



Вестник Российского фонда фундаментальных исследований

№ 4 (96) октябрь–декабрь 2017 года

Основан в 1994 году

Зарегистрирован Комитетом РФ по печати, рег. № 012620 от 03.06.1994

Сетевая версия зарегистрирована Роскомнадзором, рег. № ФС77-61404 от 10.04.2015

Учредитель

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Российский фонд фундаментальных исследований»

Главный редактор В.Я. Панченко,
заместители главного редактора В.В. Квардаков и В.Н. Фридлянов

Редакционная коллегия:

В.П. Анаников, В.Б. Бетелин, К.Е. Дегтярев, И.Л. Еременко,
В.П. Кандидов, П.К. Кашкаров, В.П. Матвеевко, Е.И. Моисеев,
А.С. Сигов, В.А. Ткачук, Р.В. Петров, И.Б. Федоров,
Д.Р. Хохлов, В.А. Шахнов

Редакция:

А.П. Симакова], Е.Б. Дубкова, Н.В. Круковская

Адрес редакции:

119334, г. Москва, Ленинский проспект, 32а

Тел.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru



Russian Foundation for Basic Research Journal

N 4 (96) October–December 2017

Founded in 1994

Registered by the Committee of the Russian Federation for Printed Media, 012620 of 03.06.1994 (print)

Registered by the Roskomnadzor FS77-61404 of 10.04.2015 (online)

The Founder

Federal State Institution

“Russian Foundation for Basic Research”

Editor-in-Chief V. Panchenko,

Deputy chief editors V. Kvardakov and V. Fridlyanov

Editorial Board:

V. Ananikov, V. Betelin, K. Degtyarev, I. Eremenko,
V. Kandidov, P. Kashkarov, V. Matveenko, E. Moiseev,
A. Sigov, V. Tkachuk, R. Petrov, I. Fedorov,
D. Khokhlov, V. Shakhnov

Editorial staff:

A. Simakova, E. Dubkova, N. Krukovskaya

Editorial address:

32a, Leninskiy Ave., Moscow, 119334, Russia

Tel.: (499) 995-16-05

e-mail: pressa@rfbr.ru

«Вестник РФФИ»
№ 4 (96) октябрь–декабрь 2017 г.

КОЛОНКА ТЕМАТИЧЕСКОГО РЕДАКТОРА

О редакторе тематического блока члене-корреспонденте РАН, профессоре В.А. Шахнове	6
<i>В.А. Шахнов</i> Аннотация к тематическому блоку	8

ТЕМАТИЧЕСКИЙ БЛОК:
ИЗБРАННЫЕ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫЕ СТАТЬИ 2017 ГОДА

<i>Е.С. Седов</i> О превращениях фотонов и управлении светом в слоистой полупроводниковой структуре . . .	11
<i>А.Ю. Сухоруков, С.Л. Иоффе</i> Уротропин: дремавшая история и пробуждение	20
<i>В.В. Еремин, А.С. Белов, И.О. Глебов, М.И. Козлов, В.В. Поддубный, Д.В. Хохлов</i> Роль белка в первичных световых стадиях фотосинтеза	32
<i>М.В. Бобровский</i> Новые парадоксы старых дубрав	44
<i>П.В. Микшина</i> Причины и следствия разнообразия углеводов, или три «сахарных» истории из жизни одного растения	56
<i>И.Б. Алиева, Р.Э. Узбеков</i> Эволюция механизмов клеточного деления – длинный путь от случайного к закономерному	66
<i>С.В. Попов</i> Мир, скованный льдом	78
<i>В.Ф. Петренко, А.П. Супрун</i> Познание реальности или ее конструирование?	90
<i>Э.Г. Аргинбаева, О.А. Базылева, О.Г. Оспенникова, Е.Ю. Летникова (Туренко), А.В. Шестаков</i> Интерметаллидные никелевые сплавы для авиационных газотурбинных двигателей	107

"RFBR Journal"
N 4 (96) October–December 2017

THEMED ISSUE EDITOR’S COLUMN

About the Editor of the Themed Section RAS Corresponding Member, Professor V.A. Shakhnov ... 7

V.A. Shakhnov
 Abstract of the Themed Section 9

**THEMED SECTION:
 SELECTED POPULAR SCIENTIFIC ARTICLES OF 2017**

E.S. Sedov
 On Photons Transformation and Light Control in the Layered Semiconductor Structure 11

A.Yu. Sukhorukov, S.L. Ioffe
 Urotropine: Sleeping History and Awakening 20

V.V. Eremin, A.S. Belov, I.O. Glebov, M.I. Kozlov, V.V. Poddubnyy, D.V. Khokhlov
 The Protein Role in the Primary Light-Dependent Stages of Photosynthesis 32

M.V. Bobrovsky
 New Paradoxes of the Ancient Oak Forest 44

P.V. Mikshina
 The Causes and Consequences of the Carbohydrate Diversity,
 or Three “Sugar” Stories From the Life of a Single Plant 56

I.B. Alieva, R.E. Uzbekov
 The Evolution of Cell Division Mechanisms – a Long Way from a Random
 to the Regularity 66

S.V. Popov
 The Icebound World 78

V.F. Petrenko, A.P. Suprun
 Cognition or Designing of Reality? 90

E.G. Arginbaeva, O.A. Bazyleva, O.G. Ospennikova, E.Yu. Letnikova (Turenko), A.V. Shestakov
 Intermetallic Nickel Alloys for Aircraft Gas-Turbine Engines 107

Вадим Анатольевич Шахнов родился 29 января 1941 г. в Москве. В 1958 г. окончил среднюю школу и в 1959 г. поступил во Фрунзенский политехнический институт (Киргизская ССР). В 1961 г. перевелся в Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана, которое окончил с отличием в 1966 г. по специальности «Математические и счетно-решающие приборы и устройства» и был распределен в НИИ точной технологии НПО «Научный центр» Минэлектронпрома СССР. За двадцать лет работы на предприятиях НПО «Научный центр» прошел путь от инженера до начальника отделения, затем работал заместителем начальника отдела Государственного комитета СССР по науке и технике, заместителем директора Координационного центра Межправительственной комиссии по сотрудничеству социалистических стран в области вычислительной техники. В 1991 г. был принят на должность заведующего кафедрой в МГТУ им. Н.Э. Баумана, где и работает по настоящее время.

В.А. Шахнов — известный ученый в области проектирования магнитопленочной памяти вычислительных машин, микропроцессорных больших интегральных схем и средств вычислительной техники на их основе, наноинженерии, информационных технологий. За разработку и внедрение в промышленность микропроцессорных больших интегральных схем, применение их в средствах вычислительной техники, измерительной технике, изделиях специального назначения В.А. Шахнову были присуждены Государственная премия СССР, премии Совета Министров СССР и Правительства Российской Федерации. Им создана научная школа «Конструкторско-технологическая информатика в радиоэлектронике», неоднократно получавшая гранты Президента РФ.

В последние годы В.А. Шахнов занимается развитием нового направления в информатике: информационными технологиями в наноинженерии, привлекая к научным исследованиям сотрудников кафедры, аспирантов, студентов. Результаты работ в этом направлении неоднократно докладывались на международных и российских конференциях. За вклад в развитие нанонауки и нанотехнологий ему была вручена медаль ЮНЕСКО.

В.А. Шахнов – автор более 270 научных работ, монографий, учебников, учебных пособий, а также 15 изобретений. Он успешно проводит работу по подготовке научных и инженерных кадров (бакалавров, магистров, кандидатов и докторов наук).

About the Editor of the Themed Section RAS Corresponding Member, Professor V.A. Shakhnov

Vadim Anatolevich Shakhnov was born in Moscow on January 29, 1941. In 1958 he graduated from a secondary school and entered Frunze Politechnical Institute (Kyrgyz SSR) in 1959. In 1961 V.A. Shakhnov transferred to Bauman Moscow Higher Technical School (nowadays Bauman Moscow State Technical University – BMSTU) and graduated with honour from it specializing in “Mathematical and computing instruments and devices”. Then he was taken on as an engineer at the Research Institute of Precision Technology of the Research and Production Association (RPA) “Scientific Centre” of Ministry of Electronic Industry of the USSR. Having

been working in RPA “Scientific Centre” for 20 years, V.A. Shakhnov has gone through all the stages of the career starting from an engineer and up to the section chief; then he worked as a Deputy Chief of Department of State Committee on Science and Technology of the USSR, as Deputy Director of the Coordination Center of the Intergovernmental Commission for Cooperation with the Socialist Countries in the Field of Computer Technology. In 1991 he was employed to a post of Head of Department of BMSTU, where he works up to date.

