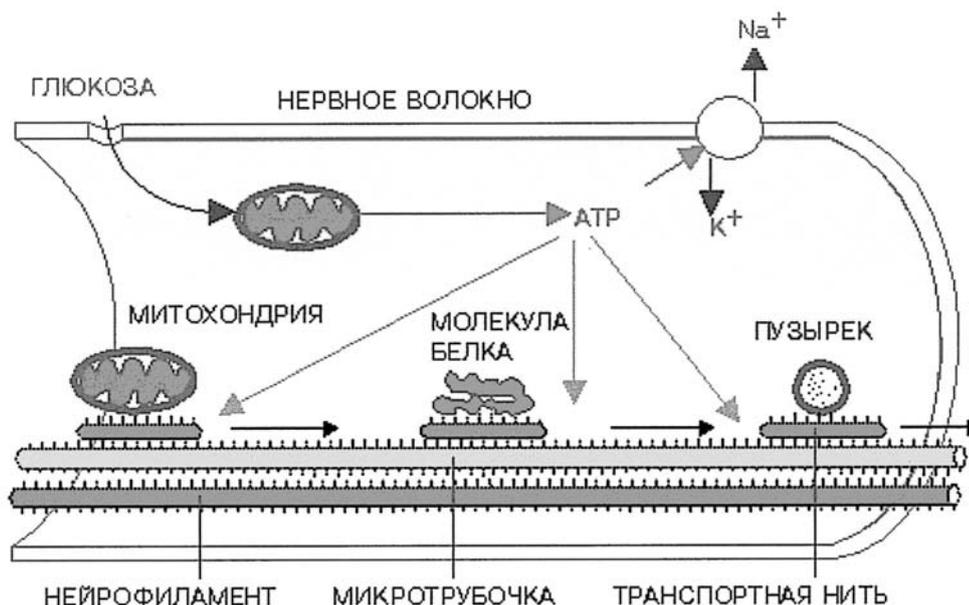
ях и функциональных состояниях шипики могут менять свои размеры и форму, наблюдаются картины дегенерации отдельных шипиков, образование новых.

### Аксон

Отдельные участки аксона отличаются друг от друга по ультраструктурной организации и функциональному значению. Участок, прилегающий к телу нейрона, носит название аксонного холмика, в нем генерируется нервный импульс. Размеры аксонного холмика у крупных нейронов достигают 10–30 мкм. Центральную часть его аксоплазмы занимают продольно ориентированные пучки микротрубочек, цистерны ЭПР, отдельные рибосомы, цистерны АГ и сложная сеть микрофиламентов. Электроно-микроскопическая структура расположенного за аксонным холмиком начального отдела аксона, продолжающегося до появления глиальной оболочки, также своеобразна и характеризуется отсутствием рибосом, компонентов АГ и микротрубочек. Зато в нем присутствуют спе-

циализированные аксо-аксонные синапсы, деятельность которых оказывает сильное влияние на активность нервной клетки. В средних отделах аксона структура аксоплазмы изменяется; одиночные микротрубочки и нейрофиламенты распределяются равномерно, появляются множество мультивезикулярных тел и пузырьков, хорошо развит гладкий ЭПР.

Микротрубочки – это полые трубки диаметром около 25 нм, идущие по всей длине аксона. Они образуют тонкие отростки через регулярные промежутки. Стенки микротрубочек состоят из белка тубулина. Возможно, что микротрубочки играют в аксоне ту же роль, что и миозин в мышце. Транспортные нити, вероятно, состоят из актина, они могут скользить вдоль микротрубочек с постоянной скоростью, и транспортируемые вещества или органеллы, связанные с транспортными нитями, также передвигаются с постоянной скоростью вдоль микротрубочки независимо от их индивидуальных свойств (рис. 3).



Гипотетический транспортный механизм нервного волокна.

(Schmidt R.F., Thews G., "Human Physiology", 1988.)

Рис. 3. Гипотетический транспортный механизм нервного волокна. Микротрубочки и нейрофиламенты снабжены тонкими выростами, над которыми скользят транспортные нити со скоростью 410 мм/день, при этом происходит дефосфорилирование АТФ. С транспортными нитями связаны митохондрии, молекулы белка и пузырьки. АТФ получается путем окисления глюкозы в митохондриях, АТФ используется для транспорта и калий-натриевого насоса

## Синапсы

Каждый аксон оканчивается на теле или дендритах других нейронов контактом, названным синапсом.

Синаптический контакт состоит из трех компонентов; пресинаптической области (пресинапс), синаптической щели и постсинаптической области (постсинапс).

Для пресинаптической зоны характерным является наличие синаптических пузырьков; их вид, размеры и содержимое определяют тип синапса. Синаптические пузырьки содержат медиатор, фермент аденозинтрифосфатазу, обеспечивающую энергией процесс захвата и секреции медиатора, ионы кальция. На мембране пузырьков найден сократимый белок миозин. Синаптические пузырьки формируются в районе аппарата Гольджи, а затем доставляются по аксону в синапс. В пресинапсе обнаружено также большое количество митохондрий (в крупных окончаниях несколько десятков). Кроме основной энергетической функции они служат резервуаром для ионов кальция и принимают участие в синтезе и утилизации многих медиаторов. В пресинапсе много микротрубочек, богатая сеть цистерн ЭПР и микрофиламентов. Важной частью синаптического контакта является участок пресинаптической мембраны, где происходит выброс медиатора в синаптическую щель – это активная зона синапса. На внутренней поверхности мембраны этого участка расположены многочисленные субмембранные утолщения, образующие правильную гексагональную решетку. Активная зона обеспечивает подход синаптических пузырьков к пресинаптической мембране и выделения их содержимого в синаптическую щель. В этом процессе основную роль играет механохимическое взаимодействие актина (нейрина) плотных тел и миозина, находящегося на мембране синаптических пузырьков.

Синаптическая щель представляет собой узкую 20–50 А полосу межклеточного пространства, отделяющую нейроны друг от друга в зоне синапса. Содержимое синаптической щели обеспечивает направленную

диффузию медиатора и его взаимодействие с рецепторами постсинаптической мембраны. Открытие синаптической щели окончательно подтвердило правильность нейронной теории Рамон-и-Кахаля.

Постсинаптическая часть синапса может быть образована любой частью нейрона или его отростков. Важнейшим компонентом постсинаптической мембраны являются специализированные мембранные белковые комплексы – рецепторы, обеспечивающие рецепцию медиатора и новообразование нервного импульса.

Непосредственно к постсинаптической мембране изнутри примыкает сложная фибриллярная сеть, названная постсинаптическим утолщением. Она предназначена для стабилизации в постсинаптической мембране рецепторных комплексов и осуществление связи с цитоплазмой постсинапса.

В зависимости от степени развития пре- и постсинаптического утолщения синапсы подразделяются на два типа (по Грью).

Симметричные контакты (I тип), у которых оба компонента развиты достаточно сильно, и асимметричные контакты (II тип), у которых постсинаптическое утолщение развито слабо.

Синаптические контакты могут образовывать разные части нейрона, потому можно различать семь основных типов синапсов: аксо-соматические, аксо-дендрические, сомато-соматические, сомато-дендрические.

В зависимости от природы проходящих через синапсы сигналов, синапсы делятся на электрические синапсы и химические синапсы.

### Химические синапсы

Различают возбуждающие химические синапсы и тормозные химические синапсы.

#### Синапс химический возбуждающий

Возбуждающими химическими синапсами называются такие синапсы, в которых в результате поступления импульса происходит деполяризация постсинаптической мембраны, которая при определенных усло-

виях может вызвать потенциал действия. Возбуждающие химические синапсы изучают на мотонейроне, так как он достаточно большого размера (диаметр сомы до 100 мкм). Каждый мотонейрон имеет около 6 000 аксо-соматических синапсов и аксо-дендритных синапсов, как тормозных, так и возбуждающих. Некоторые возбуждающие синапсы образованы афферентами рецепторов растяжения мышечных веретен скелетных мышц. Активируя эти синапсы раздражением нервных волокон скелетных мышц, можно регистрировать синаптические процессы с помощью внутриклеточных микроэлектродов.

При электрическом раздражении мышечных афферентов после короткого латентного периода возникает деполяризация постсинаптической мембраны, амплитуда которой зависит от количества возбужденных афферентов и, следовательно, от интенсивности электрического стимула. Эта деполяризация может возбуждать нейрон, вызывая распространяющийся потенциал действия и называется возбуждающим постсинаптическим потенциалом. Возбуждающий постсинаптический потенциал – это деполяризация постсинаптической мембраны в результате поступления импульса в возбуждающий химический синапс. Восходящая фаза возбуждающего постсинаптического потенциала длится около 2 мс, а нисходящая – 10–15 мс, независимо от величины потенциала, поэтому потенциалы, возникшие в разных синапсах, могут суммироваться по амплитуде.

Ионный механизм возбуждающего постсинаптического потенциала аналогичен ионному механизму генерации потенциала концевой пластинки. Неизвестный медиатор (не ацетилхолин), выделившийся из синаптических пузырьков под действием электрического импульса, действует на постсинаптическую мембрану, в результате чего в течение 1 – 2 мс открываются специфические натриевый и калиевый каналы. Ионы натрия входят в клетку, а ионы калия выходят из нее в соответствии с их концентрационными градиентами, вызывая деполяризацию постсинаптической мембраны, то есть, возбуждающий постсинаптический потенциал.

Одиночный возбуждающий постсинаптический потенциал не способен вызвать деполяризацию пороговой величины, необходимой для возникновения потенциала действия. Деполяризующие эффекты нескольких возбуждающих постсинаптических потенциалов складываются, это явление называется суммацией. Различают пространственную и временную суммацию. Пространственная суммация образуется в результате действия нескольких возбуждающих постсинаптических потенциалов, возникших одновременно в разных синапсах одного и того же нейрона. Временная суммация – часто повторяющееся высвобождение медиатора из синаптических пузырьков одной и той же синаптической бляшки под действием интенсивного стимула, вызывающего отдельные возбуждающие постсинаптические потенциалы, которые следуют так часто один за другим во времени, что их эффекты суммируются и вызывают в постсинаптическом нейроне потенциал действия.

В возбуждающих синапсах под действием ацетилхолина открываются специфические натриевые каналы и калиевые каналы в постсинаптической мембране. Как было сказано ранее, ионы натрия входят клетку, а ионы калия выходят из нее в соответствии с их концентрационными градиентами. В результате происходит деполяризация постсинаптической мембраны.

### **Синапс химический тормозной**

Тормозные химические синапсы – синапсы, препятствующие дальнейшему распространению импульса. Известно два типа торможения – постсинаптическое торможение, когда снижается возбудимость мембраны сомы и дендритов нейрона, и пресинаптическое торможение, когда уменьшается или прекращается высвобождение медиатора из пресинаптических нервных окончаний.

В центральной нервной системе позвоночных, по-видимому, более существенное значение имеет постсинаптическое торможение, а пресинаптическое выявлено в основном в пресинаптических окончаниях соматических и висцеральных афферентов и реже – в других отделах нервной системы.

### **Синапс электрический**

Электрические синапсы гораздо менее характерны для нервной системы млекопитающих, чем химические. В ЦНС имеются области тесного контакта между нервными клетками, где ширина синаптической щели составляет не 20 нм, как обычно, а всего 2 нм. Электрическое сопротивление внеклеточной жидкости в таком случае мало, и импульсы проходят через синапс без задержки. Большинство электрических синапсов являются возбуждающими.

### **Передача нервного импульса**

Передача нервного импульса в области синапса осуществляется с помощью медиаторов (химические синапсы). Каждый нейрон характеризуется специфическим медиатором, который он вырабатывает. Это качество называется эргичностью. Как правило, нейрон синтезирует только один медиатор (принцип Дэйла), хотя в последнее время показано, что во многих нервных клетках может сосуществовать два медиатора.

Медиаторы, выделяемые через пресинаптическую мембрану, воспринимаются рецепторными молекулами, расположенными в постсинаптической мембране. Ацетилхолин (АХ) действует непосредственно на рецепторный белок в постсинаптической мембране. АХ называют лигандом, когда имеют в виду, что он связывается с определенным участком белка. Это вызывает изменения проницаемости мембраны, при этом реакция мембраны может быть быстрой или медленной в зависимости от того, с каким типом рецептора свяжется АХ. Известны два типа АХ-воспринимающих рецепторов – никотиновый и мускариновый. Никотиновый может быть возбужден никотином, а мускариновый избирательно отвечает на аппликацию мускарина. Физиологически важным различием между ними является скорость ответа на поступающий сигнал: первый характеризуется быстрым и непродолжительным эффектом, второй – медленным и длительным. Действие АХ прерывается гидролизом, наступающим в результате действия фермента ацетилхолинэстеразы с обратным захватом продукта распада – холина – в пре-

синаптическое окончание. Поступление нервного импульса в синаптическую бляшку вызывает деполяризацию пресинаптической мембраны и повышение ее проницаемости для ионов кальция в результате того, что открываются потенциал-зависимые кальциевые каналы. Ионы кальция входят в синаптическую бляшку и вызывают слияние синаптических пузырьков с пресинаптической мембраной. Медиатор из синаптических пузырьков попадает в синаптическую щель. Весь этот процесс называется электросекреторным сопряжением. После высвобождения медиатора материал пузырьков используется для образования новых, заполняемых молекулами медиатора. Молекулы медиатора диффундируют через синаптическую щель (примерно за 0,5 мс) и связываются с рецепторами на постсинаптической мембране. При этом изменяется конфигурация молекулы рецептора, что приводит к открытию ионных каналов и поступлению в постсинаптическую клетку ионов, вызывающих сдвиг мембранного потенциала постсинаптической мембраны (постсинаптический потенциал – деполяризационный (возбуждающие синапсы) или гиперполяризационный (тормозные синапсы) в зависимости от вида медиатора и рецептора. Молекулы медиатора сразу же удаляются из синаптической щели либо путем их реабсорбции пресинаптической мембраной, либо путем диффузии из щели или ферментативным гидролизом. Промежуток времени между моментом поступления потенциала действия к пресинаптическому окончанию и началом смещения заряда постсинаптической мембраны называется синаптической задержкой. Для проведения нервного импульса через химический синапс необходимо наличие ионов кальция, иначе высвобождение медиатора не происходит. Механизм действия ионов кальция в пресинаптических окончаниях до сих пор неизвестен. Предполагают, что в состоянии покоя происходит взаимное электростатическое отталкивание синаптических пузырьков и пресинаптической мембраны, поскольку обе структуры несут отрицательные заряды. При возбуждении, когда ионы кальция  $Ca^{++}$ , несущие двойной положительный заряд, входят в нервное оконча-

ние, они могут экранировать фиксированный отрицательный заряд пресинаптической мембраны, что позволяет пузырькам приблизиться к ней.

### **Классификация нервных клеток по количеству отростков**

По количеству отростков нейроны подразделяются на униполярные, биполярные и мультиполярные клетки. Униполярные нейроны имеют лишь один отросток. У человека такие нейроны встречаются лишь на ранних стадиях онтогенеза. Биполярные нейроны имеют один аксон и один дендрит. Их разновидностью являются псевдоуниполярные нейроны. Аксон и дендрит этих клеток начинаются от общего выроста тела и в последующем Т-образно делятся. Мультиполярные нейроны имеют один аксон и много дендритов, они составляют большинство в нервной системе человека.

### **Классификация нервных клеток по функциональным качествам**

1. Сенсорные, или рецепторные, или афферентные нейроны. Их семантика такова: нейроны фиксируют изменения внешней среды, генерируемый импульс есть закодированная степень изменения внешней среды, т.е. импульс, сгенерированный слуховыми нейронами, есть закодированная информация о колебании слуховой перепонки. Тела этих обычно псевдоуниполярных нейронов находятся всегда вне головного и спинного мозга, располагаясь в узлах (ганглиях) периферической нервной системы.

Нервные окончания различаются по своему строению, расположению и функциям. Выделяют экстерорецепторы, интерорецепторы и проприорецепторы. Экстерорецепторы воспринимают раздражения из внешней среды. Эти рецепторы находятся в наружных покровах тела, в органах чувств. Интерорецепторы получают раздражение в основном при изменении химического состава внутренней среды организма, давления в тканях и органах. Проприорецепторы воспринимают раздражение в мышцах, сухожилиях, связках, фасциях и суставных капсулах.

2. Эфферентные, или мотонейроны, или выносящие, или двигательные, или секреторные нейроны проводят импульс к рабочему органу – мышцам, железам и другим органам. Тела этих нейронов располагаются в головном и спинном мозге, в симпатических или парасимпатических узлах на периферии.

3. Промежуточные, или ассоциативные, или кондукторные нейроны. Выступают в роле ретрансляторов нервного импульса. Они составляют 97 % нервных клеток нервной системы. Эти нейроны находятся, как правило, в пределах ЦНС (головного и спинного мозга). Они передают полученный от чувствительного нейрона импульс эфферентному нейрону.

### **Математическая модель биологического нейрона**

Для того чтобы построить математическую модель биологического нейрона, выясним его предназначение.

Задача биологического нейрона заключается в получении сигналов с дендритов: надо их суммировать и в зависимости от суммы сгенерировать новый сигнал и послать его другим нейронам или напрямую к рабочему органу.

### **Замечание**

*В классической теории нейронных сетей понимаются именно такие функции нейрона, при этом внимание совершенно не уделяется таким функциям, как память (т.е. то что биологический нейрон участвует в памяти человека), и другим функциям, которыми обладает биологический нейрон.*

Переводя на язык математики, мы имеем некую последовательность входных сигналов  $\{x_n\}$ , также существует последовательность весов синапсов  $\{w_n\}$ , которая влияет на прохождение сигнала. Далее все полученные сигналы суммируются, т.е. суммируется последовательность  $\{x_n * w_n\}$ , и полученная сумма передается в качестве параметра некой функции активации, которая возвращает новое значение сигнала, после чего это новое значение рассылается всем нейронам, подсоединенным к данному ней-

рону. (В дальнейшем под нейроном будет пониматься математический нейрон).

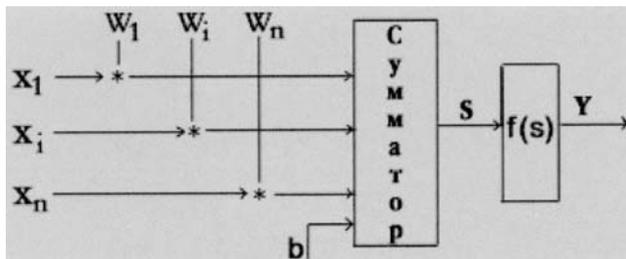


Рис. 4. Математическая модель нервной клетки

Введем два определения:

**Опр. №1**

Если  $W_i > 0$ , тогда связь называется возбуждающей;

если  $W_i < 0$ , тогда связь называется тормозящей.

**Опр. №2**

$f(s)$  – называется активационной функцией нейрона.

Нейроны подразделяются на входные, промежуточные и выходные соответственно по полной аналогии с биологическим клетками: рецепторные, ассоциативные, эфферентные.

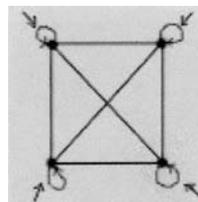
**Классификация нейронных сетей**

Некая совокупность нейронов называется нейронной сетью. По аналогии с компьютерными сетями, где нейрон – есть хост, а нейронная сеть – соответственно компьютерная сеть.

Нейронные сети можно классифицировать по различным характеристикам, в данном параграфе мы рассмотрим 4 разные классификации.

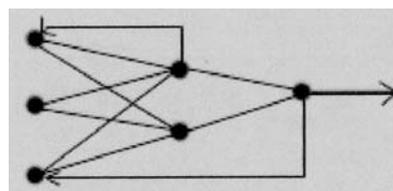
**№ 1 Классификация по топологии**

**1.1 Полносвязные сети**



Каждый нейрон передает свой выходной сигнал всем остальным нейронам в сети, включая самого себя. Для понимания то же самое, что и широковещательная передача в компьютерных сетях.

**1.2 Многослойные или слоистые**



Сеть разбивается на слои, где каждый слой содержит совокупность нейронов с едиными входными сигналами. Слои нумеруются слева на право, начиная с 0. В свою очередь многослойные сети делятся на:

Т а б л и ц а

**Виды активационных функций**

Название	Функция	Область значений
линейная	$f(s) = ks$	$(-\infty, \infty)$
полулинейная	$f(s) = ks, s > 0, f(s) = 0, s \leq 0$	$(0, \infty)$
логистическая (сигмоидальная)	$f(s) = 1/(1 + e^{-as})$	$(0, 1)$
гиперболический тангенс (сигмоидальная)	$f(s) = (e^{as} - e^{-as}) / (e^{as} + e^{-as})$	$(-1, 1)$
Экспоненциальная	$f(s) = e^{-as}$	$(0, \infty)$
Синусоидальная	$f(s) = \sin(s)$	$(-1, 1)$
Сигмоидальная (рациональная)	$f(s) = s/(a +  s )$	$(-1, 1)$
Шаговая (линейная с насыщением)	$f(s) = -1, s \leq -1, f(s) = 0, -1 < s < 1, f(s) = 1, s \geq 1$	$(-1, 1)$
Пороговая	$f(s) = 0, s < 0, f(s) = 1, s \geq 0$	$(0, 1)$
Модульная	$f(s) =  s $	$(0, \infty)$
Знаковая (сигнатурная)	$f(s) = \text{sgn}(s), s \neq 0, f(s) = -1, s = 0$	$(-1, 1)$
Квадратичная	$f(s) = s^2$	$(-1, 1)$

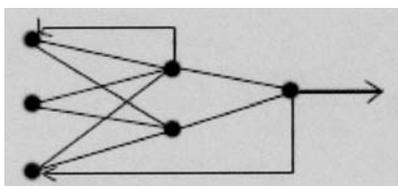
### 1.2.1 Монотонные

Каждый слой разбит на два блока (кроме последнего), возбуждающий блок и тормозящий блок. Если от блока 1 к нейронам блока 2 ведут только возбуждающие/тормозящие связи, то любой выходной сигнал есть монотонная неубывающая/невозрастающая функция любого выходного сигнала блока 1.

### 1.2.2 Сети без обратных связей

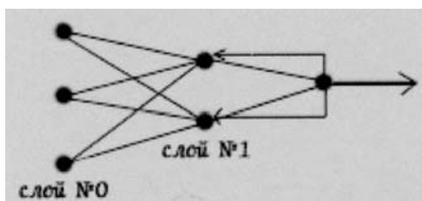
Обычная многослойная сеть с первым ограничением, что нейроны  $q$ -ого слоя могут передавать сигнал нейронам  $(q + 1)$ -ого слоя и никакому другому слою.

### 1.2.3 Сети с обратными связями



То же самое, что и 1.2.2, но так же можно передавать слоям с более меньшим порядковым номером. Они в свою очередь делятся на:

#### 1.2.3.1 Слоисто циклические



Многослойная сеть, у которой выход передает свои сигналы первому слою (не 0-му, а первому).

#### 1.2.3.2 Слоисто-полносвязные

Состоят из слоев, каждый из которых представляет собой полносвязную сеть.

#### 1.2.3.3 Полносвязные-слоистые

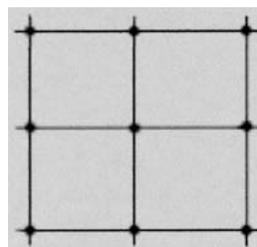
По своей структуре такие же, как и 1.2.3.2, а функционально в них не разделяют фазы обмена внутри слоя и передачи следующему, на каждом такте нейроны всех слоев применяют сигналы от нейронов как своего слоя, так и последующих.

## 1.3 Слабосвязанные сети

В слабосвязанных сетях нейроны располагаются в узлах прямоугольной форму или гексагональной решетки. Каждый нейрон связан с четырьмя (окрестность фон Неймана), шестью (окрестность Голея) или восемью (окрестность Мура) своими ближайшими соседями.

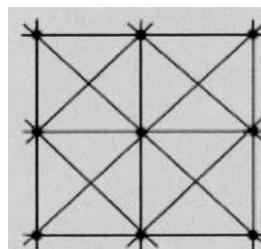
### № 2 Классификация по типам структур

#### 2.1 Гомогенные



Нейроны одного типа с единой функцией активации.

#### 2.2 Гетерогенные



Нейроны с различными функциями активации.

### № 3 Классификация по типу сигнала

**Бинарные** – двоичный сигнал и **Аналоговые**.

### № 4 Классификация по сетке

#### 4.1 Синхронные

В момент времени  $t$ , лишь один нейрон меняет свое состояние.

#### 4.2 Асинхронные

Группа нейронов меняет свое состояние; как правило группа – весь слой.

## ГИМС-ТЕХНОЛОГИЯ В МОНИТОРИНГЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ

В.Д. БУРКОВ, МГУЛ,  
В.Ф. КРАПИВИН, ИРЭ

Решение большинства прикладных задач агрометеорологии, лесного хозяйства, животноводства и многих других сфер человеческой активности, направленной на охрану окружающей среды, связано с определенными трудностями эффективного контроля состояния почвенно-растительных формаций (ПРФ). В течение нескольких последних лет среди таких глобальных задач широкому обсуждению подвергается проблема парникового эффекта по причине увеличения концентрации  $\text{CO}_2$  в атмосфере. Знание состояния ПРФ позволяет рассчитывать пространственное распределение интенсивностей стока углерода и тем самым получать достоверные оценки парникового эффекта.

Как известно, микроволновая радиометрия играет важную роль в получении оперативных данных о состоянии ПРФ [1–4, 6–11]. Однако здесь возникают дополнительные задачи, связанные с обработкой данных дистанционных измерений и идентификации характеристик ПРФ. Как отмечено в [7], одной из таких задач является изучение эффектов ослабления электромагнитных волн микроволнового диапазона (ЭВМД) в слое растительности. Опыт многих исследований показал, что решение этой задачи возможно путем построения полуэмпирических моделей, базирующихся на лабораторных и полевых измерениях и алгоритмах пространственно-временной интерполяции данных спутниковых наблюдений. В работе [10] показано, что совместное применение ГИС-технологии и таких моделей позволяет создать новую технологию геоинформационного мониторинга, обладающую функциями структурно-функциональной адаптации совокупности полуэмпирических моделей к обновляемой базе биогеоцено-

ческих данных. Эта технология получила название ГИМС-технологии в соответствии с формулой ГИМС = ГИС+Модель.

ГИМС-технология предлагает сбалансированную схему совместного использования данных наблюдений, алгоритмов пространственно-временной интерполяции, компьютерной картографии и моделей для реконструкции пространственных распределений радиационных характеристик ПРФ с учетом динамики их параметров. На схеме рис. 1 представлена концепция ГИМС-технологии, ориентированная на изучение ослабления ЭВМД растительностью в глобальном масштабе. Поэтому здесь используются полуэмпирические модели ослабления и биогеоценотические модели, базирующиеся на спутниковых измерениях таких характеристик растительности, как NDVI (*normalized difference vegetation index*), PWI (*plant water indexes*), LAI (*the leaf area index*), SRVI (*the simple ratio vegetation index*) и CSI (*the canopy structure index*). В результате удается установить зависимости между показателями ослабления ЭВМД и такими характеристиками растительного покрова, как биомасса и продуктивность. Для лесной растительности предоставляется возможность учета геометрической структуры леса, высоты и плотности полога, его альбедо и влагосодержание.

Количественная информация о ПРФ может быть получена в режиме спутникового мониторинга в трассовом пространстве с помощью устройств оптического, ближнего инфракрасного и микроволнового диапазонов. ГИМС-технология обеспечивает объединение всех потоков данных путем расчета коэффициентов моделей. Датчики микроволнового диапазона поставляют также дан-

ные о содержании влаги в растениях и почве, что позволяет параметризовать водный баланс территории и повысить точность модели биопродуктивности растительного покрова. В результате повышается точность оценки роли растительности в тепловом режиме системы «атмосфера – растительность – почва» [1, 3, 4, 10, 11].

Расчет ослабления ЭВМД растительностью важен для многих прикладных исследований в радиолокации, когда измерения проводятся на трассах земля-земля, земля-атмосфера и атмосфера-земля. ГИМС-технология и развитые биоценоотические модели позволяют осуществить такой расчет в глобальных масштабах с учетом различных классификаций ПРФ. На рис. 2 приведено распределение ПРФ по классификации института географии РАН. В таблице приведен пример расчета ослабления ЭВМД различными типами растительных покровов. При этом предполагалось, что параметр шероховатости полога равен нулю, диэлектрические константы брались из работы [12], высота полога равна  $0,6h$ , где  $h$  – высота растительности данного типа, рассчитанная по модели [13] относительно среднего значения  $h_0 = 25$  м.

Для оценки роли растительности в формировании парникового эффекта используем модель биопродуктивности ПРФ:

$$\frac{\partial B(\varphi, \psi, t, \Xi)}{\partial t} = \Phi(\varphi, \psi, t, \Xi) - T(\varphi, \psi, t, \Xi) - M(\varphi, \psi, t, \Xi), \quad (1)$$

где  $\Phi$  – первичная продукция растений типа  $\Xi$  в момент времени  $t$  в точке с географическими координатами  $\varphi$  и  $\psi$ ,  $T$  и  $M$  – потери биомассы растений в процессе эвапотранспирации и отмирания.

Наземная часть глобальной схемы биогеохимического круговорота углерода представлена на рис. 3. Согласно полуэмпирической модели Селлера и др. [14] связь между поглощением  $\text{CO}_2$  листовой ( $H_{2L}$ ) и сопротивлением листа описывается соотношением:

$$H_{2L} = gc_{AL}/(hpm) - b,$$

где  $m(b) \approx 9(0,01)$  для растений типа  $C_3$  и  $\approx 4(0,04)$  для  $C_4$ ;

$c_{AL}$  – концентрация  $\text{CO}_2$  на поверхности листа;

$p$  – атмосферное давление.

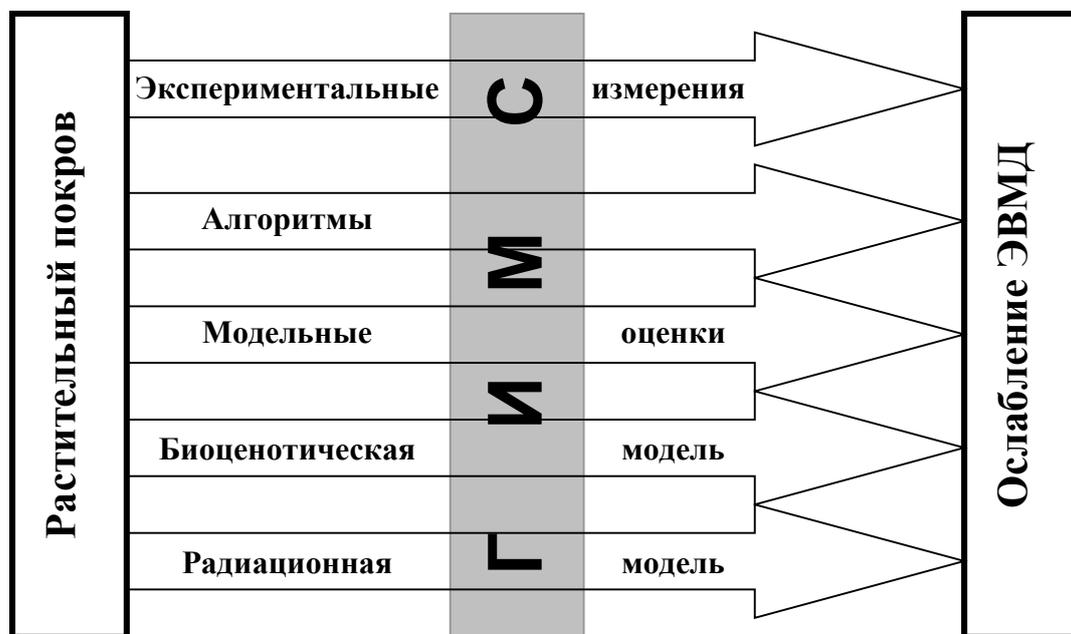


Рис. 1. Схематическое представление структуры ГИМС-технологии в задаче оценки ослабления электромагнитных волн растительностью

Уточнение динамики потоков CO<sub>2</sub> на границе атмосфера – ПРФ зависит от точности расчета доли поглощенной фотосинтетически активной радиации (ФАР). Согласно модели SiB2 [15] достаточно эффективной является параметризация:

$$\text{ФАР}(\Xi) = \sigma \Xi \rho [1 - \exp\{-kL_T / \sigma \Xi\},$$

где  $\sigma \Xi$  – часть площади ячейки рис. 2 под растительностью;

$\rho$  – степень зелености растительного полога;

$L_T$  – интегральное значение LAI;

$k = \text{ФАР}/\Pi$ ;

$\Pi$  – показатель использования ФАР растительным пологом.

Предварительные расчеты выявили, что предложенные здесь уточнения показывают снижение парникового эффекта за счет возрастания объема стока CO<sub>2</sub> на суше. Если в качестве показателя уровня парникового эффекта использовать температуру атмосферы, то согласно Mintzer [17] имеем:

$$\Delta T\Sigma = \Delta T\text{CO}_2 + \Delta T\text{N}_2\text{O} + \Delta T\text{CH}_4 + \Delta T\text{O}_3 + \Delta T\text{CFC}_{11} + \Delta T\text{CFC}_{12},$$

где  $\Delta T\text{CO}_2 = -0,677 + 3,019 \ln[\text{Ca}(t) / \text{Ca}(t_0)]$ ;

$$\Delta T\text{N}_2\text{O} = 0,057 [\text{N}_2\text{O}(t)^{1/2} - \text{N}_2\text{O}(t_0)^{1/2}];$$

$$\Delta T\text{CH}_4 = 0,019 [\text{CH}_4(t)^{1/2} - \text{CH}_4(t_0)^{1/2}];$$

$$\Delta T\text{O}_3 = 0,7 [\text{O}_3(t) - \text{O}_3(t_0)] / 15;$$

$$\Delta T\text{CFC}_{11} = 0,14 [\text{CFC}_{11}(t) - \text{CFC}_{11}(t_0)];$$

$$\Delta T\text{CFC}_{12} = 0,16 [\text{CFC}_{12}(t) - \text{CFC}_{12}(t_0)].$$

Величина  $t_0$  отождествляется с 1980 г., когда концентрации парниковых газов считаются известными. В результате обычно прогнозируемый на 2050 г. интервал потепления из-за парникового эффекта  $1,1^\circ\text{C} \leq \Delta T\Sigma \leq 4,2^\circ\text{C}$  сокращается до  $0,7^\circ\text{C} \leq \Delta T\Sigma \leq 2,3^\circ\text{C}$ . Это говорит о том, что имеется значительный резерв для уточнения оценки парникового эффекта за счет более точной параметризации глобального биогеохимического круговорота парниковых газов. Здесь рассмотрено такое уточнение только для наземной части CO<sub>2</sub>.

Разработанная в Московском государственном университете леса многоканальная волоконно-оптическая измерительная система концентрации различных газов [17] открывает дальнейшую перспективу для уточнения роли растительности в обмене CO<sub>2</sub> на границе атмосфера-суша. Эта система позволяет в реальном времени измерить концентрацию CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub> в пологе растительного покрова, а также температуру и другие параметры энергетического обмена, что существенно упрощает процедуру оценки компонентов правой части уравнения (1).

Т а б л и ц а

**Сезонное распределение средних оценок ослабления (дВ) ЭВМД на длине волны  $\lambda = 27$ . Обозначение:  $\Phi$  – продукция ПРФ (кгС/м<sup>2</sup>/год),  $\Xi$  – идентификатор ПРФ (рис. 2).**

Почвенно-растительная формация	$\Xi$	$\Phi$	Сезон			
			Лето	Осень	Зима	Весна
Северотаежные леса	F	0,54	2,2	2,2	1,9	2,3
Среднетаежные леса	D	0,63	4,1	4,6	3,1	3,7
Южнотаежные леса	G	0,65	4,8	4,2	4,5	4,3
Широколиственные хвойные леса	R	0,87	5,2	5,6	4,1	4,8
Широколиственные леса	+	1,25	6,5	5,1	4,7	5,3
Субтропические широколиственные и хвойные леса	P	1,72	5,9	5,7	4,5	4,7
Влажные вечнозеленые тропические леса	Z	3,17	7,3	7,2	6,2	7,3
Листопадные тропические леса	Y	2,46	6,9	6,7	5,6	6,8
Тропические ксерофитные редколесья	N	1,42	3,7	3,6	3,6	3,7
Субтропические и тропические травяно-древесные заросли тугайского типа	I	1,96	5,4	5,1	5,0	5,2



Таким образом, предложенный подход позволяет в глобальных масштабах рассчитать компоненты радиационного баланса системы атмосфера–растения–почва и тем самым уточнить роль растительных покровов в глобальных изменениях климата. Рассмотренная на схеме рис. 2 классификация ПРФ может быть детализована с учетом мировых баз данных (<http://www.elsevier.com/locate/worldresources>) с более детальным пространственным разрешением. Такие возможности открываются в связи с запуском НАСА космической обсерватории Aqua [18] и планируемых к запуску Европейским космическим агентством и Азиатской ассоциацией дистанционного зондирования спутников с оснащением радиометрами *L*-диапазона .

### Библиографический список

1. Арманд Н.А., Крапивин В.Ф., Мкртчян Ф.А. Методы обработки данных радиофизического исследования окружающей среды. – М.: Наука, 1987.
2. Арманд Н.А., Крапивин В.Ф., Шутко А.М. ГИМС-технология как новый подход к информационному обеспечению изучения окружающей среды // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 1997. – № 3. – С. 31–50.
3. Крапивин В.Ф., Шутко А.М. Исследования в области микроволнового мониторинга земных покровов // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2002. – № 4. – С. 44–53.
4. Крапивин В.Ф., Шутко А.М.Б Иванов Д.С. Новая технология синтеза систем мониторинга окружающей среды // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2002. – № 4. – С. 2–7.
5. Патент на изобретение № 2241217 Многоканальная волоконно-оптическая измерительная система концентрации различных газов. Московский государственный университет леса, 27 ноября 2004 г., Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
6. Чухланцев А.А., Шутко А.М. Микроволновая радиометрия земной поверхности: воздействие растительности // Исследования Земли из космоса. – 1988. – № 2. – С. 67–72.
7. Chukhlantsev A.A., Shutko A.M., and Golovachev S.P. Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100-1000 MHz frequency band. ISTC/IRE Technical Report, #2059-1, 2003, 59 pp.
8. Del Frate F., Ferrazzoli P., and Schiavon G. Retrieving soil moisture and agricultural variables by microwave radiometry using neural networks. Remote Sensing of Environment, 2003, vol. 84, no. 2, pp. 174-183.
9. Ferrazzoli P. and Guerriero L. Passive microwave remote sensing of forests: a model investigation. IEEE Trans. on Geosci. And Remote Sensing, 1996, vol. 34, no. 2, pp. 433-443.
10. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Phillips G.W. Global environmental change: Modeling and Monitoring. Springer, Berlin, 319 pp.
11. Krapivin V.F. and Shutko A.M. Observation and prognosis of the state of environmental resources, ecological and meteorological situations by geoinformational monitoring system. The Fourth Int. Symposium on Okhotsk Sea & Sea Ice. Abstracts. 5-7 February 1989, Mombetsu, Hokkaido, Japan, pp. 1-4.
12. Karam M.A., Fung A.K., Lang R.H., and Chauhan N.S. A microwave scattering model for layered vegetation // IEEE Trans. on Geosci. And Remote Sensing, 1992, 30(4): 767-784.
13. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Varotsos C.A. Global Carbon Cycle and Climate Change. Springer/PRAXIS, Chichester UK, 2003, 368 pp.
14. Sellers P.J., Dickinson R.E., Randall D.A. et al. Modeling the exchange of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. Science, 1997, vol. 275, pp. 502-509.
15. Sellers P.J., Los S.O., Tucker C.J. et al. A revised land surface parametrization (SiB2) for atmospheric GCMs. Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. J. of Climate, 1996, vol.9, no. 4, pp. 706-737.
16. Alexandrov G. and Oikawa T. (2002). TsuBiMo: a biosphere model of the CO<sub>2</sub> – fertilization effect. Climate Res., vol.19, pp. 265-270.
17. Mintzer I.M. A matter of degrees: the potential for controlling the greenhouse effect. World Resources Institute Res. Rep., 1987, no. 15, 70 pp.
18. Friedi M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A.H., Woodcock C.E., Gopal S., Schneider A., Cooper A., Baccini A., Gao F., and Schaaf C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results. Remote Sensing of Environment, 2002, vol. 83, no. 1-2, pp. 287-302.

## ОСНОВАННЫЙ НА ГИМС-ТЕХНОЛОГИИ МЕТОД МИКРОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА РАСТИТЕЛЬНОСТИ

С.П. ГОЛОВACHEV, *ИРЭ*,  
В.Ф. КРАПИВИН, *ИРЭ*,  
А.А. ЧУХЛАНЦЕВ, *ИРЭ*,  
А.М. ШУТКО, *ИРЭ*

В работе проведен анализ состояния исследований в области дистанционного СВЧ радиометрического зондирования почвы и растительности и намечены некоторые перспективы дальнейших исследований в данном направлении. Обобщены результаты теоретических и экспериментальных работ по разработке и верификации моделей СВЧ излучения земной поверхности при наличии растительного покрова. Рассмотрены связь параметров моделей с характеристиками почвы и растительности и определение этих характеристик по данным СВЧ радиометрического зондирования.

Обсуждаются современные достижения в области изучения глобального круговорота углерода с применением методов математического моделирования. Анализируются подходы к синтезу моделей глобального круговорота углерода. Рассматриваются проблемы изменения глобального климата в связи с ростом кон-

центрации углекислого газа в атмосфере и оцениваются вклады наземной биоты и Мирового океана в эти изменения. Предлагается новая концепция глобальных изменений окружающей среды, основанная на интеграции знаний в рамках системы адаптивного геоинформационного мониторинга, в которой микроволновая радиометрия обеспечивает оценку входных характеристик моделей почвенно-растительных формаций с высокой точностью.