V.A. Shakhnov is a well-known scientist in the sphere of design of the computer magnetic-film memory, microprocessor large integrated circuits and computing machinery based on them, as well as in the field of nanoengineering and information technologies. V.A. Shakhnov was awarded with the State Prize of the USSR, Prizes of the Council of Ministers of the USSR and the Russian Federation Government in Science

В статье П.В. Микшиной «Причины и следствия разнообразия углеводов, или три “сахарных” истории из жизни одного растения» приведены сведения о причинах и следствиях разнообразия углеводов в органическом мире в целом (по сравнению с другими биомолекулами) и в пределах своего класса соединений. На примере рамногалактуронана I – пектинового гетерополисахарида крайне варибельного строения – наглядно обрисованы варианты структурно-функционального разнообразия полисахаридов, сформированных на основании одного типа строения остова в одном растении; приведен обзор данных из различных источников о строении и функциях этих полисахаридов.

И.Б. Алиева и Р.Э. Узбеков в статье «Эволюция механизмов клеточного деления – длинный путь от случайного к закономерному» описывают результаты современных исследований об эволюции механизмов клеточного деления живых

организмов, обитающих на планете Земля в настоящее время; как и когда впервые клетки древних организмов «научились» делиться на две равные части; какой эволюционный путь прошли механизмы, позволяющие клеткам воспроизводиться, передавая следующей генерации наследственную информацию.

В работе С.В. Попова «Мир, скованный льдом» приведены некоторые результаты изучения уникального континента – Антарктиды.

В статье В.Ф. Петренко и А.П. Супруна «Познание реальности или ее конструирование?» обсуждается проблема онтологии бытия, а именно одно из положений философии физики – о зависимости или независимости физической реальности от наблюдателя.

Работа Э.Г. Аргинбаевой, О.А. Базылевой и др. посвящена интерметаллидным сплавам на основе никеля – одной из современных альтернатив серийным жаропрочным никелевым сплавам. Применение интерметаллидных сплавов позволит не только повысить рабочие температуры газотурбинных двигателей и их весовую отдачу, но и сэкономить дорогостоящие тугоплавкие элементы.

Представляемый читателю тематический выпуск «Вестника РФФИ» впервые за время деятельности Фонда посвящен избранным научно-популярным статьям – победителям конкурса 2017 г.

Abstract of the Themed Section

V.A. Shakhnov

One of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR, the Foundation) activities is popularization and propagation of science, scientific knowledge, achievements of science and technology, which is implemented through the annually held contests of popular science papers.

The first such contest was held in 1998, and the articles that won the contest were first published as a compendium of popular science articles. Since then the popular science articles compendium is published annually. The contest theme is not regulated strictly, therefore the collections are compiled of diverse articles on various scientific areas written by the scientists, who have won the Foundation's grants. The popularity of the compen-

dium increased year after year, so in order to expand the audience it is published electronically since 2015.

The activity on the formation of the popular science articles collections is continued nowadays and will be supported by the Foundation also in future.

All the authors of the papers included in this issue of “Russian Foundation for Basic Research Journal” are participants of the initiative projects, financially supported by the Foundation, and their research results are presented in the journal's themed section.

The paper by E.S. Sedov “On Photons Transformation and Light Control in the Layered Semiconductor Structure” focuses on the semiconductor structure, which is capable of changing its optical properties in response to external influences and allows observing a number of very interesting optical effects, such as the light slowing down and negative refraction

The paper by A.Yu. Sukhorukov and S.L. Ioffe presents a novel class of heterocage compounds – 1,4,6,10-tetraazaadamantane (iso-urotropine), which

О превращениях фотонов и управлении светом в слоистой полупроводниковой структуре*

Е.С. Седов

Разработка методов управления светом в настоящее время стала одной из наиболее важных научных и инженерных проблем. Как повлиять на световое излучение, если оно невосприимчиво к внешним воздействиям? Достаточно превратить его в поток квазичастиц экситон-поляритонов, для управления которыми есть целый спектр возможностей. Одна из них – использовать внешнее электрическое поле. Настоящая статья рассказывает об одной структуре, в которой происходит превращение фотонов в поляритоны, которая способна менять свои оптические свойства в ответ на внешнее воздействие и позволяет наблюдать ряд интереснейших оптических эффектов, таких как замедление скорости света и отрицательное преломление.

Ключевые слова: замедление света, квантовая яма, отрицательное преломление, поляритон, фотонный кристалл.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-12-20091).

Введение

Природа света и методы управления им занимали ученые умы с древних времен. Наивные античные представления о свете как о божественном огне, зажженном в глазах людей богиней любви Афродитой¹, переросли в отдельную научную область, в которой природа света раскрывается со множества позиций, порой противоречащих друг другу, но тем не менее успешно объясняющих поведение света.

В наш век технического прогресса и миниатюризации проблема управления светом встает в полный рост. Фотонные приборы все чаще приходят на смену электронным. Разрабатываются оптические микросхемы, логические элементы, оперирующие фотонами, новейшие источники излучения. Все это – для достижения далекой, но осязаемой цели: создания вычислительного

устройства, работающего на принципах фотоники, а не электроники.

Почему фотонные вычисления стали такой горячей темой в научной среде, какие преимущества они сулят и какие препятствия нужно преодолеть, чтобы все заработало, – любопытные вопросы к размышлению, освещенные в современной научной и популярной литературе [1, 2]. Данная статья преследует более узкую задачу: познакомить читателя с одним из способов управления светом, который заключается в том, чтобы на время превратить свет в нечто иное, что более охотно поддается внешнему контролю. Во что превращается свет, когда попадает в вещество? Как замедлить свет? Как заставить свет преломляться в противоположную сторону? Ответы на эти вопросы уважаемый читатель найдет в настоящей статье.

Во что превращается свет в веществе?

В современной науке уверенное лидерство в описании природы света принадлежит идее корпускулярно-волнового дуализма, в соответствии с которой свет одновременно обладает как волновыми,

¹Ценители высокого слога могут ознакомиться с этим красивым взглядом на сущность света в поэме «О природе» древнегреческого философа Эмпедокла.



СЕДОВ Евгений Сергеевич

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых

так и присущими частицам свойствами. Возможность выбирать, в каком качестве будет вступать свет в том или ином явлении, оказывается крайне удобной. Так, эффекты интерференции и дифракции стройно укладываются в представление о свете как о волне. В то же время при описании взаимодействия света с веществом часто оказывается проще рассматривать свет как поток элементарных частиц – фотонов, переносящих заданную порцию или квант энергии.

Рассмотрим следующий мысленный эксперимент. Возьмем полупроводниковый кристалл и на одну из его граней направим пучок монохроматического света. Что мы увидим по другую сторону от кристалла? Это зависит от череды «если». Если материал прозрачен для света заданной длины волны, а кристаллическая решетка не изобилует дефектами, то на выходе мы также получим световой пучок. Гораздо менее очевиден ответ на другой вопрос: что представляет собой свет на пути от одной грани кристалла к другой? Этот ответ был дан еще в середине прошлого века в работах [3–5]. Было показано, что фотоны света, попадая в кристалл, связываются с формирующимися в нем экситонами и образуют экситон-поляритоны. Итак, все главные герои статьи названы. Познакомимся с ними ближе.

Экситон – это электрически нейтральная квазичастица, рождающаяся в полупроводнике в ответ на воздействие светом. Экситон рождается, когда электрон в валентной зоне полупроводникового кристалла возбуждается фотоном и переходит в зону проводимости, при этом в валентной зоне образуется дырка – квазичастица с положительным зарядом, равным элементарному заряду. Возникшее связанное состояние электрона проводимости и дырки отныне ведет себя как единое целое. Подробнее об экситонах см. работу [6].

Как и у всякой квазичастицы, век у экситона недолог: время его жизни в зависимости от условий эксперимента составляет в лучшем случае десятки пикосекунд. По истечении этого времени электрон-дырочная пара рекомбинирует: электрон возвращается в валентную зону, излучая фотон – точно такой же, какой понадобился, чтобы образовать экситон.

Дальнейший путь испущенного фотона предельно ясен: он возбудит новый электрон в валентной зоне и в результате породит очередной экситон. И все по новой. На самом деле, в этой цепочке последовательных перерождений в каждый отдельный момент времени мы не можем с уверенностью сказать, с чем конкретно имеем дело: с испущенным в очередной раз фотоном или с вновь рожденным экситоном. Теперь для нас в кристалле существует

лишь некоторое смешанное экситон-фотонное состояние, которое называется экситон-поляритоном. Для краткости также будем звать его просто поляритоном (рис. 1). Благодаря экситонной компоненте поляритоны оказываются более подвержены внешнему воздействию, чем фотоны. В связи с этим выполнение простого трехшагового алгоритма: превратить фотоны в поляритоны, заставить поляритоны вести себя нужным образом, превратить поляритоны обратно в фотоны, – открывает широкие возможности по управлению светом. Этот алгоритм может быть успешно реализован в предложенной недавно в работах [7, 8] полупроводниковой структуре.

Полупроводниковый «бутерброд» с поляритонами

Схематично структура, находящаяся в фокусе нашего внимания, изображена на рисунке 2. Она подобна многослойному «бутерброду»: в ее основе лежит последовательность чередующихся полупроводниковых слоев из двух разных материалов. Слои отличаются друг от друга толщиной (d_1 и d_2) и величиной показателя преломления (n_1 и n_2). Структуры такого рода известны как одномерные фотонные кристаллы. Их важным атрибутом является возникновение в них фотонных запрещенных зон. Фотоны, обладающие энергией, принадлежащей одной из таких зон, не могут распространяться в кристалле: они отражаются от структуры при попытке попасть в нее извне и «замораживаются» внутри структуры, если каким-то образом родились внутри нее. Если $|n_2 - n_1| \ll n_{1,2}$, то запрещенные зоны образуются вокруг частот ω_{Brj} , определяемой как

$$\omega_{Brj} = \frac{j\pi c}{n_1 d_1 + n_2 d_2},$$

где c – скорость света в вакууме, j – номер запрещенной зоны.

Однако одномерный фотонный кристалл – это еще не вся струк-

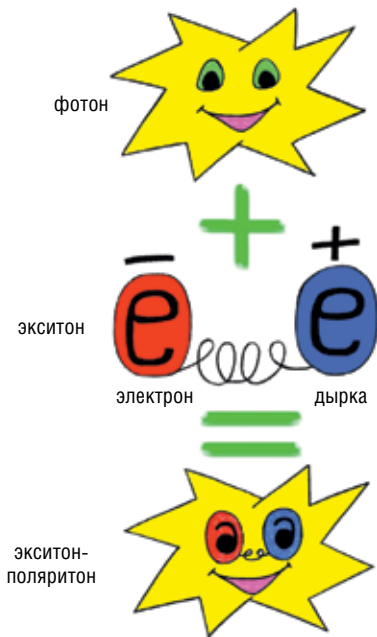


Рис. 1. Иллюстрация к определению экситон-поляритона. Экситон-поляритон – это комбинация фотона и экситона в полупроводниковой среде.

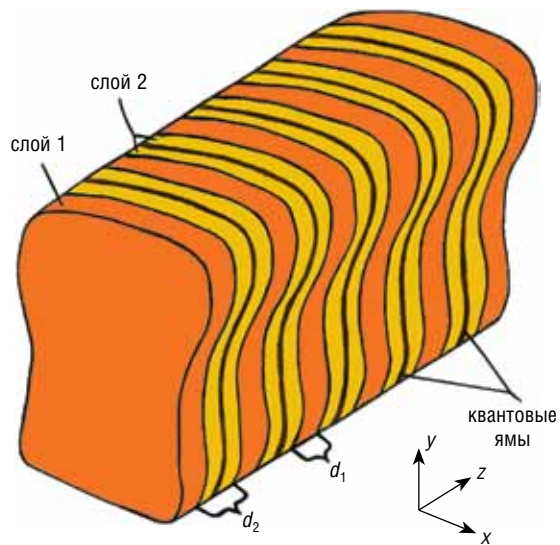


Рис. 2. Схематичное изображение слоистой полупроводниковой структуры, позволяющей управлять светом. Форма сечения в плоскости xy может выбираться произвольно.

тура, о которой ведется речь. Чтобы окончательно завершить образ, в центр каждого из слоев одного типа необходимо поместить квантовую яму – узкий полупроводниковый слой, создающий в структуре потенциальную яму для электронов и дырок. Материал и толщина квантовой ямы выбираются таким образом, чтобы частота формирующихся в них экситонов была близка ко второй фотонной запрещенной зоне с центральной частотой ω_{Br2} .

Итак, фотоны, попадая в предложенную структуру, перестают быть фотонами в чистом виде. Они связываются с экситонами в квантовых ямах, образуя поляритоны. Последние, являясь собственными модами структуры, обладают дисперсией, т.е. зависимостью их энергии E (частоты $\omega = E/\hbar$, где \hbar – постоянная Планка) от волнового вектора $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$, отличной от дисперсий несвязанных фотонов и экситонов.

Отметим важный момент, касающийся природы поляритонов. Для каждого волнового вектора вблизи частоты ω_{Br2} может образовываться целых четыре типа по-

ляритонов: каждая из двух фотонных мод выше и ниже запрещенной зоны способна связываться с экситонами. Однако величина расщепления дисперсионных ветвей достаточно велика и может достигать десятков терагерц. Это позволяет рассматривать поляритоны всех четырех ветвей независимо друг от друга, пренебрегая переходами между ветвями. В настоящей статье мы будем иметь дело с поляритонами, принадлежащими дисперсионной ветви с самой низкой из четырех частотой.

Управляя дисперсией – управляешь светом

Немного упростим нашу модель. Поскольку в плоскости (x, y) структура в каждом слое является однородной, т.е. направления x и y равноправны, введем эффективную координату

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Чтобы изменить дисперсионную зависимость экситон-поляритонов $\omega(k_\rho, k_z)$, достаточно изменить дисперсию одной из поляритонных составляющих: фотона или экситона. Последние более чувствительны к внешним воздействиям различного рода, таким как температура, электрическое и магнитное поля, механические деформации образца и др. Необязательно использовать все воздействия сразу: достаточно ограничиться одним. Наш выбор в данной статье – электрическое поле, приложенное к структуре в направлении, перпендикулярном оси ее роста (оси z).

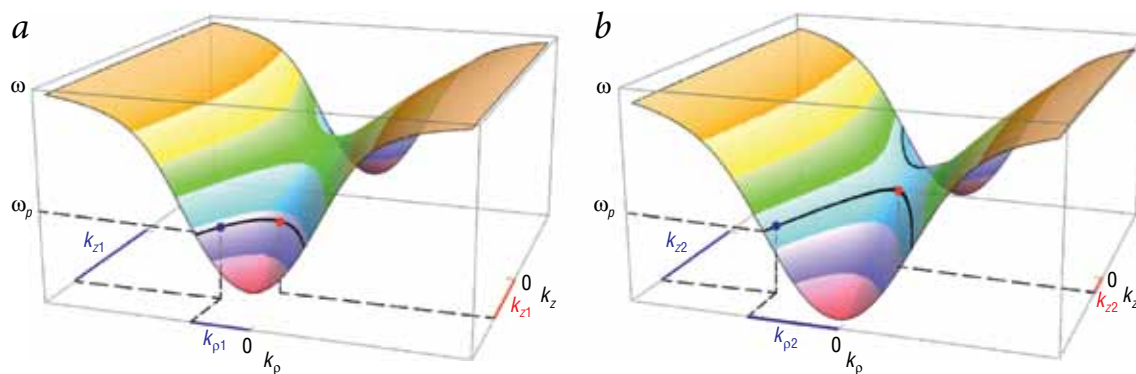


Рис. 3. Схематичное изображение дисперсии экситон-поляритонов в периодической структуре с квантовыми ямами при двух разных значениях скорости излучательной релаксации Γ : а – 3 ps^{-1} , б – 8 ps^{-1} .