Основой синтеза эффективной технологии мониторинга растительности является формула ГИМС = ГИС+модель, где в качестве составляющих выступают компьютерная технология картирования, методика имитационного моделирования, алгоритмы реконструкции двухмерных изображений по отрывочным в пространстве и фрагментарным во времени наблюдениям, эволюционное моделирование и управление базами данных.

## MICROWAVE RADIOMETRY RELATED TO THE SOIL-VEGETATION SYSTEM CONTROL

S.P. GOLOVACHEV, *IRE*,  
V.F. KRAPIVIN, *IRE*,  
A.A. CHUKHLANTSEV, *IRE*,  
A.M. SHUTKO, *IRE*

The solution of the majority of applied problems within global carbon cycle is difficult for the reason that effective methods of control of the *soil-vegetation* system (SVS) are insufficiently developed. During the last few years, the global carbon cycle problem has acquired a special significance because of the greenhouse effect. Knowledge of the state of the SVS al-

lows one to have a real picture of the spatial distribution of the carbon sinks and sources on the Earth's surface.

As is well known, among the types of remote sensing techniques, microwave radiometry proves effective for observations of SVS environmental parameters. However, these observations are a function of different environ-

mental conditions mainly depending on the SVS type. That is why it is necessary to develop data processing methods for microwave monitoring that allow the reconstruction of the SVS characteristics with consideration of the vegetation types and that provide the possibility of synthesizing their spatial distribution.

As is noted in [1], the problem of microwave remote sensing of the vegetation cover requires the study of the attenuation of electromagnetic waves (EMW) within the vegetation layer. The solution of the problems arising here is made possible by the combination of experimental and theoretical studies. The vegetation cover is characterized by varied geometry and additional parameters. Therefore, a knowledge of the radiative characteristics of the SVS as functions of time and spatial coordinates can be acquired by means of a combination of on-site measurements and models. General aspects of such an approach have been considered by many authors [1–6].

One prospective approach to the solution of the problems arising here is GIMS-technology (GIMS = GIS+Model) [4]. A combination of an environmental acquisition system, a model of the functioning of the typical geoecosystem, a computer cartography system, and a means of artificial intelligence will result in the creation of a geoinformation monitoring system for the typical natural element that is capable of solving the many tasks arising in the microwave radiometry of the global vegetation cover. The GIMS-based approach, in the framework of the EMW attenuation by the vegetation canopies, allows the synthesis of a knowledge base that establishes the relationships between the experiments, algorithms and models. The links between these areas have an adaptive character giving an optimal strategy for experimental design and model structure.

The reliability of the assessment of the role of CO<sub>2</sub> in the greenhouse effect formation depends on a detailed consideration of the global biogeochemical carbon cycle dynamics in the models and on the accuracy of the assessment of its characteristics. The accuracy of estimates of carbon fluxes in the terrestrial part

of the biosphere is the function of a detailed quantization of the SVS types and accuracy of the parameterization of the biocenotic processes. In this connection the world map of SVS is given in [4]. An exemplary scheme of carbon flux in this model is characterized in Figure 1 and Table.

The vegetation cover parameters change during the year depending on the weather situation. The specific biomass  $Q_i$  of the  $i$ th type of vegetation at time  $t$  can be parametrized by means of the following equation:

$$\partial Q_i / \partial t = R_i - M_i - E_i,$$

where  $R_i$  is the biomass productivity and  $M_i$  and  $E_i$  are the biomass losses at the expense of withdrawal and transpiration, respectively.

The function  $M_i(\varphi, \psi, t)$  reflects the set of natural  $M_{Ni}$  and anthropogenic  $M_{Ai}$  processes leading to vegetation biomass losses ( $M_i = M_{Ni} + M_{Ai}$ ):

$$M_i(\varphi, \psi, t) = \mu_i(t) Q_i(\varphi, \psi, t),$$

where  $\varphi, \psi$  are the latitude and longitude, respectively.

The flux  $E_i$  is calculated by means of the formula [8]:

$$E_i(\varphi, \psi, t) = \frac{\rho c_p [e^*(T_c) - e_a]}{\gamma_p (r_c + r_b)},$$

where  $e^*(T_c)$  is the saturated vapor pressure inside the canopy foliage (in units of Pa),  $e_a$  is the vapor pressure in the canopy air space (Pa),  $r_c$  is canopy resistance ( $\text{sm}^{-1}$ ),  $r_b$  is the bulk leaf boundary layer resistance of the canopy ( $\text{sm}^{-1}$ ),  $\rho$  is air density ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  $c_p$  is the air specific heat ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) and  $\gamma_p$  is the psychrometric constant ( $\text{Pa} \cdot \text{K}^{-1}$ ).

The actual plant productivity is approximated as follows:

$$R_i = \delta_c^i (1 + \alpha_t^i \cdot \Delta T / 100) \exp(-\beta_i / Q_i) \min\{\delta_e^i, \delta_z^i, \delta_w^i, \delta_b^i\},$$

where  $\alpha_t^i$  and  $\beta_i$  are indices of dependence of production on the temperature variation  $\Delta T$  and biomass  $Q_i$ , respectively;  $\delta_c^i$  is the index of limitation of production by the factor  $\zeta$ :  $e$  = illumination,  $Z$  = pollution,  $W$  = soil moisture,  $B$  = nutrient salts of the soil and  $c$  = atmosphere CO<sub>2</sub> concentration. The  $\delta_c^i$  functions ac-

tually used in the framework of real situations are calculated based on existing or preliminary receiving data. Thus, the role played by the atmospheric CO<sub>2</sub> concentration  $C_A$  in photosynthesis is described by the relation  $\delta_c^i = b_i C_A / (C_A + C_{0.5}^i)$ , where  $C_{0.5}^i$  is the CO<sub>2</sub> concentration for which  $\delta_c^i = b_i / 2$ . The influence of the solar radiation intensity  $e(\varphi, \psi, t)$  on photosynthesis is parametrized by the relation  $\delta_c^i = \delta_i^* \exp(1 - \delta_i^*)$ , where  $\delta_i^* = e / e_i^*$  and  $e_i^*$  is the optimal illuminance for  $i$ th type of plant. A more detailed description of the correlations between the biocenotic processes is given in [4, 6].

Figure 1 represents the World Ocean as a complex hierarchic system. Modelling the organic carbon cycle in this system and *atmosphere-ocean* exchange processes are described by the 3-D model of oceanic ecosystem. Different items of this model were described in the papers [4, 6, 9, 10].

Following Nitu *et al.* [11], by the depth  $z$  the ocean was divided into four basic layers: photic to well-heated depths ( $\Omega_U = U[z_i, z_{i+1}]$ ,  $z_0 = 0$ ;  $i=0, 1, \dots, m-1$ ); intermediate ( $\Omega_P = U[z_i, z_{i+1}]$ ,  $i = m, \dots, m+n-1$ ); deep ( $\Omega_L = U[z_i, z_{i+1}]$ ,  $i = m+n, \dots, m+n+l-1$ ), and bottom  $\Omega_F$ . By the hydro-physico-ecological characteristics the layer  $\Omega_U$  as a function of latitude  $\varphi$ , longitude  $\psi$ , and season  $t$  can be attributed to warm or cold waters, the layer  $\Omega_P$  is photic, but always with low water temperatures, in the layer  $\Omega_L$  the phytoplankton is not produced. Finally, the layer  $\Omega_F$  plays the role of a boundary layer.

The vertical CO<sub>2</sub> transport in the ocean is determined by advective fluxes  $H_{19,ij}^C$  and gravitational sedimentation of dead organic matter (the flux  $H_{20,ij}^C$ ). An advective transport from the  $i$ -th into the  $j$ -th reservoir of the ocean is considered proportional to the concentration of carbon in the respective reservoirs:

$$H_{19,ij}^C = \lambda_{2,ij} C_{a,i} \quad (a = U, P, L),$$

where  $\lambda_{2,ij} = V_{ij} / V_i$ ,  $V_{ij}$  is the water volume transported per unit time from the  $i$ -th reservoir into the  $j$ -th reservoir;  $V_i$  is the volume of the  $i$ -th reservoir.

The following algorithm is used for a parameterization of the process of carbon sedimentation. The flux under unit area of the ocean is supposed to decrease exponentially with depth. If we denote the inflow of organic matter in the  $i$ -th reservoir as  $g_i$  and the net outflow of organic matter from the water surface as  $H_{20,T}$ , we obtain:

$$H_{20,1}^C = H_{20,T}; \quad H_{20,i}^C = g_{i-1} (\sigma_i / \sigma_{i-1}) \exp[-(z_i - z_{i-1}) / D_s], \\ (i = 2, \dots, m + n + l);$$

where  $\sigma_i$  is the area of the  $i$ -th reservoir,  $D_s$  is the characteristic time of the organic matter particles sedimentation before their decomposition. The rate of decomposition in each reservoir is equal to:  $R_{D,i} = H_{20,i}^C - H_{20,i+1}^C$ , ( $i = 1, \dots, m+n+l$ );  $R_{D,F} = H_{20,m+n+l}^C - H_{16}^C$ . However, if the time of the transition of the organic matter particles from one layer to another is short compared to  $D_s$ , then it is better to take  $H_{20,i}^C = \lambda_1 C_{a,i}$ ,  $H_{16,i}^C = \lambda_4 C_{F,i}$ . In addition to these fluxes one should take into account the fluxes of detritus decomposition, solution of bottom sediments, and carbon consumption in the process of photosynthesis:  $H_{17,i}^C = \text{Const.}$ ,  $H_{18,i}^C = \lambda_3 D_{L,i}$ ,  $H_{22,i}^C = \lambda_3 D_{U,i}$ ,  $H_{21,i}^C = C_{31} R_{\Phi,i}$ .

One of the promising results of modelling the effect of «fertilization» due to changing concentrations of atmospheric CO<sub>2</sub> has been discussed by Alexandrov and Oikawa [5] who, based on the TsuBiMo model, obtained a globally-distributed estimate of the contribution of various types of vegetation to the change of CO<sub>2</sub> flux on the «atmosphere-land» interface. To compare this result with the global simulation model (GSM) [6] and mathematical model of biosphere (MMB) [4] data, Figure 2 presents curves of the dependence of net primary production of the surface vegetation on changes of the atmospheric CO<sub>2</sub> partial pressure. The difference between these curves shows that a consideration in GSM and MMB of additional feedbacks compared with a simple TsuBiMo model specifies this dependence and recommends a more thorough structure of the MMB units as the GSM modernized version. Nevertheless, it should be borne in mind that despite an apparent simplicity of the

parametric descriptions assumed in TsuBiMo, the result obtained with its use is reliable due to a detailed description of the spatial structure of vegetation covers (50×50 km).

Therefore, the strategy of the modelling of the global carbon dioxide cycle should fol-

low a paradigm of the complete description of all direct interconnections and feedbacks with the use of a set of functional dependences, the choice among of which is made in the process of an adaptive-evolutionary numerical experiment.

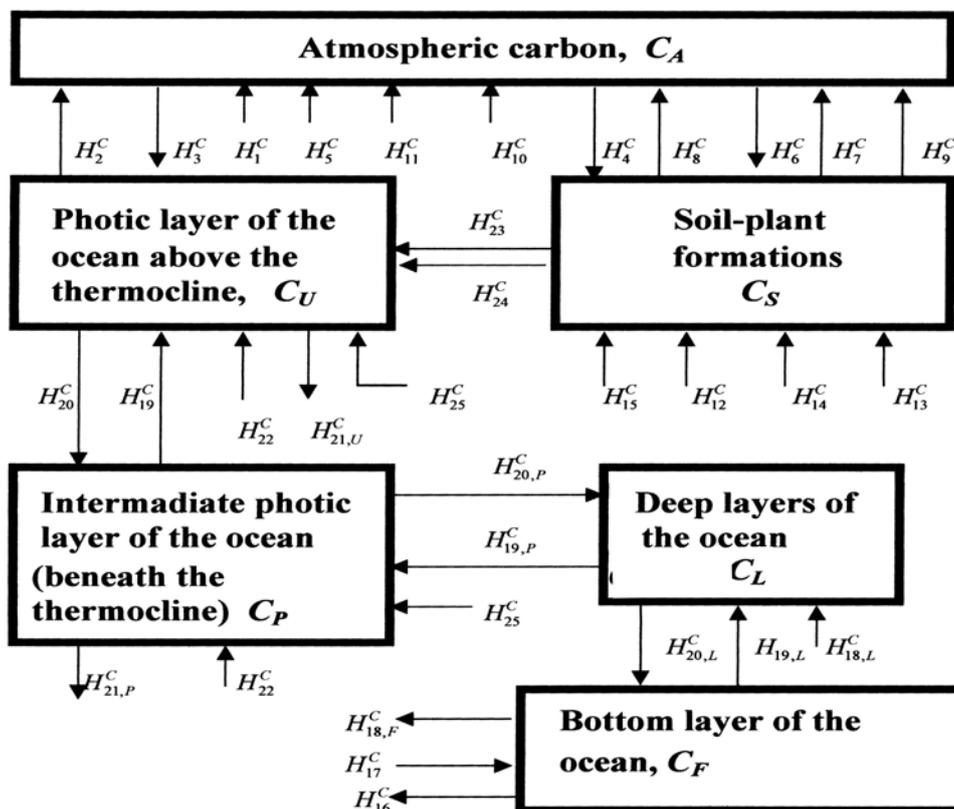


Figure 1. The block diagram of the global biogeochemical cycle of carbon in the *atmosphere-land-ocean* system as the MMB item. The CO<sub>2</sub> reservoirs and fluxes are described in Table

Table

**Carbon flows in the Figure 1**

Flow	Origin of flow	Flow	Origin of flow
$H_1$	Fuel burning	$H_{12}$	People vital functions
$H_2$	Desorption	$H_{13}$	Animal vital functions
$H_3$	Sorption	$H_{14}$	Mortality of plants
$H_4$	Rock erosion	$H_{15}$	Secretion by roots
$H_5$	Volcanic emission	$H_{16}$	Deposition
$H_6$	Photosynthesis in the ocean	$H_{17}$	Ocean depositions dissolving
$H_7$	Respiration of plants	$H_{18}$	Detritus decomposition
$H_8$	Burning of plants	$H_{19}$	Water rising
$H_9$	Decomposition of humus	$H_{20}$	Water descending and sedimentation
$H_{10}$	People activities	$H_{21}$	Photosynthesis on land
$H_{11}$	Vital functions of biota in the ocean	$H_{22}$	River flow

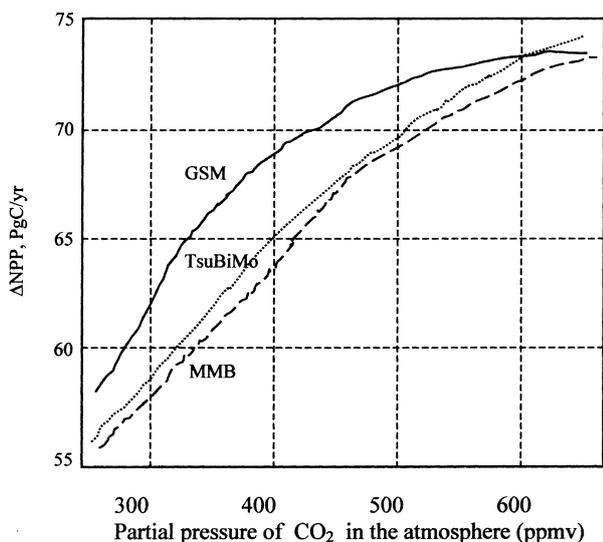


Figure 2. Comparison of three models of the global carbon cycle to assess the response of net primary production of vegetation to changing concentrations of atmospheric CO<sub>2</sub>. Notation: TsuBiMo – Tsukaba Biosphere Model [5]

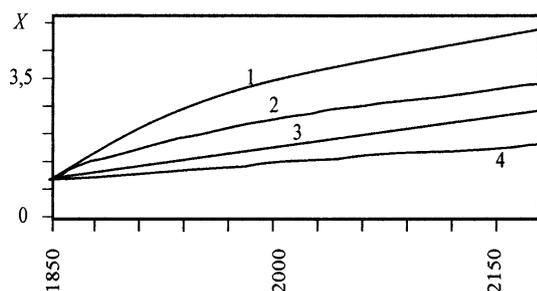


Figure 3. Model results for scenario IS92a with different spatial resolution in the SVS distribution ( $\Delta\phi, \Delta\lambda$ ): 1-(10°, 10°), 2-(7.2°, 9.0°), 3-(4°, 5°), 4-(4°, 5°) with the correction of soil moisture. The ordinate  $X = Ca(t)/Ca(1850)$

Figure 3 shows dependence of atmospheric CO<sub>2</sub> ( $C_a$ ) dynamics on the different spatial resolution for SVS. As we see there exist some reserve in the precision of CO<sub>2</sub> forecasting. Curve 4 was received with additional correction of soil moisture as input data for the MMB item that parametrizes the SVS production as function of CO<sub>2</sub> concentration, soil moisture and temperature [4]. It demonstrates the microwave radiometry role in the increase of precision of vegetation model under the evaluation of CO<sub>2</sub> sinks related to the concrete

spatial resolution. Really a consideration of satellite (for example, from EOS-Aqua) data about soil moisture with spatial resolution 1° × 1° or 0,5° × 0,5° will permit to have more precise estimations for spatial distribution of CO<sub>2</sub> sinks and sources on the land. This study will be possible in the framework of the Global Carbon Project (GCP) [7].

## References

1. Chukhlantsev A.A., Shutko A.M., and Golovachev S.P. Attenuation of electromagnetic waves by vegetation canopies in the 100-1000 MHz frequency band. ISTC/IRE Technical Report, #2059-1, 2003, 59 pp.
2. Ferrazzoli P. and Guerriero L. Passive microwave remote sensing of forests: a model investigation // IEEE Trans. on Geosci. And Remote Sensing, 1996, 34(2): 433-443.
3. Friedl M.A., McIver D.K., Hodges J.C.F., Zhang X.Y., Muchoney D., Strahler A.H., Woodcock C.E., Gopal S., Schneider A., Cooper A., Baccini A., Gao F., and Schaaf C. Global land cover mapping from MODIS: algorithms and early results // Remote Sensing of Environment, 2002, 83(1-2): 287-302.
4. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., Savinykh V.P., and Varotsos C.A. Global Ecodynamics: A Multidimensional Analysis. Springer/PRAxis, Chichester U.K., 2004, 658 pp.
5. Alexandrov G., Oikawa T. TsuBiMo: a biosphere model of the CO<sub>2</sub> – fertilization effect // Climate Res., 2002, 19: 265-270.
6. Kondratyev K.Ya., Krapivin V.F., and Phillips G.W. Global environmental change: Modelling and Monitoring, Springer, Berlin, 2002, 319 pp.
7. Canadel J.G., Dickinson R., Hibbard K., Raupach M., and Young O. (eds.). Global Carbon Project: The Science Framework and Implementation. GCP Report No.1, Earth System Science Partnership, Canberra, 69 pp.
8. Sellers P.J., Bounoua L., Collatz G.L., Randall D.A., Dazlich D.A., Los S.O., Berry J.A., Fung I., Tucker C. J., Field C. B., and Jensen T. G. Comparison of radiative and physiological effects of doubled atmospheric CO<sub>2</sub> on climate // Science, 1996, 271: 1402-1406.
9. Nefedova E. I., Tarko A. M. Study of the global carbon cycle using the zonal model in the atmosphere-ocean system. Proc. of Russian Ac. Sci., 1993, 333(5): 645-647 (in Russian).
10. Alexeev V. V., Zaitsev S. I., Kokorin A. O. The growth of the rate of the atmosphere-ocean gas exchange in case of rough sea. Bull. of the USSR Acad. Sci., FAO, 1990, 26(3): 322-325 (in Russian).
11. Nitu C., Krapivin V.F., and Pruteanu E. Intelligent Systems in Ecology. Onesti, Bucharest, Rumania, 2004, 410 pp.

## О СВОЙСТВАХ КОДИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ТУРБОПРОИЗВЕДЕНИЙ

Е.В. СТУПАЧЕНКО, МГУ

Проблема защиты данных от помех при передаче по каналу связи – одна из важнейших проблем кодирования. В мире придумано и используется очень много различных вариантов кодирования. Предпочтение тому или иному кодексу отдается исходя из многих факторов (шум в канале, скорость передачи, способ передачи, тип передаваемых данных и т.д.). Интегрального улучшения в кодировании достичь практически невозможно. Но для каждой конкретной задачи придумывают новые кодеки, и здесь остановки в развитии теории помехоустойчивого кодирования, похоже, не будет. В нынешнее время популярными стали варианты кодирования с мягкими входами, т.е. когда на вход кодеру дается не только информация, но и правдоподобие этой информации. Наилучшие результаты (по скорости передачи данных) при таком подходе показывает турбокодирование, основанное на производстве кодов Хемминга и кодов с битами четности, при аддитивном белом гауссовском шуме (АБГШ) в канале.

В данной работе рассмотрены известные варианты различных турбокодов (произведение кодов с битами четности, кодов Хемминга). Приведено их подробное описание с теоретическими обоснованиями. Также описан новый вариант турбокодирования (произведение кодов Рида-Соломона), рассмотрено его поведение в различных каналах битовой модуляции при различных шумах.