Дисперсия экситона, в числе прочих, значительным образом определяется скоростью излучательной релаксации Γ , которая характеризует обратное время жизни экситона $\tau = 1/2\Gamma$, по истечении которого тот рекомбинирует, испуская фотон. Параметр Γ существенно зависит от внешнего электрического поля.

Электрон и дырка, образующие экситон, пространственно разделены благодаря присутствию в квантовой яме внутреннего электрического поля. Положение частиц в квантовой яме описывается волновыми функциями, которые перекрываются друг с другом. Чем электрон и дырка дальше друг от друга, т.е. чем меньше перекрытие их волновых функций, тем больше время жизни образуемого ими экситона. Обратное также справедливо.

Что произойдет, если к квантовой яме приложить внешнее электрическое поле, сонаправленное с внутренним? Первое будет усиливать действие второго. Поскольку электрон и дырка противоположно заряжены, они будут отдаляться друг от друга по мере усиления приложенного поля. При этом

время жизни экситона, очевидно, будет возрастать. Если изменить направление внешнего поля, то зависимость τ от величины напряженности будет более сложной. Вначале с возрастанием напряженности внешнего поля действие внутреннего поля на электрон и дырку будет ослабляться: увеличение перекрытия волновых функций частиц будет сопровождаться уменьшением времени жизни экситона. В условиях, когда внешнее поле полностью компенсирует внутреннее, экситон живет максимально короткое время. По мере дальнейшего усиления внешнего поля оно начинает превосходить внутреннее. Это вновь ведет к удалению электрона и дырки друг от друга и увеличению времени жизни экситона. Для различных материалов использование полей напряженностью до десятков мегавольт на сантиметр позволяет изменять значения времени жизни экситонов τ и скорости излучательной релаксации Γ в пределах нескольких порядков.

Схематично дисперсионные поверхности поляритонов нижней ветви для двух значений скорости излучательной релаксации Γ изображены на рисунке 3. Зависимость дисперсии $\omega(k_x, k_y)$ от Γ имеет следующие качественные особенности. Во-первых, с увеличением Γ центральная часть дисперсионной поверхности (для $k_x, k_y \rightarrow 0$) сдвигается вниз по шкале частот. Во-вторых, изменяется кривизна дисперсионной поверхности. Количественно



Рис. 4. Иллюстрация к вопросу о возникновении эффективной массы поляритонов во внешнем потенциале U . Эффективная масса может на многие порядки отличаться от реальной массы частицы, а также быть отрицательной.

кривизну описывает такая характеристика экситон-поляритонов, как эффективная масса m^* . Фактически она означает следующее. Если частица движется в некотором потенциале U под действием внешней силы \vec{F} , то это движение можно описать как движение частицы с массой m^* в свободном пространстве. Иллюстрация к вопросу появления эффективной массы частицы во внешнем потенциале приведена на *рисунке 4*. Главным, что отличает реальную массу частицы от эффективной массы, является то, что последняя представляет собой тензор, т.е. выбор направления существенно влияет на движение частицы. Компоненты тензора эффективной массы задаются как

$$m_p^* = \hbar \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial k_p^2} \right)^{-1}, \quad m_z^* = \hbar \left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial k_z^2} \right)^{-1}.$$

Замечательным свойством тензора m^* является то, что его компоненты могут быть отрицательными. Оба этих свойства отражаются на экситон-поляритонах в нашей структуре следующим образом: эффективная масса поляритонов в плоскости квантовой ямы является положительной, а в направлении роста структуры – отрицательной, т.е. $m_p^* > 0$ и $m_z^* < 0$.

Замедление света и аномальное преломление

Благодаря своим необычным дисперсионным свойствам предложенная структура позволяет наблю-

дать ряд замечательных эффектов. Первый эффект, которому мы уделим внимание, – это замедление света. Конечно же, говоря о свете, мы помним, что в структуре он находится в связанном состоянии – в виде экситон-поляритонов. По определению групповая скорость \vec{v} есть градиент частоты по волновому вектору; ее компоненты в направлениях p и z задаются как

$$v_p = \frac{\partial \omega}{\partial k_p}, \quad v_z = \frac{\partial \omega}{\partial k_z}.$$

Хотя зависимость групповой скорости от k_p и k_z является достаточно сложной, она имеет одну общую особенность: величина групповой скорости поляритонов тем меньше, чем ближе значения k_p и k_z к нулю. В предельном случае, когда обе компоненты волнового вектора равны нулю, поляритоны локализуются в структуре: «громкими» словами этот эффект можно назвать «остановкой» света (*рис. 5*).

Как же заставить поляритоны изменить их волновой вектор и, как следствие, групповую скорость? Ответ на этот вопрос очень прост: нужно изменить дисперсионные свойства среды, т.е. модифицировать характер зависимости $\omega(k_p, k_z)$.

Вновь обратимся к мысленному эксперименту. Рассмотрим структуру, обладающую дисперсией $\omega_1(k_p, k_z)$ при скорости излучательной релаксации экситонов Γ_1 . Зависимость $\omega_1(k_p, k_z)$ схематично изображена на *рисунке 3а*. Предположим, что пучок света с частотой $\omega_p < \omega_1(0, 0)$ входит в структуру перпендикулярно плоскости квантовой ямы, т.е. вдоль оси z (*рис. 5а*). В результате этого в ней возбуждаются экситон-поляритоны, компоненты волнового вектора которых задаются следующим образом: $k_{p1} = 0$, а значение k_{z1} определяется из условия $\omega_1(0, k_{z1}) = \omega_p$; соответствующее состояние отмечено красной точкой на дисперсионной поверхности на (*рис. 3а*).

Теперь приложим к структуре внешнее электрическое поле, при котором экситоны приобретают

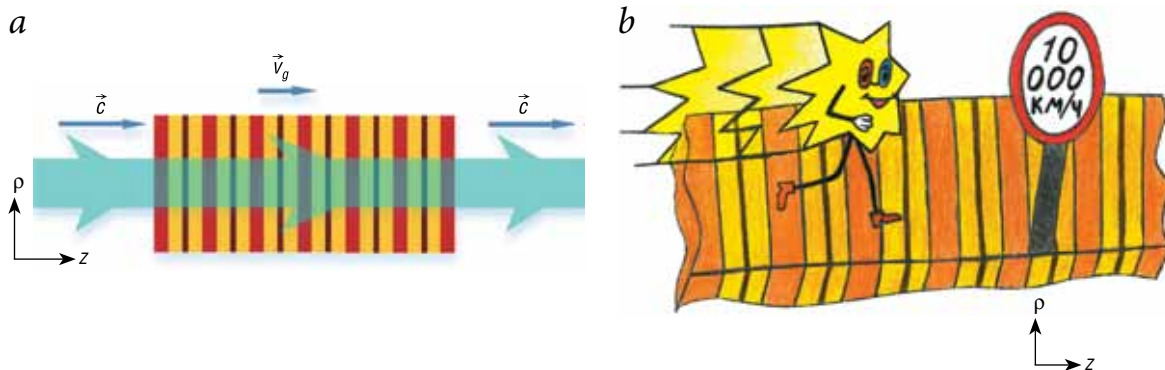


Рис. 5. Схематичное изображение (а) и иллюстрация (б) прохождения света через структуру в направлении ее роста. Групповая скорость поляритонов внутри структуры v_g меньше скорости фотонов вне структуры c .

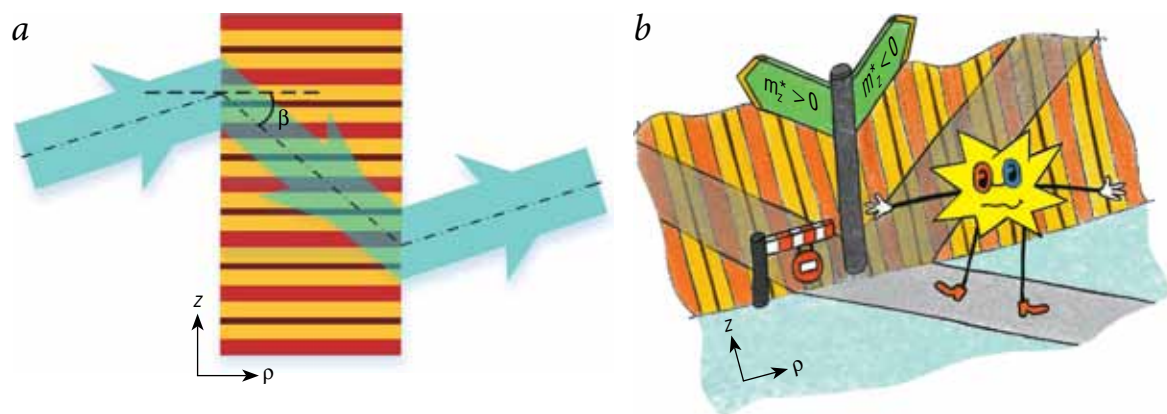


Рис. 6. Схематичное изображение (а) и иллюстрация (б) отрицательного преломления света в структуре при наклонном падении светового пучка. Отрицательное преломление тесно связано с возникновением отрицательной эффективной массы поляритонов m_z^* в направлении роста структуры z .

новую скорость излучательной релаксации и, как следствие, новую дисперсионную зависимость $\omega_2(k_p, k_z)$ (схематично изображена на рисунке 3б). Для определенности допустим $\Gamma_2 > \Gamma_1$. Чтобы выполнялся закон сохранения энергии, поляритоны вынуждены изменить свой волновой вектор так, чтобы ему соответствовала частота, равная ω_p . При этом $k_{p2} = k_{p1} = 0$, в то время как k_{z2} определяется из условия $\omega_2(0, k_{z2}) = \omega_p$: соответствующее состояние отмечено красной точкой на рисунке 3б. В нашем примере увеличение скорости излучательной релаксации ведет к уменьшению k_z (от значения k_{z1} до k_{z2}) и, как следствие, замедлению поляритонов.

Другой необычный эффект, который наблюдается в предложенной структуре, – это отрицательное преломление света. Заключается он в том, что свет при прохождении границы раздела двух сред с разными показателями преломления отклоняется на отрицательный угол¹. Этот эффект хорошо известен в современной оптике. Его невозможно наблюдать в однородных средах, потому что для этого необходимо, чтобы показатель преломления одной из сред был отрицательным. Однако целый ряд композитных сред создают все условия для его наблюдения. Среди них – метаматериалы и фотонные кристаллы. Наша структура относится к классу фотонных кристаллов. Модификация в виде встроенных квантовых ям позволяет управлять углом преломления при помощи внешнего электрического поля.

Рассмотрим очередной мысленный эксперимент. В этот раз направим широкий монохроматический световой пучок с частотой ω_p под углом к торцу

предложенной структуры (рис. 6а). Мы можем характеризовать структуру некоторым эффективным показателем преломления, который в нашем случае оказывается отрицательным. Это тесно связано с тем фактом, что эффективная масса поляритонов в направлении z является отрицательной, $m_z^* < 0$. При скорости излучательной релаксации Γ_1 в структуре с дисперсией $\omega_1(k_p, k_z)$ поляритоны характеризуются компонентами волнового вектора k_{p1} и k_{z1} . При этом значение k_{z1} сохраняется при пересечении границы раздела сред как следствие сохранения тангенциальных компонент напряженности поля; k_{p1} определяется из условия $\omega_1(k_{p1}, k_{z1}) = \omega_p$. Соответствующее состояние отмечено синей точкой на рисунке 3а. Угол преломления β_1 , задающий угол между направлением распространения сформировавшихся поляритонов и нормалью к границе раздела сред, определяется как

$$\beta_1 = \arctan [k_{z1}/k_{p1}].$$

Приложив к структуре внешнее электрическое поле, изменим ее дисперсионные свойства. Теперь компоненты волнового вектора поляритонов определяются следующим образом. Компонент

¹Если падающий и преломленный лучи лежат по разные стороны от нормали к границе раздела сред, такой угол рассматривают как положительный. При отрицательном преломлении падающий и преломленный лучи лежат по одну сторону от нормали.

Images & Tables

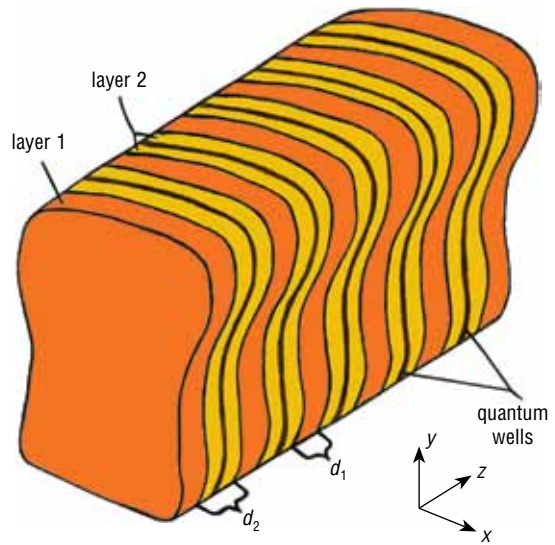
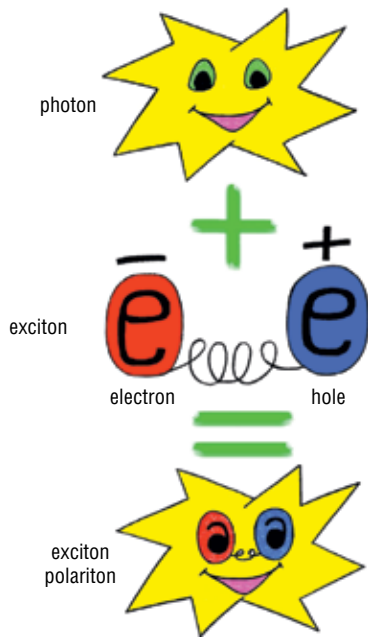


Fig. 1. Illustration on the definition of exciton polaritons. Exciton polariton is a combination of a photon and an exciton in a semiconductor medium.

Fig. 2. Schematic drawing of the layered semiconductor structure allowing one to manage the light. One can choose any shape of the cross section in the xy plane.

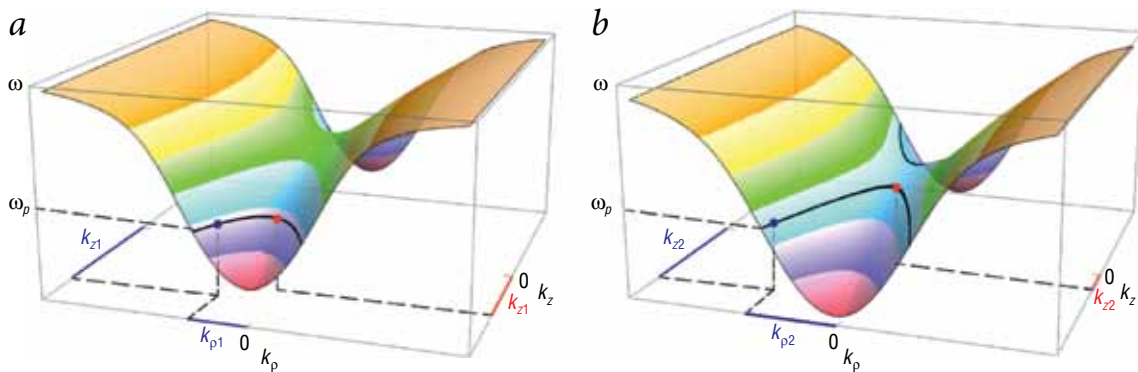


Fig. 3. Schematic drawing of the exciton-polaritons dispersion in the periodic structure with quantum wells under two different values of the radiative decay rate Γ : a – 3 ps^{-1} , b – 8 ps^{-1} .