Целью работы ставилось исследование различных вариантов турбокодирования, анализ возможности и целесообразности применения турбокодирования как произведения кодов Рида-Соломона, сравнение и анализ результатов применения различных кодеров при различных скоростях передачи,

шумах в канале. Также целью работы ставилось получение необходимых оценок по времени работы и используемой памяти рассмотренных алгоритмов кодирования.

В качестве сравнения были рассмотрены результаты разработчиков *comtech* ANA corporation. Ими был разработан чип 4540 *Astro* ОС-3, осуществляющий кодирование/декодирование различных турбопроизведений кодов Хемминга и кодов с битами четности. Работа выполнена на кафедре МАТИС МГУ под руководством Носова В.А.

### 1. Обзор результатов

1. В параграфе 2 «Общая схема кодирования на основе турбопроизведений» описаны известные алгоритмы турбокодирования. Приведена теорема об условиях для выбора кодов в турбопроизведении. Приведены временные оценки алгоритма кодирования.

2. В параграфе 3 «Турбопроизведение кодов Рида-Соломона» рассмотрены алгоритмы кодирования и декодирования произведения кодов Рида-Соломона. Приведены временные оценки алгоритма декодирования. Приведена модернизация алгоритма Чейса, декодирования турбокодов, применимая к кодам Рида-Соломона.

3. В параграфе 4 «Результаты тестирования» приведены результаты тестирования для кодов Рида-Соломона, турбопроизведения расширенных кодов Хемминга, турбопроизведения кодов с битом четности, турбопроизведения расширенных кодов Рида-Соломона, турбопроизведения расширенного кода Хемминга и расширенного кода Рида-Соломона. Все тестирования проводили в канале с гауссовским шумом при однобитовой модуляции, сочетая мягкие и жест-

кие метрики. Приведены выводы по тестированиям, показывающие согласованность работы описанных алгоритмов с алгоритмами, разработанными АНА corporation. Также в выводах показана целесообразность применения произведения кодов Рида-Соломона.

## 2. Общая схема кодирования на основе турбопроизведений

### 2.1 Введение

В данном разделе описана общая схема турбопроизведения линейных кодов. Приведены обоснования алгоритмов, требуемые теоремы.

### 2.2 Произведение линейных кодов

#### 2.2.1 Кодирование



Рис. 1

Для простоты рассматривается произведение двух двоично-линейных кодов  $(n1, k1, m1)$  и  $(n2, k2, m2)$ . Где  $n1$  и  $n2$  длины кодовых слов в символах,  $k1$  и  $k2$  количество информационных символов, а  $m1$  и  $m2$  длины символа в битах. Данные кодируются горизонтальным (1) и вертикальным (2) кодом, как показано на рис. 1. Таким образом, получаются горизонтальные и вертикальные проверочные символы. Для того чтобы получить «проверочные от проверочных», используется один код (обычно горизонтальный (1)). Произведение двух кодов назовем матрицей турбокода.

## Теорема

Для двоично-линейных кодов «проверочные от проверочных» символы будут одинаковы независимо от того, будет ли применяться горизонтальный код или вертикальный.

### Доказательство

Пусть есть два двоично-линейных кода с функциями кодирования  $f_1$  и  $f_2$ . Линейность кодов означает линейность функций кодирования, т.е. если  $f_1: A^{k1} \rightarrow A^{n1-k1}$ , то  $f_1(x \wedge y) = f_1(x) \wedge f_1(y)$ , где  $\wedge$  XOR (исключающее или), а  $A = E^{m1}$  набор двоичных слов длины  $m1$ . Из линейности  $f_1$  следует, что  $f_1(0) = 0$ , т.к.  $f_1(0) = f_1(x \wedge x) = f_1(x) \wedge f_1(x) = 0$ . Поэтому достаточно доказать теорему для базисных векторов  $(0...010...0)$  с единицей на  $i$ -ой позиции и далее воспользоваться линейностью кодов и индуктивной базой для данных из нулей (для данных из одних нулей теорема, очевидно, верна). Пусть  $r1 = n1 - k1, r2 = n2 - k2$ .

1	0	...	0	$a_1$	...	$a_{r1}$
0	0	...	0	0	...	0
...	...	...	...	...	...	...
0	0	...	0	0	...	0
$b_1$	0	...	0	$a_1 * b_1$	...	$a_{r1} * b_1$
...	...	...	...	...	...	...
$b_{r2}$	0	...	0	$a_1 * b_{r2}$	...	$a_{r1} * b_{r2}$

$$f_1(10...0) = \bar{a} = a_1...a_{r1};$$

$$f_2(10...0) = \bar{b} = b_1...b_{r2}.$$

Аргументы у  $f_1$  и  $f_2$  разной длины  $k1$  и  $k2$  соответственно. Каждое  $a_i$  и  $b_i \in \{0, 1\}$ , т.е.  $f_2(a_i 0...0) = 0...0$  если  $a_i = 0$  и  $b_1...b_{r2}$  если  $a_i = 1$ . Или в общем случае  $f_2(a_i 0...0) = b_1 * a_i...b_{r2} * a_i$ , т.е. при вертикальном (2) кодировании получится матрица

$$\begin{pmatrix} b_1 * a_1 & \dots & b_{r2} * a_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ b_{r2} * a_1 & \dots & b_{r2} * a_{r1} \end{pmatrix},$$

а при горизонтальном (1),

где  $f_1(b_i 0...0) = a_1 * b_i...a_{r1} * b_i$ :

$$\begin{pmatrix} a_1 * b_1 & \dots & a_{r_1} * b_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ a_1 * b_{r_2} & \dots & a_{r_1} * b_{r_2} \end{pmatrix}.$$

В силу коммутативности умножения в поле  $\{0, 1\}$  полученные матрицы одинаковы. Ясно, что от перестановки столбцов и строк суть доказательства не поменяется, поэтому доказательство обобщается на любой вектор  $(0 \dots 010 \dots 0)$ , т.е. теорема доказана. Ч.Т.Д.

### 2.2.2. Некоторые свойства турбокодов

Степень кодирования:

$$r = \frac{k1 * k2}{n1 * n2}.$$

Кодовое расстояние:

$$d = d1 * d2.$$

*Скорость кодирования*

Рассматривается вариант, когда горизонтальный и вертикальный коды совпадают. Длина кодового слова  $n$ , степень кодирования  $r$ , длина символа в битах  $m$ . Пусть алгоритмическая сложность этого (вертикального или горизонтального) кодирования есть  $C(n, r)$ . Тогда сложность турбокодирования будет

$$St(n, r, m) = m * n * (1 + r) * C(n, r).$$

При фиксированных  $m$  и  $r$  сложность турбокодирования  $St(n, r, m) = St(n)$  будет асимптотически меньше, чем сложность аналогичного по длине кодового слова и степени кодирования  $C(n^2)$ , когда  $C(n)$  порядка  $n^{1+\epsilon}$ ,  $\forall \epsilon > 0$ , т.е. применение турбоко-

дирования для увеличения скорости кодирования эффективно, если  $C(n) \sim n^{1+\epsilon}$ ,  $\forall \epsilon > 0$ .

Другие свойства будут рассмотрены позже.

### 2.2.3 Декодирование

Декодирование осуществляется исходя из мягких метрик, то есть исходя не только из переданного бита данных, но и его правдоподобия (при жестких метриках это правдоподобие у всех бит совпадает).

#### 2.2.3.1 Создание мягких метрик по принятому сигналу

Будем рассматривать следующий тип модуляции (рис. 2):

–  $X$  – вектор битовых данных.

– Преобразователь данных в сигнал переводит «0» в  $-1$ , «1» в  $+1$ .

Шум в канале считаем гауссовским с математическим ожиданием 0 и дисперсией  $\sigma^2$  ( $N(0, \sigma^2)$ ), т.е. в канале к вектору сигнала добавляется случайный вектор, каждый компонент которого распределен по гауссу  $N(0, \sigma^2)$ . Часто такие помехи в канале называют аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ).

– Преобразователь сигнала в данные переводит сигнал в зависимости от знака в «0» или «1» и сообщает декодеру правдоподобие каждого бита (в жесткой схеме такого правдоподобия нет).

–  $D(Y, Pr)$  – снова битовые данные.



Рис. 2

Описанную модуляцию часто используют в каналах связи. Возможны и другие типы модуляции, когда преобразуются не биты, а символы, состоящие из нескольких бит.

На вход декодеру в качестве правдоподобия бита подается модуль значения сигнала  $|S_j|$ . Это обуславливается следующими выкладками:

Пусть  $\bar{s} \in R^n$  – вектор (столбец или строка матрицы турбокода), принятый декодером,  $\bar{e} \in \{0,1\}$  – исходный вектор сообщения, а  $\bar{n}$  – вектор шума. Тогда  $s_i = e_j + n_j$ , где предполагается, что  $n_j \sim N(0, \sigma^2)$ .

Лучшим решением преобразователя будет вектор  $\bar{y} = \text{sgn}(\bar{s}) \in \{0,1\}$  (если какое-то  $s_j \neq 0$ , то  $y_j = +1$ ).

Теперь встает вопрос, что считать правдоподобием  $y_j$ . За правдоподобие примем логарифм отношения правдоподобий.

$$\Lambda(y_j) = \left| \log \frac{P(e_j = +1 | s_j)}{P(e_j = -1 | s_j)} \right|.$$

Используя формулу Байеса, получим:

$$\begin{aligned} P(e_j = +1 | s_j) &= \frac{P(e_j = +1, S_j = s_j)}{P(S_j = s_j)} = \\ &= \frac{P(s_j | e_j = +1) * P(e_j = +1)}{P(S_j = s_j)} = \\ &= \frac{P(s_j | e_j = +1) * \frac{1}{2}}{P(S_j = s_j | e_j = +1) * \frac{1}{2} + P(S_j = s_j | e_j = -1) * \frac{1}{2}} = \\ &= \frac{\Phi\left(\frac{s_j - 1}{\sigma}\right)}{\Phi\left(\frac{s_j - 1}{\sigma}\right) + \Phi\left(\frac{s_j + 1}{\sigma}\right)}, \end{aligned}$$

где  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2 * \pi}} * e^{-\frac{x^2}{2}}$ .

Тогда получаем  $\Lambda(y_j) = \frac{2}{\sigma^2} * |s_j|$ . Здесь принимаем  $\sigma^2 = 2$ , фактически умножая принятый сигнал на  $\frac{\sigma^2}{2}$ . При декодировании это будет учтено.

### 2.2.3.2 Декодирование строчки/столбца

Для декодирования используется алгоритм Чейса (D. Chase):

1) фиксируется некоторое число  $P \geq d - 1$ , где  $d$  кодовое расстояние (чем больше  $P$ , тем лучше декодирование);

2) далее ищутся те биты, у которых правдоподобие наименьшее по модулю, и создается массив  $Q$  из  $2^P$  слов, где на местах «слабо правдоподобных» битов ставится все возможные комбинации из 0 и 1;

3) массив декодируется по жесткой схеме, и каждый бит слова массива преобразуется в сигнал ( $0 \rightarrow -1, 1 \rightarrow 1$ );

4) ищется слово  $\bar{z}$  из  $Q$ , которое ближе всего (в евклидовой метрике) к принятой строчке/столбцу  $\bar{s}$ , это слово и есть результат декодирования;

5) далее для каждого  $j$ -ого бита определяется новое правдоподобие. В массиве ищется слово  $\bar{z}'$ , у которого  $j$ -ый бит отличается от  $j$ -ого бита слова  $\bar{z}$ , и оно ближе всего к  $\bar{s}$ . Если такого слова нет, то правдоподобие считается равным 1. Иначе оно равно

$$\frac{\|\bar{s} - \bar{z}'\|^2 - \|\bar{s} - \bar{z}\|^2}{4}.$$

Такой алгоритм декодирования обуславливается следующими выкладками:

Определим  $Q_j^+ = \{\bar{q}_{j,1}^+, \bar{q}_{j,2}^+, \dots\}$  как подмножество множества всех кодовых слов, где на месте каждого  $j$ -ого бита стоит «+1», а  $Q_j^- = \{\bar{q}_{j,1}^-, \bar{q}_{j,2}^-, \dots\}$  как подмножество множества всех кодовых слов, где на месте каждого  $j$ -ого бита стоит «-1». Тогда

$$P(e_j = +1 | \bar{s}) = \sum_{q \in Q_j^+} P(\bar{e} = \bar{q} | \bar{s}),$$

$$P(e_j = -1 | \bar{s}) = \sum_{q \in Q_j^-} P(\bar{e} = \bar{q} | \bar{s}),$$

и, пользуясь правилом Байеса,

$$P(\bar{e} = \bar{q} | \bar{s}) = \frac{P(\bar{s} | \bar{e} = \bar{q}) * P(\bar{e} = \bar{q})}{P(\bar{s})},$$

получим

$$P(e_j = +1 | \bar{s}) = \frac{1}{P(\bar{s})} * \sum_{q \in Q_j^+} P(\bar{s} | \bar{e} = \bar{q}) * P(\bar{e} = \bar{q}),$$

$$P(e_j = -1 | \bar{s}) = \frac{1}{P(\bar{s})} * \sum_{q \in Q_j^-} P(\bar{s} | \bar{e} = \bar{q}) * P(\bar{e} = \bar{q}).$$

При равной вероятности появления каждого кодового слова ( $P(\bar{e} = \bar{q}) = const$ ) и, учитывая, что

$$P(\bar{s} | \bar{e} = \bar{q}) = \Phi\left(\frac{s_1 - q_1}{\sigma}\right) * \dots * \Phi\left(\frac{s_n - q_n}{\sigma}\right) = \left(\frac{1}{\sqrt{2 * \pi * \sigma}}\right)^n * e^{-\frac{\|\bar{s} - \bar{q}\|^2}{2 * \sigma^2}},$$

имеем

$$\Lambda(z_j) = \left| \log \frac{P(e_j = +1 | s_j)}{P(e_j = -1 | s_j)} \right| = \left| \log \frac{\sum_{q \in Q_j^+} P(\bar{s} | \bar{e} = \bar{q})}{\sum_{q \in Q_j^-} P(\bar{s} | \bar{e} = \bar{q})} \right| = \left| \log \frac{\sum_{q \in Q_j^+} e^{-\frac{\|\bar{s} - \bar{q}\|^2}{2 * \sigma^2}}}{\sum_{q \in Q_j^-} e^{-\frac{\|\bar{s} - \bar{q}\|^2}{2 * \sigma^2}}} \right| \approx \left| \log \frac{e^{-\frac{\|\bar{s} - \bar{q}_j^+\|^2}{2 * \sigma^2}}}{e^{-\frac{\|\bar{s} - \bar{q}_j^-\|^2}{2 * \sigma^2}}} \right| = \frac{1}{2 * \sigma^2} * \left| \|\bar{s} - \bar{q}_j^+\|^2 - \|\bar{s} - \bar{q}_j^-\|^2 \right|,$$

где  $\bar{q}_j^+$  и  $\bar{q}_j^-$  наиболее близкие в евклидовой метрике к  $\bar{s}$ .

Очевидно, одно из них и есть  $\bar{z}$ , а другое  $\bar{z}'$ , наиболее близкое в евклидовой метрике к  $\bar{s}$ , у которого на месте  $j$ -ого бита стоит бит, противоположный  $j$ -ому биту  $\bar{z}$ . Остальные экспоненты незначительны. Теперь умножая правдоподобие  $\Lambda(z_j)$  на  $\frac{\sigma^2}{2}$  или полагая  $\sigma^2 = 2$ , получим

$$\Lambda(z_j) = \frac{1}{4} * \left| \|\bar{s} - \bar{z}\|^2 - \|\bar{s} - \bar{z}'\|^2 \right|.$$

### 2.2.4 Пример применения алгоритма Чейса

Рассмотрим кодирование Хемминга с проверочной матрицей:

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Пусть требуется передать кодовое слово  $c = 0100101$ . Для передачи через канал оно преобразуется в  $C = (-1, 1, -1, -1, 1, -1, 1)$ , и в канале к нему прибавляется вектор шума

$E = (+1, 2, -0, 1, +0, 2, +0, 3, +0, 2, -0, 9, -1, 1)$ , тогда принятое слово будет  $W = C + E = (0, 2, 0, 9, -0, 8, -0, 7, 1, 2, -1, 9, -0, 1)$ .

Если декодировать слово  $W$ , используя жесткие метрики, то получим, что  $W \rightarrow w = 1100100$  имеет ошибку в  $H * w = 110 = 6$  бите. То есть алгоритм декодирования выдаст слово 1100110, а значит, неверный результат.

Теперь же рассмотрим на этом примере работу алгоритма Чейса.

1. Положим  $P = 2 \geq d - 1$  (для кода Хемминга кодовое расстояние  $d = 3$ ).

2. Наименьшее, по модулю, правдоподобие в слове  $w$  у 1-го (0,2) и 7-го (-0,1) битов. Создаем массив из  $2^P = 4$  элементов:

$$Q = \left\{ \begin{array}{l} 0 \ 10010 \ 0 \\ 0 \ 10010 \ 1 \\ 1 \ 10010 \ 0 = w \\ 1 \ 10010 \ 1 \end{array} \right\}$$

3. Декодируем  $Q$  по жесткой схеме:

$$Q = \left\{ \begin{array}{l} 0100101 \text{ (исправлен 7-ой бит)} \\ 0100101 \text{ (кодовое слово)} \\ 1100110 \text{ (исправлен 6-ой бит)} \\ 0100101 \text{ (исправлен 1-ый бит)} \end{array} \right\}$$

$Q \rightarrow \{(-1, 1, -1, -1, 1, -1, 1), (-1, 1, -1, -1, 1, -1, 1), (-1, 1, -1, -1, 1, -1, 1), (-1, 1, -1, -1, 1, -1, 1)\}$ .

4. Итак,  $Q = \{(-1, 1, -1, -1, 1, -1, 1), (-1, 1, -1, -1, 1, -1, 1)\} = \{Q_1, Q_2\}$  (2 других элемента массива совпадают с первым, поэтому писать не имеет смысла). Расстояние в евклидовой метрике  $\|W - Q_1\|^2 = 3,64$ ,  $\|W - Q_2\|^2 = 10,04$ , а значит, декодированным словом будет  $q_1 = 0100101$  (что совпадает с передаваемым словом). Новое правдоподобие для 1-го и 7-го битов будет

$$\frac{1}{4} * |3.64 - 10.04| \approx 1.9,$$

а для остальных бит 1.

Таким образом, в силу того, что  $Q_1$  достаточно близко к  $W$ , а другие слова достаточно далеко, декодер уверенно (с правдоподобием 1.9) декодировал два сомнительных бита.

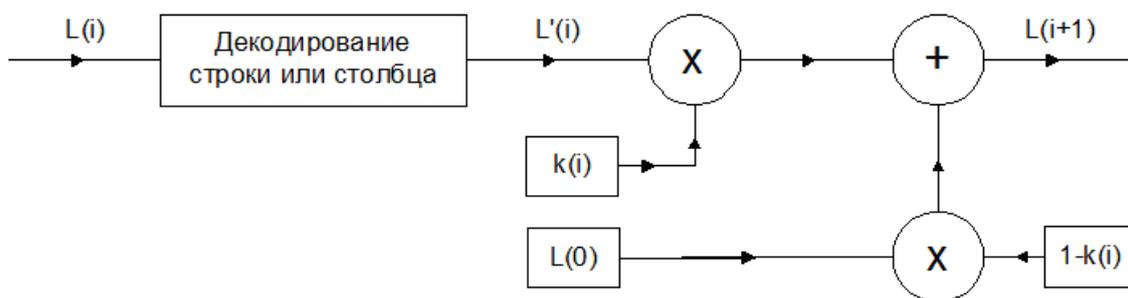


Рис. 3 Здесь  $L(i)$  – матрица правдоподобия после  $i$ -й итерации,  $L(0)$  – матрица канального правдоподобия,  $k(i)$  – некоторая весовая функция

### 2.2.5 Возможности по улучшению декодирования

Таким образом, при декодировании результаты канального правдоподобия используются неоднократно. Выбор функции  $k(i)$ , вообще говоря, не определен, но логичнее выбирать ее так, чтобы она возрастала. Так, чтобы вначале канальное правдоподобие сильно влияло на декодирование, а затем слабее и слабее. Кроме того,  $0 < k(i) \leq 1$ .

## 3. Турбопроизведение кодов Рида-Соломона

### 3.1 Произведение кодов Рида-Соломона

В силу того что коды Рида-Соломона являются двоично-линейными, для них проходит указанная выше схема произведения двух кодов. Мы рассмотрим это кодирование на примере произведения двух одинаковых расширенных кодов Рида-Соломона  $(16, 13) \times (16, 13)$ . Код Рида-Соломона  $(16, 13)$  есть расширенный одним символом четности код  $(15, 13)$  с символами по 4 бита, двумя проверочными символами, исправляющий одну символьную ошибку или две с указанием обеих позиций. Еще один проверочный символ (символ четности) добавляется для увеличения кодового расстояния. Также получают более удобные для ЭВМ битовые размеры.