Fig. 4. Illustration on the issue of the appearance of the polaritons' effective mass in the external potential. The effective mass can differ from the real mass of the particle by many orders of magnitude and take negative values.

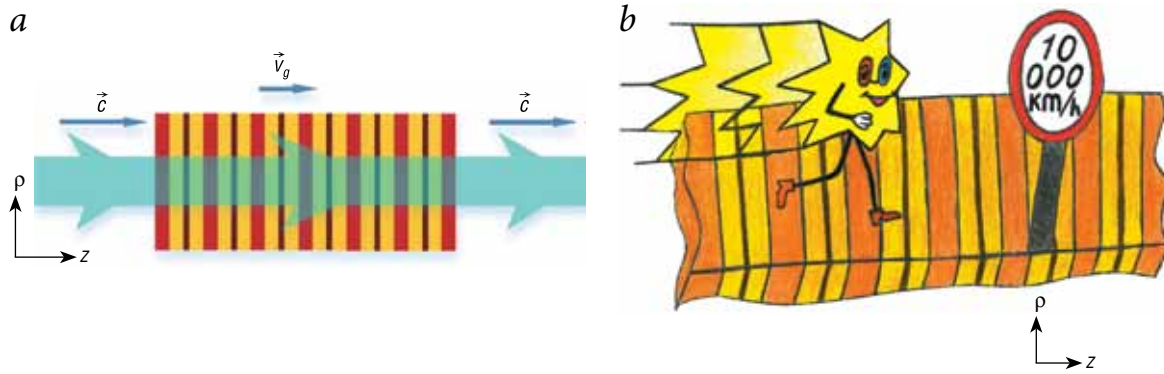


Fig. 5. Schematic drawing (a) and the illustration (b) of the light propagation through the structure in the structure growth direction. The group velocity of polaritons inside the structure v_g is less than the photons speed outside the structure c .

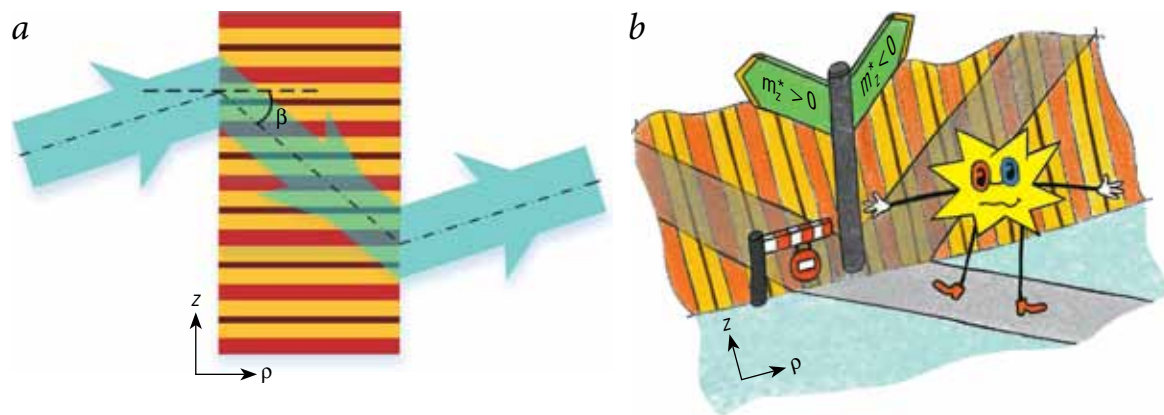


Fig. 6. Schematic drawing (a) and the illustration (b) of the negative refraction of light in the structure in the case of the light beam oblique incidence. The negative refraction is closely related to the appearance of the polaritons' negative effective mass m_z^* in the structure growth direction z .

References

1. **R.S. Tucker**
Nature Photonics, 2010, **4**(7), 405.
DOI: 10.1038/nphoton.2010.162.
2. **J. Jahns, S.H. Lee**
Optical Computing Hardware, USA, NY, New York, Academic Press, 1994, 344 pp.
3. **J. Hopfield**
Phys. Rev., 1958, **112**(5), 1555.
DOI: 10.1103/PhysRev.112.1555.
4. **S.I. Pekar**
JETP, 1958, **6**(33), №4, 785.
5. **V.M. Agranovich**
Sov. Phys. JETP, 1960, **37**(10), №2, 307.
6. **R.P. Seysyan**
Window to the MicroCosm, 2002, №1(5), 6 (in Russian).
7. **E.S. Sedov, I.V. Iorsh, S.M. Arakelian, A.P. Alodzants, A. Kavokin**
Phys. Rev. Lett., 2015, **114**(23), 237402.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.237402.
8. **E.S. Sedov, M.V. Charukhchyan, S.M. Arakelyan, A.P. Alodzants, R.-K. Lee, A.V. Kavokin**
JETP Letters, 2016, **104**(1), 62. DOI: 10.1134/S0021364016130130.

Уротропин: дремавшая история и пробуждение*

А.Ю. Сухоруков, С.Л. Иоффе

Статья посвящена новому типу высокосимметричных гетерокаркасных структур – 1,4,6,10-тетраазаадамантану (*изо*-уротропину) – недавно полученному российскими учеными. Рассмотрена разработка оригинальной схемы сборки тетраазаадамантановой структуры, завершившейся получением целевого *изо*-уротропина, а также его некоторые ключевые химические превращения. В статье также обсуждаются возможности использования *изо*-уротропина и его производных в биохимии и медицине.

Ключевые слова: адамантан, уротропин, *изо*-уротропин, целевой органический синтез, биохимия.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-13-20054).

«Биографии» некоторых химических соединений складываются своеобразно, иногда совершенно неожиданно. Например, появление трех соединений: ферроцена, карборана и фуллерена (*рис. 1*), – сопровождалось буквально взрывным количеством публикаций. Каждое из них создало новую главу в химической науке.

Судьба большинства других соединений не столь эффектна, их появление бывает замеченным, но постепенно интерес к ним пропадает, и только немногим удается со временем вновь привлечь к себе внимание. Например, тиофен (*рис. 2*), открытый в 1882 г. В. Мейером (в результате неудачи при демонстрационном опыте), вызвал интерес, который быстро угас. В течение длительного времени его рассматривали как загрязнение, мешающее проведению некоторых аналитических и спектральных работ. Планомерное изучение химии тиофена не помогло ему выдвинуться на заметное место. Недавно тиофену все же удалось эффектно заявить о себе благодаря работам профессора В.Г. Ненайденко (химический факультет МГУ), который сумел получить циклическую конструкцию из восьми спаянных молекул тиофена (*рис. 2*). Автор предложил для нового соединения образное название «сульflower» (в английском написании «sulflower», это гибрид двух слов: «sulfur» – сера и «sunflower» – подсолнух). В настоящее время сульflower упоминается в сотне работ. Следует отметить, что интерес

Пробуждение – это лучшее время повернуться на другой бок.

Михаил Мамчиц

к производным тиофена в последние годы сильно возрос благодаря перспективам создания на их основе органических проводящих и полупроводящих материалов.

Продукт полимеризации пропилена $\text{CH}_3\text{—CH=CH}_2$ – полипропилен – в течение нескольких десятилетий никого не интересовал, поскольку представлял собой мягкий липкий материал. В 1954 г. катализатор Циглера–Натта позволил провести полимеризацию пропилена так, чтобы звенья в полимерной цепи расположились строго определенным образом. В результате был получен прочный теплостойкий материал, ежегодное производство которого в наши дни составляет десятки миллионов тонн. В настоящее время изделия из такого полипропилена можно встретить буквально на каждом шагу.

Похожая судьба и у некоторых химических элементов и превращений. Уран с момента открытия ожидал целое столетие до своего масштабного применения, а совместная циклизация алкинов и азидов, обна-



СУХОРУКОВ
Алексей Юрьевич
Институт органической химии
имени Н.Д. Зелинского РАН



ИОФФЕ
Сема Лейбович
профессор,
Институт органической химии
имени Н.Д. Зелинского РАН

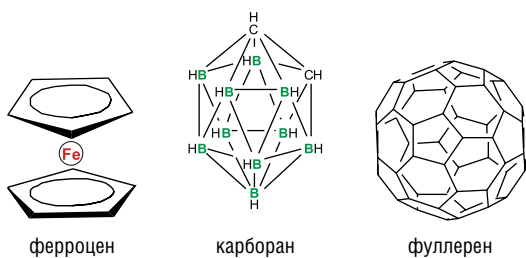


Рис. 1. Выдающиеся соединения XX столетия.

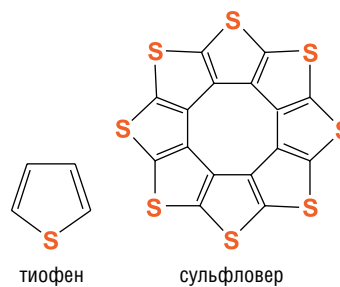


Рис. 2. Структуры тиофена и сульфловера.

руженная более 100 лет назад, недавно пережила второе рождение, дав начало новому научному направлению – клик-химии («click-chemistry»). Аналогичная ситуация имеет место и в других областях науки, например в физике. Так, сверхкритическое состояние вещества «дремало» полтора столетия до момента, когда его начали использовать в промышленном масштабе, а жидкокристаллическое состояние вещества привело к появлению одноименных дисплеев спустя 80 лет после открытия этого явления. А сколько еще таких научных открытий ждут своего часа! Далее речь пойдет об уротропине.

В тени большого брата

Уротропин был синтезирован А.М. Бутлеровым в 1859 г. Проводя взаимодействие формальдегида с аммиаком, он неожиданно получил белое кристаллическое вещество, не содержащее кислорода [1]. Его состав соответствовал формуле $(\text{CH}_2)_6\text{N}_4$, Бутлеров назвал его гексаметилентетрамином (рис. 3). Со временем соединение получило название «уротропин», ставшее общепринятым. Структура этого соединения была установлена много позже, в 1922 г., Р. Дикинсоном

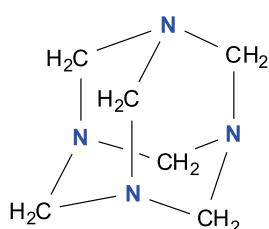


Рис. 3. Структура гексаметилентетрамина.

и А. Реймондом (США). Примечательно, что это было первое органическое соединение, строение которого было установлено рентгеноструктурным анализом. Удивительно, что необычная изящная структура каркаса уротропина не привлекла особого внимания.

Повышенный интерес к структурам такого типа возник после того, как в 1933 г. чешские химики С. Ланда и В. Махачек выделили из годонинской нефти соединение $\text{C}_{10}\text{H}_{16}$. Они предложили структуру этого соединения (ее позже подтвердили структурные исследования) и дали ему название адамантан (от греч. adamantos – алмаз), поскольку каркас молекулы воспроизводит фрагмент кристаллической структуры алмаза (рис. 4).

Получить адамантан в лаборатории удалось швейцарскому химику В. Прелогу в 1941 г. пятистадийным синтезом с выходом менее одного процента. Позже были найдены более простые и результативные методики.

Химию этого соединения с таким торжественным названием (что не так уж малозначимо) стали интенсивно изучать. Были получены соединения с различными органическими группами, обрамляющими каркас, и содержащие в структуре атомы O, N, P, S, Si и др. Обилие публикаций привело к появлению монографий, посвященных адамантану.

На этом фоне уротропин, открывший, по существу, каркасы такого типа, оказался в тени. Он удостоился только упоминания, что это тоже структура адамантанового типа, то есть один из представителей азаадамантанов (соединения, содержащие атомы N в структуре каркаса). Интересных, значимых химических превращений уротропина не было най-

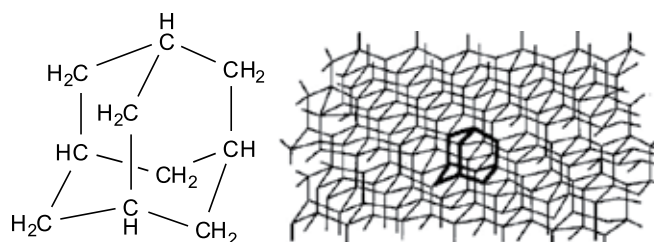


Рис. 4. Структура адамантана и кристаллическая структура алмаза.

дено, и в течение многих лет он скромно вел свое полезное существование. В синтетической органической химии его используют как реагент при получении алифатических и ароматических аминов из соответствующих галогенидов, ароматических альдегидов из бензилгалогенидов и др.

Наиболее известно применение уротропина в качестве лекарственного препарата для лечения инфекции мочевыводящих путей (действующий компонент – образующийся при распаде в кислой среде формалин). Уротропин применяют также в производстве фенольных смол (он поставляет метиленовые группы CH_2 , обеспечивая образование сшитой структуры), в пищевой промышленности зарегистрирован как добавка-консервант и, кроме того, он представляет собой компонент в производстве взрывчатого вещества гексогена. Нельзя не упомянуть использование уротропина в быту в качестве «сухого спирта». Он горит не коптящим пла-

менем, не образует растекающуюся жидкую массу и сгорает полностью, не оставляя пепла.

Передвинуть атомы, сохранив структуру каркаса

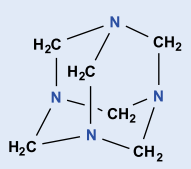
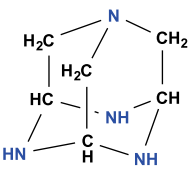
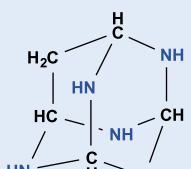
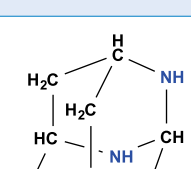
Вначале обратим внимание на то, что в структуре уротропина (см. рис. 3) атомы азота занимают узловые точки, то есть вершины каркаса, а фрагменты $-\text{CH}_2-$ представляют собой мостиковые группы. Существует крупный класс соединений – азаадамантаны с разнообразными органическими группами, окружающими каркас. Они содержат в каркасе от одного до четырех атомов N, однако практически всегда атомы азота занимают вершины каркаса.

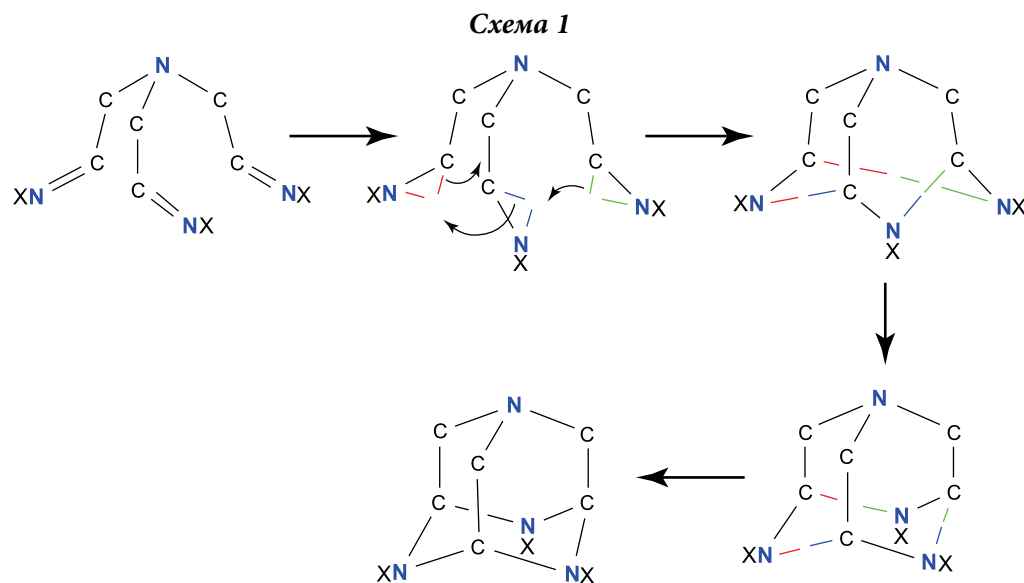
Знакомясь с работами, описывающими адамантановые структуры, содержащие различные гетероатомы, мы обратили внимание на то, что при введении атомов O или S в каркас, они становятся мостиковыми группами $-\text{X}-$, а атомы P, N или группировки RSi располагаются в вершинах каркаса $-\text{Y}<$. Таким образом, синтезом всех рассмотренных структур командует Природа, руководствуясь традиционным принципом валентности.