### 3.2 Характеристики кода

Полученный турбокод имеет кодовое расстояние (в символах) равное  $3 * 3 = 9$ . Если взять аналогичный по длине кода, символа и степени кодирования усеченный код

Рида-Соломона  $(256, 170)$  с 16-битными символами, то его кодовое расстояние будет 87. Возникает вопрос: «Чем же так хорош полученный турбокод? Да и хорош ли вообще?» Кодовое расстояние характеризует способность кода к восстановлению ошибок. При кодовом расстоянии 87 код  $(256, 170)$  исправляет любые  $(87 - 1) / 2 = 43$  символа. Турбокод может восстанавливать только любые  $(9 - 1) / 2 = 4$  символа. Однако при определенном расположении испорченных символов восстанавливающая способность турбокода возрастает до 31 символа, что все равно меньше, чем 41. Что касается битового расстояния, то и тут турбокод отстает (минимальное 16 против 630, среднее 54,5 против 689,2). Это указывает на большое количество слов, которые турбокод вообще никак не распознает. Однако, несмотря на все эти громадные проигрыши, результаты тестирования показывают, что турбокод и не собирается отставать от аналогичного кода Рида-Соломона по количеству исправленных ошибок. А при передаче мягких метрик в канале с АБГШ дает существенный выигрыш. Такие результаты получаются за счет итеративности кодирования.

### 3.3 Кодирование и декодирование

Сложность кодирования кодов Рида-Соломона [4]  $(n - k) * k = n^2 * r * (1 - r)$  символьных операций сложения + умножения, где  $n$  – длина кодового слова в символах,  $k$  – количество информационных символов, а  $r$  – степень кодирования.

Сложность декодирования кодов Рида-Соломона при использовании алгоритма

Берлекэмпа-Мэсси [4] составляет  $4.5 * n * (n - k) + 5 * (n - k)^2 = 4.5 * n^2 * (1 - r) + 5 * n^2 * (1 - r)^2$  операций умножения + сложения.

Кодирование и декодирование осуществляются по общей схеме. Об оценках времени на кодирование было сказано выше, здесь турбокодирование дает существенный выигрыш в силу того, что кодирование Рида-Соломона занимает по времени  $n^2 * r * (1 - r)$ , т.е. кодирование всей матрицы займет  $m * n * (1 + r) * n^2 * r * (1 - r) = m * n^3 * r * (1 - r^2)$ , в то время как для аналогичного кода Рида-Соломона это время будет  $m * n^4 * r^2 * (1 - r^2)$ , т.е. в  $n * r = k$  раз медленнее (в рассматриваемом случае в 13 раз медленнее). Что касается декодирования, то тут на турбокод влияют такие константы, как количество итераций –  $I$  и количество битов (символов), подвергающихся сомнению в алгоритме Чейса –  $P$ . Пусть на декодирование строки/столбца тратится  $D(n, r)$  операции, с использованием алгоритма Чейса  $2^P * D(n, r)$ . На  $I$  итераций декодирования потребуется  $I * m * n * (1 + r) * 2^P * D(n, r)$ . В нашем случае  $D(n, r) = 4,5 * n^2 * (1 - r) + 5 * n^2 * (1 - r)^2 = n^2 * (1 - r) * (9,5 - 2,5 * r)$ , т.е. для кода с параметрами  $n^2$  и  $r^2$  и теми же операциями умножения и сложения  $D(n^2, r^2) = m * n^4 * (1 - r^2) * (9,5 - 5 * r^2)$ , т.е. быстродействие турбокода отличается от аналогичного кода Рида-Соломона в  $n * (9,5 - 5 * r^2) / (9,5 - 5 * r) / I / 2^P$  раз (в нашем случае в  $20 / I / 2^P$ ). Для хорошего декодирования  $I = 8$ ,  $P = 4$ , т.е. турбокод в 6 раз медленнее.

### 3.4 Модернизация алгоритма Чейса

В алгоритме Чейса используется создание массива из  $2^P$  элементов. Этот массив создается следующим образом:

1) в принятом слове ищутся  $P$  битов с наименьшим правдоподобием;

2) на месте каждого такого бита ставится 0 и 1, таким образом, получается ровно  $2^P$  слов;

3) каждое такое слово декодируется по жесткой схеме;

4) и т. д. алгоритм описан полностью в главе «Декодирование строки/столбца».

Суть в том, что алгоритм работает с массивом экспоненциального размера и при этом на его создание и поиск в нем тратится экспоненциальное время, что неприемлемо для работы с большими  $P$ .

В алгоритме Чейса «сомнению» подвергаются биты. Модернизация, а точнее, некоторая адаптация к кодированию Рида-Соломона заключается в том, что сомнению начинают подвергаться символы. Более того, сомнительные символы считаются стертыми. Итак, модернизированный алгоритм выглядит так:

1) в принятом слове ищутся  $P \geq n * (1 - r)$  символов с наименьшим правдоподобием (правдоподобие символа можно, например, считать как минимум из правдоподобия всех бит символа

$$\|\bar{s} = \min(|s_1|, \dots, |s_m|)\|;$$

2) исходя из того, что код Рида-Соломона может восстановить  $2 * t$  стирания, создаем массив из  $C_p^{n(1-r)} + 1$  элементов, где восстанавливаем все возможные сочетания  $n * (1 - r)$  из  $P$  символов и еще один элемент массива – слово восстановленное без стирания;

3) далее, как и раньше, определяется новое правдоподобие каждого бита.

А значит, сложность алгоритма декодирования будет уже  $I * m * n * (1 + r) * C_p^{n(1-r)} * D(n, r) + I * m * n * (1 + r) * D(n, r)$ . Причем  $D(n, r) = D(n, r) - 1.5 * n^2 * (1 - r) - 4 * n^2 * (1 - r)^2 = 3 * n^2 * (1 - r) + n^2 * (1 - r)^2 = n^2 * (1 - r) * (4 - r)$ , так как если в алгоритме декодирования кодов Рида-Соломона известны все позиции ошибок, то алгоритм Берлекэмпа-Мэсси и алгоритм вычисления позиций ошибок в схеме декодирования не нужны [4]. Теперь в сложности декодирования вместо экспоненциального члена  $2^P$  стоит полиномиальный член  $C_p^{n(1-r)}$ . А значит, модернизированный алгоритм даже при очень больших  $P$  (для декодирования по алгоритму Чейса слова кода Рида-Соломона (256, 170) с 16-битными символами требуется  $P$  порядка 100, и понятно, что создать массив из  $2^{100}$  элементов нереально) сможет работать реальное время.

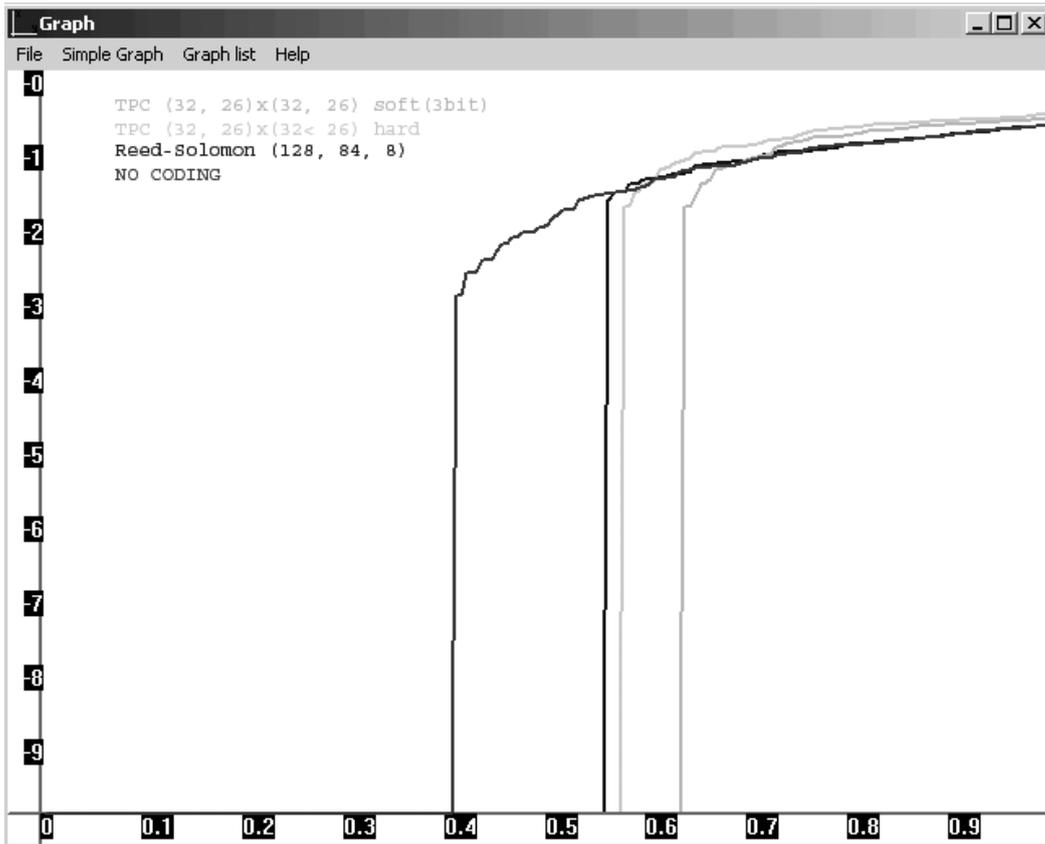


Рис. 4

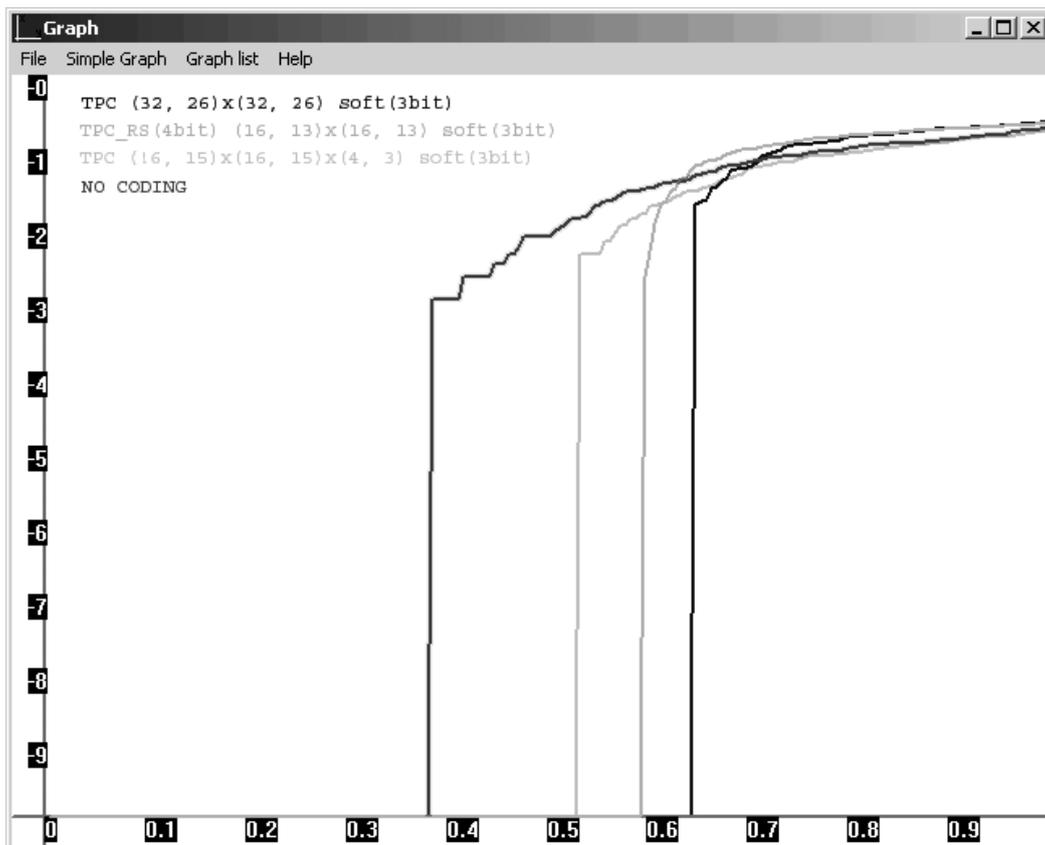


Рис. 5

#### 4. Результаты тестирования

На графике (рис. 4) показаны результаты тестирования в канале с гауссовским шумом 8-миитеративного турбокодирования на основе расширенных кодов Хемминга и кодов Рида-Соломона. На графике зависимость по оси абсцисс дисперсия гауссовского шума, по оси ординат логарифмическая (10-ый логарифм) шкала вероятности появления ошибочного бита.

На графике (рис. 4) видно, что в канале с гауссовским шумом при одноканальной модуляции даже жесткая схема турбокодирования, основанная на произведении расширенных кодов Хемминга  $(32, 26) \times (32, 26)$  (размер блока 1024, степень кодирования 0,676), обладает лучшей исправляющей способностью, чем аналогичный (по размеру блока и степени кодирования) код Рида-Соломона  $(128, 84, 8)$ .

На графике (рис. 5) показаны результаты тестирования в канале с гауссовским шумом различных 8-миитеративных вариантов турбокодирования, в том числе (второй справа) график, отражающий работу турбокодирования на основе кодов Рида-Соломона. Декодирование всех турбокодов на основе алгоритма Чейса.

На графике (рис. 5) видно, что турбокодирование на основе произведения расши-

ренных кодов Рида-Соломона  $(16, 13) \times (16, 13)$  (размер блока 4096, степень кодирования 0,676) несколько отстает от произведения кодов Хемминга с аналогичной степенью кодирования. Но коды Рида-Соломона способны также исправлять и пакетные ошибки, кроме того, при заданном блоке размере блока обеспечивают более широкий спектр степеней кодирования.

Тесты турбопроизведения кода Рида-Соломона  $(16, 11, 4)$ , расширенного одним символом четности, и кода Хемминга  $(32, 26, 1)$ , расширенного одним битом четности. Размер блока 1124. В канале гауссовский шум с дисперсией 0,71. Декодеру передаются мягкие метрики (3 бита). Справа показано количество итераций (0 итераций отсутствие кодирования). Итерации идут последовательно: горизонтальная – кодирование Рида-Соломона, вертикальная – кодирование Хемминга.

Результаты тестирования (рис. 6) кода Рида-Соломона с одним символом четности  $(256, 143, 8)$  (размер блока 2048 бит, количество информационных бит 1144) и аналогичного (по размеру блока и количеству информационных символов) турбопроизведения кода Рида-Соломона с одним символом четности и расширенного кода Хемминга  $RS(16, 11, 4) \times H(32, 26, 1)$ . Тесты двух кодеков проведены независимо друг от друга (рис. 7).

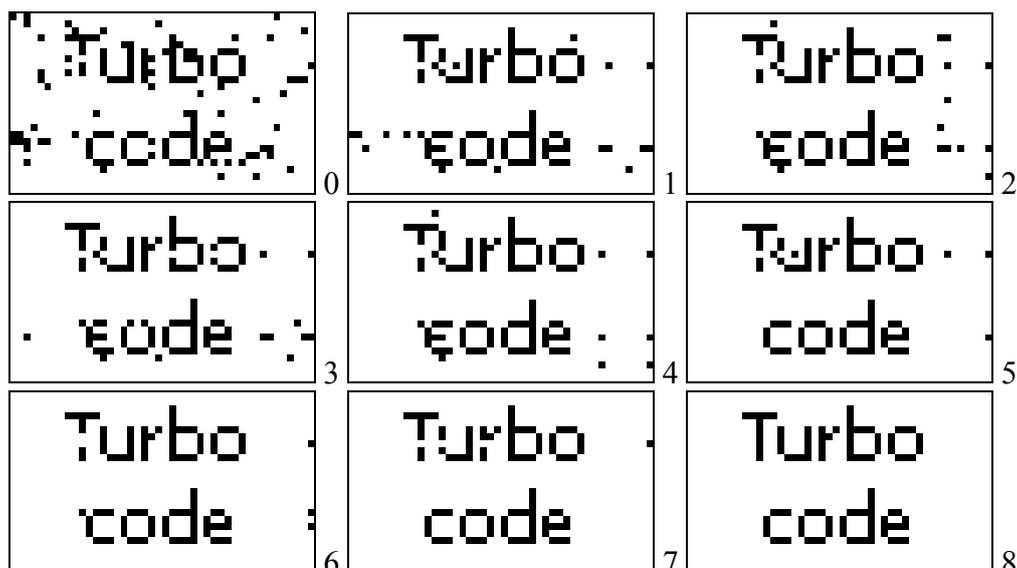


Рис. 6

Дисперсия	Гауссовский шум / жесткие метрики		Равномерный шум / жесткие метрики		Без кодирования	
	RS(256,143,8)	TPC(1144,2048)	RS(256,143,8)	TPC(1144,2048)	Гауссовский	Равномерный
0,50	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,51	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,52	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,53	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,54	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,55	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,56	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,57	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,58	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,59	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,60	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,61	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,62	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,63	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,64	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon
0,65	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon

Рис. 7

Дисперсия	Гауссовский шум / жесткие метрики		Равномерный шум / жесткие метрики		Без кодирования	
	RS(255,143,8)	TPC(1144,2048)	RS(255,143,8)	TPC(1144,2048)	Гауссовский	Равномерный
0,75	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Turbo code	Reed Solomon	Reed Solomon

Рис. 8

При высоком уровне дисперсии кодирование ведет себя следующим образом (рис. 8).

Результаты тестов показывают, что турбокодек исправляет более широкий спектр шумов, чем код Рида-Соломона.

### 5. Полученные оценки

Алгоритм декодирования кодов Рида-Соломона с исправлением стираний

1)  $4 * n * t + 2 * n * (t - b) + 10 * t^2 + 8 * b^2 - 6 * t * b - 2 * (t - b)$  операций умножения;

2)  $2 * n * t + n * (t - b) + 10 * t^2 + 8 * b^2 - 6 * t * b - 3 * (t - b) + 2 * t$  операций сложения;

3)  $(t + b)^2 + n + 6 * t$  операций сравнения;

4)  $4 * t$  операций деления.

Турбокодирование на базе произведения одинаковых кодов:

1) кодирование  $m * n * (1 + r) * C(n, r)$ , где  $C(n, r)$  – сложность кодирования (в операциях над  $m$ -битовыми символами);

2) декодирование;

а) общий случай (универсальный алгоритм Чейса)

$$I * m * n * (1 + r) * 2^P * D(n, r),$$

где  $D(n, r)$  – сложность декодирования (в операциях над  $m$ -битовыми символами);

$I$  – количество итераций;

$P$  – число бит, «подвергающихся сомнению», в алгоритме Чейса;

б) для кодов Рида-Соломона

$$I * m * n * (1 + r) * C_p^{n(1-r)} * D^l(n, r) + I * m * n * (1 + r) * D(n, r),$$

где  $D(n, r)$  – сложность декодирования (в операциях над  $m$ -битовыми символами);

$D^l(n, r) \leq D(n, r)$  – сложность декодирования без алгоритма Берлекэмп-Мэсси и алгоритма поиска позиций ошибок;

$I$  – количество итераций;

$P$  – число символов, «подвергающихся сомнению», в модернизации алгоритме Чейса для кодов Рида-Соломона.

### Заключение

Получена трудоемкость описанных алгоритмов, теорема об условиях для выбора кодов в турбопроизведении. Все описанные алгоритмы реализованы на языке программирования C++. Проведены тесты алгоритмов, на основании которых сделано следующее ниже заключение.

Турбокодирование на базе произведения кодов Рида-Соломона является перспективным направлением помехоустойчивого кодирования. Алгоритм такого кодирования, реализованный по общей схеме турбокодирования с использованием алгоритма Чейса при декодировании, уже дает неплохие результаты по исправляющей способности, но не по времени работы. Использование же модернизации алгоритма Чейса и способности кодов Рида-Соломона восстанавливать стирания дает хорошие результаты и по времени работы (модернизация алгоритма Чейса работает полиномиальное время, в отличие от экспоненциального у не модернизированного), и по исправляющей способности.

Турбокодирование на базе произведения кодов Рида-Соломона и Хемминга также дает интересные результаты, так как способно исправлять ошибки более широкого спектра шумов.

### Библиографический список

1. Бернард Скляр. Цифровая связь. – М.: Вильямс, 2003.
2. Ирматов А.А. Лекции по теории кодирования. – М., 2000.
3. «The Art of Error Correcting Coding» Robert H. Morelos-Zaragoza 2003 год.
4. Самсонов Б.Б., Плохов Е.М., Филоненков А.И., Кречет Т.В. Теория информации и кодирование. – Ростов н/Д., 2002.
5. Зубарев Ю.Б., Кривошеев М.И., Красносельский И.Н. Цифровое телевизионное вещание. – М.: НИИР, 2001.
6. Липкин И.А. Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования. – М.: Вузовская книга, 2002.
7. Нечаев В.И. Элементы Криптографии. – М.: Высш. шк., 1999.
8. Носов В.А. Специальные главы дискретной математики. – М., 1991 год.

## СВОЙСТВА РЕГИСТРОВ СДВИГА С ДВУМЯ ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ

Е.Ю. ОВСЯННИКОВА, МГУ

Важную роль с теоретической и практической точки зрения играют преобразования, заданные системой булевых функций. При этом произвольную систему из  $n$ -функций от  $n$ -переменных можно считать регистром сдвига с  $n$  обратными связями. Особый интерес в силу своей простоты, удобства для изучения и несложной технической реализации в приложениях представляют регистры сдвига с небольшим числом обратных связей. Большое количество литературы посвящено изучению регистров сдвига с одной обратной связью, одним из наиболее полных обзоров является [2], а свойства преобразований, заданных системой линейных функций, подробно освещены в [1]. Однако свойства регистров сдвига с двумя обратными связями общего вида не нашли отклика в известной литературе и не подверглись отдельному изучению, что и послужило причиной написания данной статьи.

Одним из ярких применений преобразований, заданных системой  $n$ -булевых функций от  $n$ -переменных (или, что то же, регистров сдвига с  $n$ -задержками и некоторым числом обратных связей), является шифрование и генерация последовательностей псевдослучайных чисел, при этом преобразование должно обладать свойством взаимной однозначности ( $n$ -мерный вектор-образ должен иметь ровно один  $n$ -мерный вектор-прообраз) или, иными словами, свойством регулярности. На данный момент известен критерий регулярности регистров сдвига с одной обратной связью, который можно найти, например, в [4]. В данной статье сформулирован критерий регулярности регистра сдвига с двумя обратными связями общего вида от  $n$ -переменных (в дальнейшем для удобства именуемого РС2), а также

получена количественная оценка регулярных РС2 (РРС2) от  $n$ -переменных.

Регулярное преобразование из  $n$ -булевых функций от  $n$ -переменных можно рассматривать как перестановку на множестве бинарных векторов длины  $n$ . В таком представлении не менее важной характеристикой преобразования с криптографической точки зрения является его цикловая структура. Более криптостойкими, как известно, являются преобразования с наименьшим числом циклов, т.е. полноцикловые (представимые в виде одного полного цикла длины  $2^n$  или, если все функции линейны, в виде цикла, состоящего из одного нуля, и цикла, содержащего все оставшиеся элементы). В связи с этим, вторая часть данной статьи посвящена вопросу цикловой структуры и полноцикловости РРС2 как перестановки. В работе [4] описан известный метод склейки-расклейки для приведения регистра чистого сдвига к полноцикловому регистру сдвига с одной обратной связью (РС1). Ниже предлагается обобщение этого алгоритма – алгоритм, позволяющий получать полноцикловые регистры сдвига уже с произвольным числом обратных связей, а также предложена иная модернизация, позволяющая уменьшать число циклов РРС2, оставаясь при этом в рамках преобразования типа РРС2. Вопрос непосредственного определения цикловой структуры РРС2 общего вида оказался сложным, однако была решена задача нахождения цикловой структуры РРС2 для случая линейных функций обратной связи и найден критерий полноцикловости для линейного случая, который и приводится в заключительной части статьи. Это проделано с помощью матричного представления РС2 и уже имеющихся результатов относительно линейных преобразований, представленных в работе [1].

**Регистры сдвига с двумя обратными связями**

**Вводные понятия**

**Определение 1**

В булевой параметризации преобразованием, отвечающим двоичному регистру сдвига с  $k$ -обратными связями, называется преобразование  $P: E_n^2 \rightarrow E_n^2$  следующего вида

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n) = \begin{cases} p_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_2, \\ p_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_3, \\ \dots \\ p_{n-k}(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_{n-k+1}, \\ p_{n-k+1}(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \dots \\ p_n(x_1, x_2, \dots, x_n) = f_k(x_1, x_2, \dots, x_n), \end{cases}$$

где функции  $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_k(x_1, x_2, \dots, x_n)$  называются *функциями обратной связи*.

Если  $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_{n-k+2}, \dots, f_{k-1}(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_n, f_k(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_1$ , то преобразование называется *регистром чистого сдвига*.

В данной статье будут рассматриваться двоичные регистры сдвига с двумя обратными связями (обозначим их за РС2) вида

$$P = (p_1, p_2, \dots, p_n) = \begin{cases} p_1(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = x_1, \\ p_2(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = x_2, \\ \dots \\ p_{n-2}(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = x_{n-2}, \\ p_{n-1}(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b), \\ p_n(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b). \end{cases} \quad (1)$$

При  $f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = b, g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = a$  получаем регистр чистого сдвига.

**Регулярность**

Пусть  $\tilde{A}_p$  – граф отображения  $P$ , т.е. ориентированный граф со множеством вершин  $E_n^2$ , причем из вершины  $v_1$  идет дуга в вершину  $v_2 \Leftrightarrow v_2 = P(v_1)$ . Согласно [4], можно сформулировать

**Определение 2**

Преобразование  $P$  называется регулярным, если все вершины графа  $\tilde{A}_p$  имеют ровно один прообраз.

Другими словами, преобразование регулярно, если оно задает взаимно однозначное отображение множества  $E_n^2$  на себя.

**Критерий регулярности РС2 общего вида**

Итак, мы хотим ответить на вопрос: при каком виде функций  $f$  и  $g$  отображение  $P$  вида (1) регулярно?

Исследование более узких классов функций, где одна из двух функций обратной связи линейна по обоим или одной из переменных  $a$  и  $b$ , позволило выдвинуть гипотезу, а затем и доказать следующую теорему.

**Теорема 1 (Критерий регулярности РС2 общего вида)**

**Преобразование**

$$\begin{cases} p_1(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = x_1, \\ \dots \\ p_{n-2}(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = x_{n-2}, \\ f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = abf_4(x_1, \dots, x_{n-2}) + \\ + bf_3(x_1, \dots, x_{n-2}) + af_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + f_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \\ g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = abg_4(x_1, \dots, x_{n-2}) + \\ + bg_3(x_1, \dots, x_{n-2}) + ag_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + g_1(x_1, \dots, x_{n-2}); \end{cases} \quad (2)$$

(т.е. РС2 общего вида),

где  $f, g$  – произвольные функции, разложенные в полином Жегалкина по переменным  $a, b$ , будет регулярно  $\Leftrightarrow \begin{vmatrix} g_3 & g_2 \\ f_3 & f_2 \end{vmatrix} \equiv 1$  и  $g_4 = f_4 \equiv 0$ .

Здесь под определителем понимается выражение, получаемое по обычным правилам раскрытия определителя второго порядка, где сложение производится по модулю два, а в качестве произведения берется конъюнкция.

**Доказательство**

Согласно *общему критерию регулярности* системы из  $n$ -булевых функций от  $n$ -переменных, доказанному в [4], с. 136, система булевых функций  $f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_n(x_1, \dots, x_n)$  является регулярным преобразованием  $E_n^2$  тогда и только тогда, когда она обладает нормальным распределением весов, т.е.  $\|f_{i_1} \cdot \dots \cdot f_{i_k}\| = 2^{n-k} \quad \forall 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n, \forall 1 \leq k \leq n$ . Под весом функции ( $\|f\|$ ) понимается количество наборов, на которых функция  $f$  обращается в единицу.

Рассмотрим систему  $\begin{cases} f(a, b), \\ g(a, b). \end{cases}$

Согласно критерию, эта система регулярна

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \|f\| = \|g\| = 2, \\ \|f \cdot g\| = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Выпишем в таблицу всевозможные значения пар функций  $f, g$  на различных наборах  $(a, b)$  с учетом условия (3), а затем восстановим по ним сами функции.

По данным табличным значениям восстановим функции  $f$  и  $g$  (номера пар функций в табл. 2 соответствуют номерам наборов значений этих функций в табл. 1).

В табл. 2 перечислены всевозможные регулярные преобразования, заданные системой из двух функций от двух переменных. Докажем следующее вспомогательное

**Утверждение 1**

Пусть система функций

$$\{ p_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \dots, p_{n-2}(x_1, \dots, x_{n-2}) \}$$

регулярна по переменным (наборам)  $(x_1, \dots, x_{n-2})$ . Тогда система функций

$$\{ p_1(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b), \dots, p_{n-2}(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b), f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b), g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) \}$$

регулярна по переменным  $(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) \Leftrightarrow$  для каждого фиксированного набора значений переменных  $(x_1, \dots, x_{n-2})$  пара функций  $\{f, g\}$  регулярна по переменным  $(a, b)$ .

**Доказательство**

$\Leftarrow$ . Достаточность. Будем использовать *общий критерий регулярности*, приведенный выше. По условию,  $\|p_{i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_k}\| = 2^{n-k} \quad \forall 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n-2, \quad \forall 1 \leq k \leq n-2$ . Осталось проверить лишь следующие свойства

- 1)  $\|p_{i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_k} \cdot f\| = 2^{n-k-1}$ ;
- 2)  $\|p_{i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_k} \cdot g\| = 2^{n-k-1}$ ;
- $\forall 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n-2,$
- $\forall 1 \leq k \leq n-2$ .
- 3)  $\|p_{i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_k} \cdot f \cdot g\| = 2^{n-k-2}$ .

Рассмотрим произвольный набор  $(x_1, \dots, x_{n-2})$ , на котором  $p_{i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_k} = 1$ . Согласно условию, при данном фиксированном наборе  $(x_1, \dots, x_{n-2})$  существует два набора  $(a, b)$ , на которых  $f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = 1, g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = 1$ , и один набор, на котором конъюнкция  $g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) \cdot f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b)$  обращается в единицу. Система функций  $\{ p_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \dots, p_{n-2}(x_1, \dots, x_{n-2}) \}$  регулярна  $\Rightarrow \exists$  всего  $2^{n-k-2}$  наборов  $(x_1, \dots, x_{n-2})$ , на которых  $p_{i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_k} = 1$ .

Итого,

$$\begin{aligned} \|p_{i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_k} \cdot f\| &= \|p_{i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_k} \cdot g\| = 2^{n-k-2} \cdot 2 = 2^{n-k-1}, \\ \|p_{i_1} \cdot \dots \cdot p_{i_k} \cdot f \cdot g\| &= 2^{n-k-2} \cdot 1 = 2^{n-k-2}, \quad \forall \\ 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n-2, \quad \forall 1 \leq k \leq n-2. \end{aligned}$$

Таблица 1

$a$	$b$	$f$	$g$																						
№ $\rightarrow$		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0
№ $\rightarrow$		13		14		15		16		17		18		19		20		21		22		23		24	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0
1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1

Таблица 2

№	$f$	$g$	№	$f$	$g$	№	$f$	$g$	№	$f$	$g$
1	$a$	$a + b$	7	$a$	$b + 1$	13	$a$	$b$	19	$a$	$a + b + 1$
2	$b$	$a + b$	8	$b$	$a + 1$	14	$b$	$a$	20	$b$	$a + b + 1$
3	$a + b$	$b$	9	$a + b$	$a + 1$	15	$a + b$	$a$	21	$a + b$	$b + 1$
4	$a + 1$	$b + 1$	10	$a + 1$	$a + b + 1$	16	$a + 1$	$a + b$	22	$a + 1$	$b$
5	$b + 1$	$a + b + 1$	11	$b + 1$	$a + 1$	17	$b + 1$	$a$	23	$b + 1$	$a + b$
6	$a + b + 1$	$b + 1$	12	$a + b + 1$	$a + 1$	18	$a + b + 1$	$a$	24	$a + b + 1$	$b$

⇒. Необходимость. Нужно доказать, что для каждого фиксированного набора значений переменных  $(x_1, \dots, x_{n-2})$  выполняется  $\begin{cases} \|f\| = \|g\| = 2, \\ \|f \cdot g\| = 1. \end{cases}$  (i). Проведем доказательство

для  $f$  (для  $g$  – аналогично).

1) По условию

$$\begin{cases} \|p_1 \cdot \dots \cdot p_{n-2} \cdot f\| = 2^{n-(n-1)} = 2, \\ \|p_1 \cdot \dots \cdot p_{n-2} \cdot f \cdot g\| = 1, \\ \|p_1 \cdot \dots \cdot p_{n-2}\| = 1. \end{cases} \Rightarrow \exists$$

Ровно один набор-вектор  $\bar{X} = (x_1, \dots, x_{n-2})$  такой, что  $p_1 \cdot \dots \cdot p_{n-2} = 1$ . Следовательно, для данного  $\bar{X}$ , согласно второму равенству системы,  $\exists$  ровно один набор  $(a, b)$ , на котором  $f \cdot g = 1$ , а из первого равенства получаем, что  $\exists$  два набора  $(a, b)$ , на которых  $f = 1$  (для  $g$  – аналогично), а значит, для  $\bar{X}$  справедливо (i).

2) По условию

$$\begin{cases} \|p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_i \cdot \dots \cdot p_{n-2} \cdot f\| = 2^{n-(n-2)} = 4, \\ \|p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_i \cdot \dots \cdot p_{n-2} \cdot f \cdot g\| = 2, \\ \|p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_i \cdot \dots \cdot p_{n-2}\| = 2, \end{cases} \quad \forall 1 \leq i \leq n-2. \quad (\text{ii})$$

Произведение  $p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_{i_1} \cdot \dots \cdot \hat{p}_{i_2} \cdot \dots \cdot p_{n-2}$  обозначает произведение всех функций  $p_i$ ,  $1 \leq i \leq n-2$  за исключением функций  $p_{i_1}, p_{i_2}$ .

⇒ учитывая п.1),  $\forall i \exists$  два набора:  $\bar{X}$  и некоторый  $\bar{X}^i$ , не равный  $\bar{X}$ , на которых  $p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_i \cdot \dots \cdot p_{n-2} = 1$ . Согласно п.1), для  $\bar{X}$  существует два набора  $(a, b)$ , на которых  $f = 1$ . Отсюда и из первого уравнения системы (ii) получаем, что для  $\bar{X}^i$  также существует два набора  $(a, b)$ , на которых  $f = 1$ .

По условию  $\|p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_i \cdot \dots \cdot p_{n-2} \cdot f \cdot g\| = 2$  и, согласно п. 1), на  $\bar{X}$  выполняется  $\|f \cdot g\| = 1$ . Отсюда и из второго уравнения (ii) получаем, что и на  $\bar{X}^i \forall 1 \leq i \leq n-2$  справедливо  $\|f \cdot g\| = 1$ , т.е. выполняется (i).

3) Аналогично,

$$\begin{cases} \|p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_i \cdot \dots \cdot \hat{p}_j \cdot \dots \cdot p_{n-2} \cdot f\| = 2^{n-(n-2)} = 8, \\ \|p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_i \cdot \dots \cdot \hat{p}_j \cdot \dots \cdot p_{n-2} \cdot f \cdot g\| = 4, \\ \|p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_i \cdot \dots \cdot \hat{p}_j \cdot \dots \cdot p_{n-2}\| = 4. \end{cases} \quad \forall 1 \leq i, j \leq n-2. \quad (\text{iii})$$

На наборах  $\{\bar{X}, \bar{X}^i, \bar{X}^j$  и некотором новом наборе  $\bar{X}^{ij}\}$  выполняется:  $p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_i \cdot \dots \cdot \hat{p}_j \cdot \dots \cdot p_{n-2} = 1$ . Но для  $\bar{X}, \bar{X}^i, \bar{X}^j$ ,

согласно пп.1), 2), выполняется (ii). Отсюда и из уравнений (iii) следует, что (ii) справедливо и для набора  $\bar{X}^{ij} \forall 1 \leq i, j \leq n-2$ .

И так далее, получаем, что произвольное произведение

$$p_1 \cdot \dots \cdot \hat{p}_{i_1} \cdot \dots \cdot \hat{p}_{i_k} \cdot \dots \cdot p_{n-2},$$

где отсутствует  $k$  функций, обращается в единицу на наборах  $\{\bar{X}, \bar{X}^{I(i_1, \dots, i_{k-1})}\}$ , где  $I(i_1, \dots, i_{k-1})$  – множество всевозможных непустых подмножеств множества индексов  $\{1, 2, \dots, n-2\}$ , состоящих не более, чем из  $k-1$  элементов. Тогда из условия регулярности системы функций

$$\{p_1(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b), \dots, p_{n-2}(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b), f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b), g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b)\}$$

имеем для набора  $\bar{X}^{I(i_1, \dots, i_k)}$  условие

$$\begin{aligned} \|f\| &= 2^{k+1} - 2 \cdot [C_k^1 + C_k^2 + \dots + C_k^{k-1} + 1] = \\ &= 2^{k+1} - 2 \cdot [C_k^0 + C_k^1 + C_k^2 + \dots + C_k^{k-1} + C_k^k - 1] = \\ &= 2^{k+1} - 2 \cdot [2^k - 1] = 2. \end{aligned}$$

$$\text{Аналогично, } \|f \cdot g\| = 2^k - 1 \cdot [2^k - 1] = 1.$$

Таким образом,  $\forall$

$$1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_k \leq n-2, \quad \forall 1 \leq k \leq n-2$$

для  $\bar{X}^{I(i_1, \dots, i_k)}$  выполняется (i), т.е. условие (i) выполнено для всех наборов  $(x_1, \dots, x_{n-2})$ . Тем самым утверждение доказано.

Аналогичным образом можно доказать и более общее

### Утверждение 2

Пусть система функций

$$\{p_1(x_1, \dots, x_{n-k}), \dots, p_{n-k}(x_1, \dots, x_{n-k})\}$$

регулярна по переменным  $(x_1, \dots, x_{n-k})$ . Тогда система функций

$$\{p_1(x_1, \dots, x_{n-k}, y_1, \dots, y_k), \dots, p_{n-k}(x_1, \dots, x_{n-k}, y_1, \dots, y_k), f_1(x_1, \dots, x_{n-k}, y_1, \dots, y_k), f_k(x_1, \dots, x_{n-k}, y_1, \dots, y_k)\}$$

регулярна по переменным

$$(x_1, \dots, x_{n-k}, y_1, \dots, y_k) \Leftrightarrow$$

для каждого фиксированного набора значений переменных  $x_1, \dots, x_{n-k}, y_1, \dots, y_k$  система функций  $\{f_1, \dots, f_k\}$  регулярна по переменным  $(y_1, \dots, y_k)$ .

Теперь из результатов Таблицы 2 и Утверждения 1 заключаем, что преобразование (2) является регулярным тогда и только тогда, когда функции обратной связи имеют следующий вид

$$\begin{cases} f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = bf_3(x_1, \dots, x_{n-2}) + af_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + f_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \\ g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = \begin{cases} b + ag_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + g_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \dots \text{àñëè. } f_2(\bar{x}) = 1, f_3(\bar{x}) = 0, \\ bg_3(x_1, \dots, x_{n-2}) + a + g_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \dots \text{àñëè. } f_2(\bar{x}) = 0, f_3(\bar{x}) = 1, \\ b \cdot \bar{g}_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + a \cdot g_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + g_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \dots \text{àñëè. } f_2(\bar{x}) = f_3(\bar{x}) = 1. \end{cases} \end{cases} \quad (4)$$

Как видно, при любом фиксированном наборе  $(x_1, \dots, x_{n-2})$ , пара функций  $\{f, g\}$  от переменных  $(a, b)$  является регулярным преобразованием, причем представление (4) включает в себя все возможные 24 пары регулярных функций из табл. 2 и только их.

Выпишем в табл. 3 все возможные наборы значений функций  $f_2, f_3, g_2, g_3$ .

Т а б л и ц а 3

$f_2$	$f_3$	$g_2$	$g_3$
1	1	$g_2$	$g_2+1$
0	1	1	$g_3$
1	0	$g_2$	1

Это эквивалентно тому, что на каждом наборе  $(x_1, \dots, x_{n-2})$  функции  $f_2, f_3, g_2, g_3$  могут принимать только лишь наборы значений строк следующей табл. 4:

Т а б л и ц а 4

$f_2$	$f_3$	$g_2$	$g_3$
1	1	1	0
1	1	0	1
0	1	1	0
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1

что, в свою очередь, эквивалентно следующему условию:

$$\begin{vmatrix} g_3(x_1, \dots, x_{n-2}) & g_2(x_1, \dots, x_{n-2}) \\ f_3(x_1, \dots, x_{n-2}) & f_2(x_1, \dots, x_{n-2}) \end{vmatrix} \equiv 1.$$

Таким образом, нами доказано, что РС2 является регулярным преобразованием  $\Leftrightarrow$  функции обратной связи имеют вид

$$\begin{cases} f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = bf_3(x_1, \dots, x_{n-2}) + \\ + af_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + f_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \\ g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = bg_3(x_1, \dots, x_{n-2}) + \\ + ag_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + g_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \end{cases}$$

где 
$$\begin{vmatrix} g_3 & g_2 \\ f_3 & f_2 \end{vmatrix} \equiv 1, \quad (5)$$

что равносильно утверждению нашей теоремы.

### Число регулярных РС2 (RPC2) от $n$ переменных

#### Утверждение 3

Число регулярных РС2 от  $n$ -переменных составляет  $24^{2^{n-2}}$ .

#### Доказательство

Число RPC2 определяется количеством наборов функций

$f_1(x_1, \dots, x_{n-2}), f_2(x_1, \dots, x_{n-2}), f_3(x_1, \dots, x_{n-2}),$   
 $g_1(x_1, \dots, x_{n-2}), g_2(x_1, \dots, x_{n-2}), g_3(x_1, \dots, x_{n-2}),$   
 удовлетворяющих критерию регулярности (5). Как было установлено при доказательстве Утверждения 1, функции

$$f_2(x_1, \dots, x_{n-2}), f_3(x_1, \dots, x_{n-2}),$$

$$g_2(x_1, \dots, x_{n-2}), g_3(x_1, \dots, x_{n-2})$$

могут принимать одновременно лишь значения строк табл. 4, т.е. всего 6 различных наборов значений на каждом фиксированном наборе  $(x_1, \dots, x_{n-2})$ . Функции

$$f_1(x_1, \dots, x_{n-2}), g_1(x_1, \dots, x_{n-2})$$

могут быть произвольными. Следовательно, имеем всего  $6^{2^{n-2}} \cdot 2^{2^{n-2}} \cdot 2^{2^{n-2}} = 24^{2^{n-2}}$  возможностей.

#### Полноцикловость

#### Алгоритм склейки-расклейки циклов в графе RPC2

#### Определение 3

Преобразование (1) называется полноцикловым, если его граф представим в виде одного связного цикла длины  $2^n$  или, если функции обратной связи линейны, в виде цикла, состоящего из одного нуля и цикла, содержащего все оставшиеся элементы.

Обратимся к теореме – *принципу склеивания-расклеивания* циклов для регистров сдвига с одной обратной связью (РС1), описанному в [4], стр. 143, на основе которого там же приводится алгоритм построения полноциклового РС1.

**Теорема 2 [4]**

Если к функции обратной связи  $f(x_1, \dots, x_n) = x_1 + g(x_2, \dots, x_n)$  регистра сдвига с одной обратной связью, заданного преобразованием  $\delta_f(x_1, \dots, x_n) = (x_2, \dots, x_n, x_1 + g(x_2, \dots, x_n))$ , прибавить член вида  $x_2^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot x_n^{\alpha_n}$ , где  $\alpha_i = 0, 1; i = 2, n$ , то либо некоторый цикл графа  $\Gamma_\delta$  распадется на два цикла, либо два цикла графа объединятся в один.

Таким образом, отыскивая пары вершин  $\alpha^0 = (0, \alpha_2, \dots, \alpha_n), \alpha^1 = (1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ , лежащие в графе  $\tilde{A}_{\delta_f}$  на разных циклах, и последовательно заменяя функцию  $f$  на  $f + x_2^{\alpha_2} \cdot \dots \cdot x_n^{\alpha_n}$ , можно получить полноцикловый регистр сдвига.

Далее будет предложен аналогичный принцип склейки-расклейки для РС2.

Рассмотрим произвольное преобразование  $\delta$ , задающее регулярный РС2. Согласно значениям табл. 3, функции  $f_2(x_1, \dots, x_{n-2}), f_3(x_1, \dots, x_{n-2}), g_2(x_1, \dots, x_{n-2}), g_3(x_1, \dots, x_{n-2})$  могут принимать на каждом фиксированном наборе  $(x_1, \dots, x_{n-2})$  лишь значения одной из трех строк таблицы, при этом функции обратной связи примут один из следующих трех видов

- А)  $\begin{cases} f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = a + f_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \\ g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = b + ag_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + g_1(x_1, \dots, x_{n-2}); \end{cases}$
- Б)  $\begin{cases} f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = b + f_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \\ g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = bg_3(x_1, \dots, x_{n-2}) + a + g_1(x_1, \dots, x_{n-2}); \end{cases}$
- В)  $\begin{cases} f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = a + b + f_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \\ g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = \overline{bg_2(x_1, \dots, x_{n-2})} + \\ + ag_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + g_1(x_1, \dots, x_{n-2}). \end{cases}$

А) – пусть на фиксированном наборе  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_{n-2})$  функции обратной связи преобразования  $\delta$  имеют вид А). Аналогично методу, описанному выше для РС1, рассмотрим преобразование  $\delta^*$ , отличающееся от  $\delta$  лишь функцией  $g$ , к которой добавлено слагаемое  $x_1^{\beta_1} \cdot \dots \cdot x_{n-2}^{\beta_{n-2}}$

$$\delta^* = \begin{cases} p_1(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = x_1, \\ \dots \\ p_{n-2}(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = x_{n-2}, \\ f(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = a + f_1(x_1, \dots, x_{n-2}), \\ g(a, x_1, \dots, x_{n-2}, b) = b + ag_2(x_1, \dots, x_{n-2}) + \\ + g_1(x_1, \dots, x_{n-2}) + x_1^{\beta_1} \cdot \dots \cdot x_{n-2}^{\beta_{n-2}}; \end{cases}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \delta(0, \beta, 0) &= (\beta, f_1, g_1) & \delta^*(0, \beta, 0) &= (\beta, f_1, \overline{g_1}) \\ \delta(0, \beta, 1) &= (\beta, f_1, \overline{g_1}) & \delta^*(0, \beta, 1) &= (\beta, f_1, g_1) \quad (6) \\ \delta(1, \beta, 0) &= (\beta, \overline{f_1}, g_1 + g_2) & \delta^*(1, \beta, 0) &= (\beta, \overline{f_1}, \overline{g_1 + g_2}) \\ \delta(1, \beta, 1) &= (\beta, \overline{f_1}, \overline{g_1 + g_2}) & \delta^*(1, \beta, 1) &= (\beta, \overline{f_1}, g_1 + g_2), \end{aligned}$$

а на всех остальных наборах эти два преобразования совпадают. Рассмотрим всевозможные способы начального расположения вершин  $\{(0, \beta, 0), (0, \beta, 1), (1, \beta, 0), (1, \beta, 1)\} = :V$  с точки зрения принадлежности разным циклам графа  $\Gamma_\delta$ . Наша задача – выяснить, как ведут себя циклы, содержащие эти вершины, при добавлении к функции обратной связи  $g$  слагаемого  $x_1^{\beta_1} \cdot \dots \cdot x_{n-2}^{\beta_{n-2}}$ , и понять, когда они склеиваются (с остальными циклами никаких изменений не произойдет, т.к. прибавление слагаемого такого вида влияет только на вершины вида  $/*, \beta, */$ ).

(Замечание: преобразование  $\delta$  регулярно  $\Rightarrow \Gamma_\delta$  состоит из циклов)

- Обозначим
- $\longrightarrow$  путь перехода по  $\delta$
  - $\dashrightarrow$  путь перехода по  $\delta^*$
  - $\text{---}$  обход цикла при преобразовании  $\delta$
  - $\text{---}$  обход цикла при преобразовании  $\delta^*$

**Случай 1**

Все вершины  $V$  изначально лежат на одном цикле.



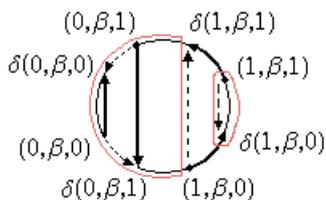
Оставшиеся 4 варианта расположения вершин на цикле дают такие же результаты, т.к. получаются из двух данных циклическим сдвигом вершин.

### Случай 2

Вершины  $V$  изначально лежат на двух циклах.

1) три вершины лежат на одном цикле, оставшаяся – на втором.

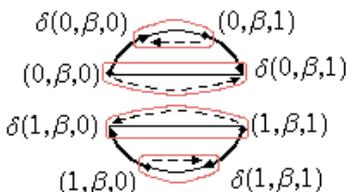
а)



⇒ число циклов сохраняется (+0)

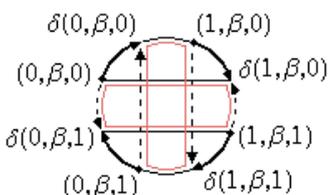
2) вершины лежат по две на каждом цикле.

а)



⇒ два цикла превращаются в четыре (+2)

б)



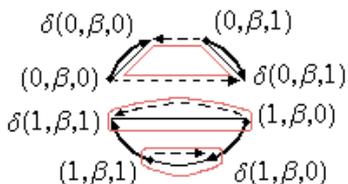
⇒ число циклов сохраняется (+0)

Остальные расположения данного случая дают такие же результаты.

### Случай 3

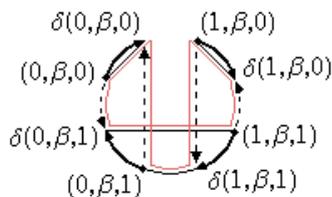
Вершины лежат на трех циклах.

а)



⇒ число циклов сохранилось (+0)

б)



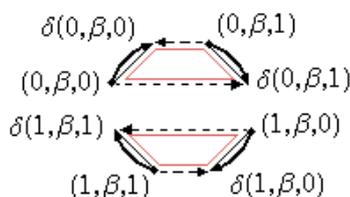
⇒ получили один цикл (-2)

Оставшиеся расположения аналогичны.

### Случай 4

Все вершины  $V$  лежат на разных циклах.

а)



⇒ число циклов уменьшилось на два (-2).

### Вывод

Если к функции обратной связи  $g$  преобразования  $\delta$  (в случае А) прибавить слагаемое вида  $x_1^{\beta_1} \cdot \dots \cdot x_{n-2}^{\beta_{n-2}}$ , то либо число циклов уменьшится на 2, либо увеличится на 2, либо останется неизменным.

Аналогичным образом можно убедиться, что данное свойство остается в силе, если вместо функции  $g$  изменить функцию  $f$ . Кроме того, данный вывод применим также к пунктам Б) и В), так как в последних происходит разбор случаев, совпадающих с А) в силу того, что пункты Б) и В) получаются из А) перенумерацией вершин множества  $V$ .

Таким образом, справедливо следующее

### Утверждение 4 (Принцип склейки-расклейки циклов для РС2)

Если к одной из функций обратной связи  $f$  или  $g$  регулярного РС2 с графом  $\Gamma_\delta$  прибавить слагаемое  $x_1^{\beta_1} \cdot \dots \cdot x_{n-2}^{\beta_{n-2}}$ ,  $\beta_i = 0, 1, 1 \leq i \leq n-2$ , то число циклов графа  $\Gamma_\delta$  уменьшится на 2, увеличится на 2 либо останется неизменным. Причем если вершины множества

$V := \{(0, \beta, 0), (0, \beta, 1), (1, \beta, 0), (1, \beta, 1)\}$ ,  $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_{n-2})$ , лежали в  $\Gamma_\delta$  на четырех разных циклах или на трех так, что для тех двух вершин, что лежат по одной на двух разных циклах, не выполняется  $\delta(1\text{ой}) = \delta^*(2\text{ой})$ , то число циклов уменьшится на два.

Таким образом, последовательно отыскивая вершины  $(0, \beta, 0), (0, \beta, 1), (1, \beta, 0), (1, \beta, 1)$ , которые лежат либо на четырех разных циклах, либо на трех так, что для тех двух вершин, которые лежат по одной на двух разных циклах, не выполняется  $\delta(1\text{-ой}) = \delta^*(2\text{-ой})$ , и, заменяя функцию обратной связи  $g$  (или  $f$ ) на  $g + x_1^{\beta_1} \dots x_{n-2}^{\beta_{n-2}}$  (или  $f + x_1^{\beta_1} \dots x_{n-2}^{\beta_{n-2}}$ ), можно уменьшить число циклов РРС2. На каждом шаге число циклов будет уменьшаться на два, а получаемое преобразование будет принадлежать классу РРС2.

**Алгоритм построения полноциклового регистра сдвига с произвольным числом обратных связей из регистра чистого сдвига**

В предыдущем пункте был описан алгоритм, приведенный в [4], позволяющий строить полноциклового РС1 с помощью метода-склейки расклейки. В данном разделе предлагается обобщение этого алгоритма, в котором слагаемые вида  $x_1^{\alpha_1} \dots x_i^{\alpha_{i-1}} \cdot x_{i+1}^{\alpha_{i+1}} \dots x_n^{\alpha_n}$  прибавляются не только к последней функции, функции обратной связи, а к любой из  $n$  функций, задающих преобразование. Тем самым преобразование перестает быть регистром сдвига с одной обратной связью и превращается в полноциклового регистр сдвига с произвольным числом обратных связей по произвольным переменным.

Итак, рассмотрим систему  $n$ -булевых функций, задающих регистр чистого

$$\text{сдвига: } \delta = \begin{cases} p_1(x_1, \dots, x_n) = x_2, \\ p_2(x_1, \dots, x_n) = x_3, \\ \dots \\ p_{n-1}(x_1, \dots, x_n) = x_n, \\ p_n(x_1, \dots, x_n) = x_1. \end{cases}$$

Как мы уже знаем из Теоремы 2, если отыскать наборы  $\alpha^0 = (0, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  и

$\alpha^1 = (1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ , лежащие на разных циклах, и заменить функцию  $p_n(x_1, \dots, x_n)$  на  $p_n^\alpha(x_1, \dots, x_n) = x_1 + x_2^{\alpha_2} \dots x_n^{\alpha_n}$ , то эти два цикла склеятся в один. Кроме того, новое преобразование,  $\delta_\alpha$ , будет совпадать с  $\delta$  на всех наборах, кроме  $\alpha^0$  и  $\alpha^1$ .

Рассмотрим теперь два набора

$$\beta^0 = (\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 0, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n) \text{ и} \\ \beta^1 = (\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 1, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n), \quad 1 \leq i \leq n,$$

не равных  $\alpha^0$  и  $\alpha^1$ . Тогда

$$\delta_\alpha(\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 0, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n) = (\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 0, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n, \beta_1) \\ \delta_\alpha(\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 1, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n) = (\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 1, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n, \beta_1) \\ \delta_\beta(\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 0, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n) = (\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 1, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n, \beta_1) \\ \delta_\beta(\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 1, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n) = (\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 0, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n, \beta_1),$$

где  $\delta_\beta$  отличается от  $\delta_\alpha$  тем, что к функции

$p_{i-1}$  добавлено слагаемое

$$x_1^{\beta_1} \dots x_i^{\beta_{i-1}} \cdot x_{i+1}^{\beta_{i+1}} \dots x_n^{\beta_n}, \text{ т.е.}$$

$$p_{i-1}^\beta(x_1, \dots, x_n) = p_{i-1}^\alpha(x_1, \dots, x_n) + x_1^{\beta_1} \dots x_i^{\beta_{i-1}} \cdot x_{i+1}^{\beta_{i+1}} \dots x_n^{\beta_n}$$

Видно, что если наборы  $\beta^0$  и  $\beta^1$  лежали на разных циклах, то эти два цикла склеятся, если же на одном, то расклеятся. Таким образом, если последовательно отыскивать пары наборов вида  $(\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 0, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n)$  и  $(\beta_1, \dots, \beta_{i-1}, 1, \beta_{i+1}, \dots, \beta_n)$ , лежащих на разных циклах, и заменять функцию  $p_{i-1}$  на функцию  $p_{i-1}(x_1, \dots, x_n) + x_1^{\beta_1} \dots x_i^{\beta_{i-1}} \cdot x_{i+1}^{\beta_{i+1}} \dots x_n^{\beta_n}$ , можно прийти к полноциклового преобразованию.

Докажем, что данный алгоритм не застопорится после конечного числа шагов, а действительно приведет к полному циклу.

**Доказательство**

Допустим, сложилась такая ситуация, что число циклов больше одного, а дальнейшая склейка невозможна, то есть для любого набора  $\alpha$  все наборы, отличающиеся от него ровно в одной позиции, лежат на том же цикле. Но это означает, что на этом цикле лежат абсолютно все вершины, и он один: действительно, какие бы две вершины  $(\alpha_1, \dots, \alpha_n)$  и  $(\beta_1, \dots, \beta_n)$  мы ни взяли, из первой можно получить вторую, последовательно меняя по одному элементу в позициях, в которых эти наборы отличаются. На каждом

шаге мы будем получать новую вершину, которая, согласно нашему предположению, лежит на одном цикле с предыдущей. Таким образом, вся цепочка вершин, ведущая от  $\alpha$  к  $\beta$  окажется на одном цикле вместе с  $\alpha$  и  $\beta$ . В силу произвольности выбора этих двух вершин, заключаем, что все наборы лежат на одном цикле.

Таким образом, произведя

$$\frac{1}{n} \cdot \sum_{d|n} \varphi(d) \cdot 2^{n/d} - 1$$

таких операций (ибо это есть число циклов в регистре чистого сдвига ([4], стр. 144) без единицы, а за одну склейку число циклов уменьшается на один) получим полноцикловое преобразование. Процедура останется в силе, если мы стартуем с регулярного регистра сдвига с произвольным числом обратных связей, у которого каждая функция  $p_i$  линейна по переменной  $x_{i+1}$  ( $p_n$  должна быть линейна по  $x_1$ ), и соответствующая переменная является существенной для данной функции. Если начинать процесс с такого регистра, а не с регистра чистого сдвига, число шагов алгоритма будет иным, однако сам алгоритм останется в силе.

Данный алгоритм позволяет расширить класс полноцикловых преобразований с RPS1 и RPS2 уже на регулярные регистры сдвига с произвольным количеством обратных связей, причем появляется возможность конструировать большое количество обратных связей простого вида вместо одной или двух длинных.

**Критерий полноцикловости линейных RPS2**

**Матричное представление линейного RPS2. Естественная нормальная форма и элементарные делители характеристической матрицы системы линейных функций**

Случай линейной системы булевых функций является особым и детально описан в [1]. Рассмотрим регулярный линейный регистр сдвига с двумя обратными связями, т.е. регистр сдвига, функции обратной связи которого линейны, следующего вида:

$$\delta = \begin{cases} p_1(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = x_2, \\ \dots \\ p_{n-2}(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = x_{n-1}, \\ f(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = x_n \cdot \alpha_n + x_1 \cdot \alpha_1 + \\ + (x_2 \cdot \alpha_2 + \dots + x_{n-1} \cdot \alpha_{n-1}), \\ g(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = x_n \cdot \beta_n + x_1 \cdot \beta_1 + \\ + (x_2 \cdot \beta_2 + \dots + x_{n-1} \cdot \beta_{n-1}); \end{cases} \quad (7)$$

где 
$$\begin{vmatrix} g_3 & g_2 \\ f_3 & f_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \beta_n & \beta_1 \\ \alpha_n & \alpha_1 \end{vmatrix} \equiv 1, \\ \beta_i = 0,1, \alpha_i = 0,1, \quad 2 \leq i \leq n-1.$$

Данному преобразованию можно однозначно сопоставить матрицу  $M$  из  $n$  строк и  $n$  столбцов:

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \dots & \alpha_{n-1} & \alpha_n \\ \beta_1 & \beta_2 & \beta_3 & \dots & \beta_{n-1} & \beta_n \end{pmatrix} \quad (8)$$

Видно, что действуя матрицей  $M$  на вектор  $(x_1, \dots, x_n)$  мы получим вектор  $(p_1, \dots, p_{n-2}, f, g)$ .

Рассмотрим несколько утверждений, сформулированных в [1], которые нам понадобятся в дальнейшем.

**Определение 4 [1]**

Если  $M - (n,n)$ -матрица над полем  $F$  (характеристическая для некоторого линейного преобразования), и  $M_l = M - xI$ , где  $I$ -единичная матрица, то *инвариантами* матрицы  $M$  называются  $l$  ( $l \leq n$ ) ненулевых нормированных многочленов, которые задаются единственным образом:

$$\begin{aligned} g_1(x) &= f_1(x), \\ g_2(x) &= f_1(x)f_2(x), \\ \dots \\ g_l(x) &= f_1(x)f_2(x)\dots f_l(x), \end{aligned}$$

где многочлены  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_l(x)$  определяются путем применения определенной последовательности операций к матрице  $M_l$ . Алгоритм вычисления многочленов  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_l(x)$ , который нам потребует-

ся для дальнейших вычислений, приведен в [1], гл.1, п. 15.4. В данной статье его описание опускается в силу громоздкости последнего.

**Определение 5 [1]**

Инвариантные множители матрицы  $M$  могут быть записаны в виде произведений

$$g_l(x) = [p_1(x)]^{h_{l1}} [p_2(x)]^{h_{l2}} \dots [p_r(x)]^{h_{lr}},$$

$$g_{l-1}(x) = [p_1(x)]^{h_{(l-1)1}} [p_2(x)]^{h_{(l-1)2}} \dots [p_r(x)]^{h_{(l-1)r}},$$

.....

$$g_1(x) = [p_1(x)]^{h_{11}} [p_2(x)]^{h_{12}} \dots [p_r(x)]^{h_{1r}},$$

где  $h_j \geq h_{(l-1)j} \geq \dots \geq h_{1j} \geq 0$ .

Элементарными делителями матрицы  $M$  являются все множители  $[p_i(x)]^{h_{ij}}$ , отличные от константы, т.е. те множители, для которых  $h_{ij} > 0$ .

**Определение 6 ([1], гл.1, п. 17.8)**

Матрица  $M$  с элементарными делителями  $d_1(x)$ ,

$d_2(x), \dots, d_w(x)$  (и любая подобная ей матрица) подобна матрице  $M^*$ :

$$M^* = \begin{pmatrix} M_{d_1(x)} & & & & \\ & M_{d_2(x)} & & & \\ & & \dots & & \\ & & & & M_{d_w(x)} \end{pmatrix},$$

называемой *естественной нормальной формой* матрицы  $M$ ,

где  $M_{d_i(x)} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\alpha'_0 & -\alpha'_1 & -\alpha'_2 & \dots & -\alpha'_{n-1} \end{pmatrix}$

есть сопровождающая матрица многочлена  $d_i(x) = \alpha'_0 + \alpha'_1 \cdot x + \dots + \alpha'_{n-1} \cdot x^{n-1} + x^n$ .

**Множество циклов и критерий полноцикловости линейного РРС2**

Согласно ([1], гл.5, п. 9.1), для построения множества циклов преобразования (7) необходимо сначала привести ее характеристическую матрицу (8) к естественной нормальной форме. Прделаем это, учитывая, что в данном случае поле, над которым

происходят преобразования, есть GF(2), и вычитание равносильно сложению по модулю два. Действуя согласно вышеупомянутому алгоритму вычисления многочленов  $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$  для матрицы  $M$  вида (8) за  $(n-2)$  итерации получим

$$f_1(x) = f_2(x) = \dots = f_{n-2}(x) = 1 \text{ и}$$

$$M_{n-1} = \begin{pmatrix} \alpha_1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^2 + \dots + \alpha_{n-1} \cdot x^{n-2} + x^{n-1} & \alpha_n \\ \beta_1 + \beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot x^2 + \dots + \beta_{n-1} \cdot x^{n-2} & \beta_n + x \end{pmatrix},$$

что означает, что элементарными делителями матрицы  $M$  являются элементарные делители матрицы  $M_{n-1}$  ([1], гл.1, п. 15.4.). Дальнейшее преобразование матрицы  $M_{n-1}$  требует рассмотрения случаев, обусловленных тождеством  $\begin{vmatrix} \beta_n & \beta_1 \\ \alpha_n & \alpha_1 \end{vmatrix} = 1$ , которые, в свою очередь, (9) приводят к следующим результатам:

1) при  $\alpha_n = 1$  получаем: (10)

$$\begin{cases} f_1(x) = f_2(x) = \dots = f_{n-1}(x) = 1 \\ f_n = 1 + x \cdot (\beta_2 + \alpha_1 + \alpha_2 \beta_n) + x^2 \cdot (\beta_3 + \alpha_2 + \alpha_3 \beta_n) + x^{n-2} \times \\ \times (\beta_{n-1} + \alpha_{n-2} + \alpha_{n-1} \beta_n) + x^{n-1} \cdot (\beta_n + \alpha_{n-1}) + x^n; \end{cases}$$

2) при  $\alpha_n = 0$  получаем:

а) если не все из чисел  $\beta_2, \dots, \beta_{n-1}$  равны нулю и  $(x+1)$  не делит

$$\beta_1 + \beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot x^2 + \dots + \beta_{n-1} \cdot x^{n-2}, \text{ то}$$

$$\begin{cases} f_1(x) = f_2(x) = \dots = f_{n-1}(x) = 1 \\ f_n = (1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^2 + \dots + \alpha_{n-1} \cdot x^{n-2} + x^{n-1})(x+1); \end{cases}$$

б) если не все из чисел  $\beta_2, \dots, \beta_{n-1}$  равны нулю,  $(x+1)$  делит

$$\beta_1 + \beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot x^2 + \dots + \beta_{n-1} \cdot x^{n-2}$$

и делит

$$1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^2 + \dots + \alpha_{n-1} \cdot x^{n-2} + x^{n-1}, \text{ то}$$

$$\begin{cases} f_1(x) = f_2(x) = \dots = f_{n-2}(x) = 1 \\ f_{n-1}(x) = x + 1 \\ f_n = (1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^2 + \dots + \alpha_{n-1} \cdot x^{n-2} + x^{n-1}); \end{cases}$$

в) если не все из чисел  $\beta_2, \dots, \beta_{n-1}$  равны нулю,  $(x+1)$  делит

$$\beta_1 + \beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot x^2 + \dots + \beta_{n-1} \cdot x^{n-2}$$

и не делит

$$1 + \alpha_2 \cdot x + \alpha_3 \cdot x^2 + \dots + \alpha_{n-1} \cdot x^{n-2} + x^{n-1}, \text{ то}$$

$$\begin{cases} f_1(x) = f_2(x) = \dots = f_{n-1}(x) = 1 \\ f_n = (x+1)(q+1) = (1 + (\alpha_2 + 1) \cdot x + \\ + \alpha_3 \cdot x^2 + \dots + \alpha_{n-1} \cdot x^{n-2} + x^{n-1}); \end{cases}$$

г) если  $\beta_2 = \dots = \beta_n = 0, \beta_1 = 1$ , то имеем то же, что и в п. б)1);

д) если  $\beta_2 = \dots = \beta_n = \beta_1 = 0$ , то имеем то же, что и в п. б)2).

Итак, мы разобрали все случаи и нашли функции  $f_1, \dots, f_n$ . Воспользовавшись определениями 4,5,6, можно найти все элементарные делители матрицы  $M$  (8) и ее естественную нормальную форму. Обратимся вновь к [1].

**Определение 7 [1]**

Предположим, что граф преобразования (7) состоит из  $N_1$  циклов длины  $T_1, N_2$  циклов длины  $T_2, \dots, N_q$  циклов длины  $T_q$ . Этот граф задается единственным образом с точностью до изоморфизма выражением  $\Sigma = \{N_1[T_1] + N_2[T_2] + \dots + N_q[T_q]\}$ .  $\Sigma$  называется *множеством циклов* матрицы  $M$  (8) преобразования (7). Каждый член  $N_i[T_i]$  называется *циклическим термом*.

**Определение 8 [1]**

Произведением двух циклических термов является терм, вычисляемый по формуле  $N_i[T_i] N_j[T_j] = N_i N_j$  н.о.д.  $(T_i, T_j)$  [н.о.к.  $(T_i, T_j)$ ]. (11)

Если  $\Sigma_1 = \{a_1 + a_2 + \dots + a_r\}$  и  $\Sigma_2 = \{b_1 + b_2 + \dots + b_s\}$ , где  $a_i, b_i$  – циклические термы, то произведение множеств циклов  $\Sigma_1 \Sigma_2$  определяется как множество циклов, термы которого равны всевозможным произведениям  $a_i b_j$ , вычисляемых по формуле (11).

**Утверждение 5 [1]**

Пусть матрица  $M$  имеет элементарные делители  $d_1(x), d_2(x), \dots, d_w(x)$ , и  $\Sigma_i$  обозначает множество циклов матрицы  $M_{d_i(x)}$ . Тогда множество циклов матрицы  $M$  равно  $\Sigma = \Sigma_1 \Sigma_2 \dots \Sigma_w$ .

**Утверждение 6 [1]**

Рассмотрим многочлен

$$d(x) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot x + \dots + \alpha_{n-1} \cdot x^{n-1} + x^n = [p(x)]^e,$$

где  $[p(x)]$  – неприводимый многочлен над полем  $GF(p)$ , и его сопровождающую матрицу  $M_{d(x)}$ . И пусть  $T_i$  – показатель много-

члена  $[p(x)]^i, i = \overline{1..e}$ , т.е. такое минимальное целое число  $T$ , что  $(1-x^T)$  делится на  $[p(x)]^i$ . Тогда множество циклов матрицы  $M$  имеет вид

$$\left\{ \begin{aligned} & [1] + \frac{p^h - 1}{T_1} [T_1] + \frac{p^{2h} - p^h}{T_2} [T_2] + \\ & + \frac{p^{3h} - p^{2h}}{T_3} [T_3] + \dots + \frac{p^{eh} - p^{(e-1)h}}{T_e} [T_e] \end{aligned} \right\}$$

Таким образом, используя утверждения 5, 6 и полученное множество элементарных делителей матрицы (8), можно найти множество циклов линейного PPC2 вида (7).

**Следствие**

Из утверждений 5 и 6 следует, что линейный PPC2 вида (7) является полноцикловым (т.е. имеет цикл, состоящий из нуля, и еще один, включающий оставшиеся  $2^n - 1$  элемента), только если  $h = n, e = 1, T_1 = 2^n - 1$ , т.е. если естественная нормальная форма  $M^*$  его характеристической матрицы является сопровождающей матрицей неприводимого над  $GF(2)$  многочлена максимального показателя. (Напомним, что многочлен степени  $n$  над полем  $GF(p)$  является многочленом максимального показателя, если его показатель равен  $p^n - 1$ .) В этом случае  $M^*$  имеет всего одну клетку, порядка  $n$ , и PPC2 является подобным ([1], гл.1, п. 17.8), а следовательно, и эквивалентным ([1], глава 2, п.11.6 и п. 10.1) какому-то регистру сдвига с одной обратной связью.

Как видно из анализа примеров случаев,  $\alpha_n = 1$  и  $\alpha_n = 0$  при нахождении функций  $f_i$ , необходимых для вычисления элементарных делителей характеристической матрицы (8), при  $\alpha_n = 0$  либо функция  $f_n$  распадается на произведение, по крайней мере, двух неприводимых многочленов, либо имеются нетривиальные многочлены  $f_n$  и  $f_{n-1}$ , что означает, что в этом случае множество элементарных делителей содержит по крайней мере два элемента, а следовательно,  $M^*$  имеет более одной клетки. Значит, для того чтобы PPC2 вида (7) был полноцикловым,

необходимо, чтобы выполнялось  $\alpha_n = 1$ . Отсюда и из представления (10) получаем

**Утверждение 7 (Критерий  
полноцикловости линейного РРС2)**

Регулярный РС2 над полем GF(2) с линейными функциями обратной связи является полноцикловым тогда и только тогда, когда он имеет вид

$$\delta = \begin{cases} p_1(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = x_2, \\ \dots \\ p_{n-2}(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = x_{n-1}, \\ f(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = x_n + x_1 \cdot \alpha_1 + \\ + (x_2 \cdot \alpha_2 + \dots + x_{n-1} \cdot \alpha_{n-1}), \\ g(x_1, \dots, x_{n-1}, x_n) = x_n \cdot \beta_n + x_1 \cdot \beta_1 + \\ + (x_2 \cdot \beta_2 + \dots + x_{n-1} \cdot \beta_{n-1}); \end{cases}$$

где  $\begin{vmatrix} \beta_n & \beta_1 \\ 1 & \alpha_1 \end{vmatrix} \equiv 1$  и константы  $\alpha_2, \dots, \alpha_{n-1},$

$\beta_2, \dots, \beta_{n-1}$  таковы, что многочлен

$$f_n = 1 + x \cdot (\beta_2 + \alpha_1 + \alpha_2 \beta_n) + x^2 \cdot (\beta_3 + \alpha_2 + \alpha_3 \beta_n) + \\ + x^{n-2} \cdot (\beta_{n-1} + \alpha_{n-2} + \alpha_{n-1} \beta_n) + x^{n-1} \cdot (\beta_n + \alpha_{n-1}) + x^n$$

является неприводимым над полем GF(2) многочленом максимального показателя.

При непосредственном конструировании полноцикловых линейных РРС2 можно воспользоваться таблицами неприводимых многочленов максимального показателя над полями невысоких порядков, приведенных в [1] и других источниках.

**Библиографический список**

1. Гилл А. Линейные последовательностные машины. – М.: Наука, 1974.
2. Лидл Р., Нидеррайтер Г. Конечные поля, в 2-х т. – М.: Мир, 1988.
3. Носов В.А. Комбинаторика и теория графов: Учебное пособие. МГИЭМ. – М., 1999.
4. Носов В.А. Специальные главы дискретной математики: Учебное пособие. – М., 1990.
5. Применко Э.А., Скворцов Э.Ф. Об условиях регулярности конечных автоматов // Дискретная математика. – 1990. – Т. 2. – Вып. 1. – С 26–30.
6. Холл М. Комбинаторика. – М.: Мир, 1970.
7. Шнайер Б. Прикладная криптография 2е издание.
8. Яблонский С. В. Введение в дискретную математику. – М.: Высшая школа, 2002.
9. Golomb S.W. Shift Register Sequences San-Francisco: Holden-Day, 1976.

АННОТАЦИИ / ABSTRACTS

**Розгачева И.К. ТОПОЛОГИЯ ВСЕЛЕННОЙ И КАЛИБРОВОЧНАЯ ИНВАРИАНТНОСТЬ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ.**

Рассмотрена связь калибровочной симметрии электродинамики Максвелла и топологии мира Минковского. Показано, что калибровочной симметрии как динамической симметрии комплексного скалярного поля может соответствовать компактное однородное и изотропное пространство-время.

**Rozgacheva I.K. TOPOLOGY OF SPACE AND THE GAUGE SYMMETRY OF ELECTRODYNAMICS.**

The connection of the gauge symmetry of Maxwell electrodynamics and the topology of the Minkowsky space is considered. It is shown the gauge symmetry as the dynamical symmetry of complex scalar field may be connected with the compactness of the homogeneous and isotropic space-time.

**Розгачева И.К., Кувшинова И.Б. ФРАКТАЛЬНАЯ СТРУКТУРА МЕЖГАЛАКТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ В СКОПЛЕНИЯХ ГАЛАКТИК.**

Выполнен статистический анализ свойств 59 рентгеновских скоплений галактик. Найдены корреляции между дисперсией скоростей галактик  $\sigma$  и рентгеновской температуры  $T_x$  межгалактического газа:  $\sigma \propto T_x^{0,52}$ , и антикорреляция между оптической светимостью межгалактического газа  $L_{H\alpha}$  и дисперсией скоростей галактик  $L_{H\alpha} \propto \sigma^{-0,25}$ . Показано, что эти корреляции свидетельствуют о том, что скопление является стационарной системой, но межгалактический газ имеет неоднородную структуру во всем объеме скопления.

**Rozgacheva I.K., Kuvshinova I.B. THE DISTRIBUTION OF INTERCLUSTER GAS IN CLUSTERS OF GALAXIES.**

The statistical analysis of the properties of 59 X-ray clusters of galaxies is done. The correlations between the velocity dispersion of galaxies  $\sigma$  and X-ray temperature  $T_x$  of intercluster gas:  $\sigma \propto T_x^{0,52}$ , and anticorrelations between the optical luminosity of intercluster gas  $L_{H\alpha}$  and velocity dispersion of galaxies  $L_{H\alpha} \propto \sigma^{-0,25}$ . It is shown these correlations indicate that each cluster is stationary system but intercluster gas has the inhomogeneous distribution in the whole volume of the cluster.

**Гончаренко А.И. Гончаренко С.А. СОПРЯЖЕННЫЕ СВЯЗИ СЕРДЦА.**

Изучение специфической, не познанной до сих пор роли сердца в организме человека и того огромного влияния, которое оно оказывает на всю сферу человеческой жизнедеятельности, идет во многих научных центрах мира. Мы уже рассказывали нашим читателям (см. статью М. Фигуры в «Дельфисе» №4 за 2002 г.), что подобные исследования проводятся, например, в Институте Heart Math и Стенфордском университете в США, в университете Саутемптон в Англии. В этом номере журнала мы предлагаем познакомиться с научными выводами в данной области российских ученых, полученными на основе уникальных экспериментов, проведенных в нашей стране. В статье А.И. Гончаренко описываются сложнейшие эксперименты над животными, которые и позволили ученым прийти к выводам огромной важности о неизвестных доселе возможностях сердца. Будем помнить, что без экспериментов над животными, к сожалению, пока не обходится ни одно значительное открытие в области биологии и медицины. Но во всем важен глубинный мотив. Изучая сущность живого, человек лучше понимает не только себя, но и животный мир, в конце концов, помогая всей Природе в целом.

**Коноплев А.О. ПРИМЕНЕНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ПОИСКА СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК ПО ДАННЫМ КАТАЛОГА 2DFRGS.**

Описан двумерный метод вейвлет-анализа для исследования распределения галактик на небесной сфере. Вейвлет-анализ позволяет определить положение и размер каждой структуры, которую образуют галактики. На примере каталога галактик 2dFRGS (2001) и каталога скоплений галактик Rich Clusters of Galaxies (Abell+ 1989) показано, что предложенный метод позволяет обнаруживать скопления галактик с вероятностью не ниже 75 %.

**Konoplev A.O. WAVELET-ANALYSIS TO STUDY THE GALAXY DISTRIBUTION ON THE CELESTIAL SPHERE.**

Two-dimensional wavelet-analysis to study the galaxy distribution on the celestial sphere is considered. The wavelet-analysis enables us to find the position and the dimension for each individual feature which may be formed by galaxies. It is shown the described method gives the position of the clusters of galaxies with probability below 75 % for the catalog 2dFRGS (2001) and the catalog Rich Clusters of Galaxies (Abell+ 1989).

**Натяганов В.Л. НЕОРДИНАРНЫЕ ЯВЛЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.**

Вместе с кратким историческим экскурсом в работе представлена электрокапиллярно-вихревая модель шаровой молнии, объясняющая все основные свойства и мнимые парадоксы этого феномена атмосферного электричества. Обсуждается модель возможного сценария образования шаровой молнии в разрядном канале линейной молнии через промежуточную стадию четочной молнии.

**Natyaganov V.L. NONORDINARY EFFECTS OF ATMOSPHERIC ELECTRICITY.**

With the brief historical excursus this work presents electrocapillaryvortical model of a ball lightning, explaining all the main properties and sham paradoxes of this phenomenon of atmospheric electricity.

This work also discusses the model of probable scenario of a ball lightning formation in the discharge channel of a streak lightning through the intermediate stage of a beaded lightning.

**Воейков В.Л., Чалкин С.Ф., Асфарамов Р.Р. ИНИЦИИРОВАНИЕ СВЕЧЕНИЯ ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА УФ-ФОТОНАМИ.**

При поглощении смачивающей гигроскопичную поверхность пленкой воды УФ-фотонов, способных расщеплять молекулы воды, в пленке происходит вспышка излучения фотонов в УФ и видимой области спектра. Она инициирует в контактирующем с пленкой влажном воздухе реакции, сопровождаемые генерацией электронного возбуждения. Возбуждение распространяется по воздуху на макроскопические расстояния, причем с увеличением влажности воздуха возрастает степень усиления переносимого возбуждения, а при повышении влажности выше 50 % возбуждение воздуха приобретает колебательно-волновой характер.

**Сизов А.Д. НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ КОСМОФИЗИЧЕСКИХ КОРРЕЛЯЦИЙ.**

Обнаруженные Мишелем Гокленом [6] корреляции между частотой рождений людей с определенными психофизиологическими характеристиками и положением планет Солнечной системы вблизи плоскости горизонта или небесного меридиана рассматриваются как результаты различий в поглощенной дозе проникающего космического излучения, источниками которого являются некоторые звезды. Предполагается, что проекция планеты на область неба, содержащую источник излучения, приводит к увеличению длительности воздействия и, следовательно, величины поглощенной дозы.

**Бурков В.Д., Крапивин В.Ф. ГИМС-ТЕХНОЛОГИЯ В МОНИТОРИНГЕ РАСТИТЕЛЬНЫХ ПОКРОВОВ.**

Основная цель данного доклада состоит в обсуждении следующих задач: 1) разработка методики совместного использования технологии моделирования, оптических и микроволновых дистанционных измерений для оценки ослабления электромагнитных волн в растительном покрове и расчета его биометрических характеристик, 2) расчет уточненных характеристик для различных типов почвенно-растительных формаций, 3) оценка перспективы применения развитой технологии для решения задач глобальной экодинамики. Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (грант 04-01-00047а).

**Burkov V.D., Krapivin V.F. THE SOIL-VEGETATION SYSTEM CONTROL.**

The main goal of this report is the discussion of the following problems: 1) elaboration of the methodics for combined use of modeling technology, optical and microwave remote measurements to assess the attenuation of electromagnetic waves into the vegetation cover and to evaluate its biometric characteristics, 2) more precise computation of these characteristics for different soil-plant formations, and 3) assessment of the perspective in the use of developed technology to solve the problems of global ecodynamics. This study was supported by the Russian Fund for Basic Research (Project No. 04-01-00047a).

**Головачев С.П., Крапивин В.Ф., Чухланцев А.А., Шутко А.М. ОСНОВАННЫЙ НА ГИМС-ТЕХНОЛОГИИ МЕТОД МИКРОВОЛНОВОГО МОНИТОРИНГА РАСТИТЕЛЬНОСТИ.**

Обсуждаются современные достижения в области изучения глобального круговорота углерода с применением методов математического моделирования. Анализируются подходы к синтезу моделей глобального круговорота углерода. Рассматриваются проблемы изменения глобального климата в связи с ростом концентрации углекислого газа в атмосфере и оцениваются вклады наземной биоты и Мирового океана в эти изменения. Предлагается новая концепция глобальных изменений окружающей среды, основанная на интеграции знаний в рамках системы адаптивного геоинформационного мониторинга.

**Golovachev S.P., Krapivin V.F., Chukhlantsev A.A., Shutko A.M. MICROWAVE RADIOMETRY RELATED TO THE SOIL-VEGETATION SYSTEM CONTROL.**

The understanding of long- and short-term global climate change, and the possible anthropogenic contributions to such change, requires an analysis of both knowledge and observational data on present climate changes and the causes of these changes. Emission of greenhouse gases in the atmosphere, in particular carbon dioxide, is considered one of the principal causes of expected climate warming, with consequent of negative effects for humankind. This report suggests a new approach to the problem of assessing the impact of anthropogenic processes on the greenhouse effect dynamics both in global and regional scales.