Нас заинтересовало, можно ли целенаправленно вмешаться в этот процесс, поместив в мостиковую позицию те атомы, которые традиционно занимали только узловые места. Таким образом, возникла, на первый взгляд, необычная задача, возможность решения которой была не очевидна. Мы решили поменять местами атомы углерода и азота в уротропине.

Вначале предстояло решить, какой из возможных вариантов следует выбрать. Мы сосредоточили внимание на трех теоретически возможных изомерах, по составу полностью совпадающих с классическим уротропином (табл. 1), при этом варианты, содержащие связи азот-азот не рассматривали. Квантовохимическими расчетами была определена энтальпия образования

Таблица 1. Сравнение энтальпий образования изомеров уротропина

Изомеры уротропина	Разность между энтальпией уротропина и соответствующего изомера, ккал/моль
 <p>Традиционный уротропин</p>	0
 <p>Изомер 1</p>	11.4
 <p>Изомер 2</p>	19.7
 <p>Изомер 3</p>	21.7



(энергия, выделяющаяся при образовании вещества) каждого изомера, которую сравнивали с этой же величиной для уротропина, чтобы определить, какой из изомеров энергетически более выгоден [2]. В *таблице 1* показано сравнение энтальпий изомеров, причем энтальпия образования уротропина принята равной нулю, а отклонения от нуля указывают, насколько каждый из изомеров энергетически более выгоден в сравнении с обычным уротропином.

Результаты расчетов указывали, что среди трех предполагаемых изомеров наименее энергетически выгоден традиционный уротропин. Разница в энергии образования остальных изомеров невелика, наименьшая величина у изомера 1, но мы сосредоточили внимание именно на нем, поскольку у этого изомера имеются преимущества. Атомы азота в нем неравноценны, один атом N не содержит атомов H, он представляет собой третичный амин, а три остальных содержат по одному атому H, это вторичные амины. Таким образом, реакционные возможности изомера 1 выше в сравнении с изомерами 2 и 3, поскольку они содержат только группы, соответствующие вторичным аминам.

После того, как был сделан выбор, следовало наметить путь син-

теза изомера 1. Заранее было понятно, что получение новой адамантановой структуры не может быть простым, если вспомнить, сколь трудным был первый синтез адамантана (о чем было сказано ранее).

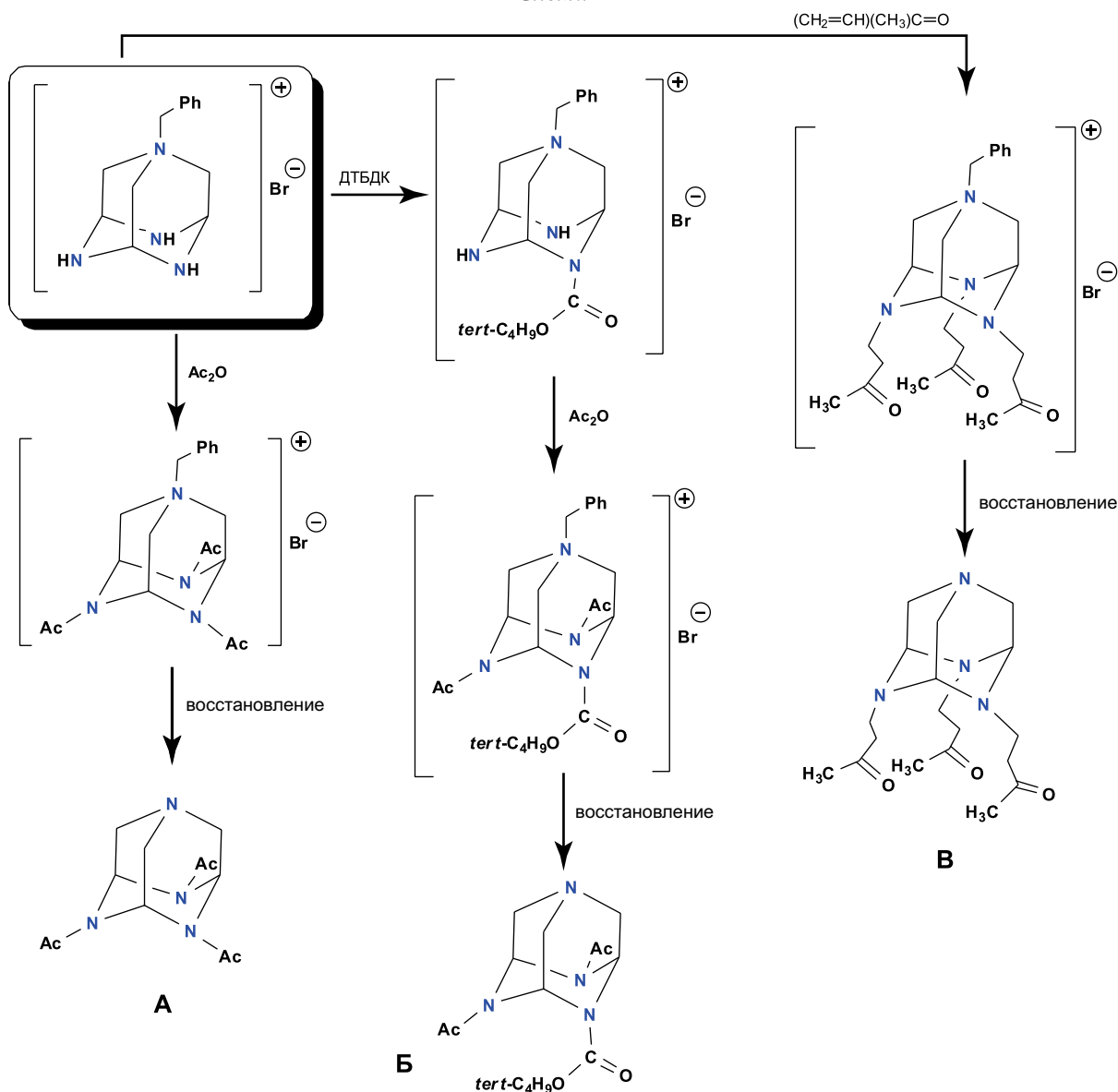
Мы наметили принципиально новую схему формирования каркаса адамантанового типа. Вначале следует получить молекулу с атомом N, от которого отходят три ветви, содержащие на конце тоже атомы N и, кроме того, реакционные группы. В нашем случае эти группы представляют собой фрагменты C=N, которые позволят объединить попарно три ветви при раскрытии двойных связей.

Для наглядности изобразим процесс упрощенно, с помощью геометрических моделей (*схема 1*). Раскроем в каждой двойной связи одну связь, «усики» раскрытых связей отмечены красным, синим и зеленым цветами. Отогнем «усики» (показано изогнутыми стрелками), направим к атомам C и N, расположенным в соседних ветвях, и соединим атом азота с атомом углерода соседней ветви, образовав таким образом новые связи C—N.

В итоге все три ветви окажутся связанными единым шестичленным циклом, возникшим в нижней части каркаса. Обобщенное название реакций такого типа – циклотримеризация, то есть образование цикла из трех фрагментов, в нашем случае это группировки C=N. Отметим, что для использованных соединений (X = OH, *схема 1*) подобные превращения ранее были не известны.

Первый этап, то есть синтез намеченной трехлучевой заготовки, был проведен в две стадии. Исходное соединение – нитроэтан CH₃—CH₂NO₂. Его взаимодействие на первой стадии с триметилхлорсиланом Me₃SiCl (в присутствии амина), а затем на следующей стадии с аммиаком приводит к нужному соединению (*схема 2*, путь А) [3, 4]. Молекула

Схема 4



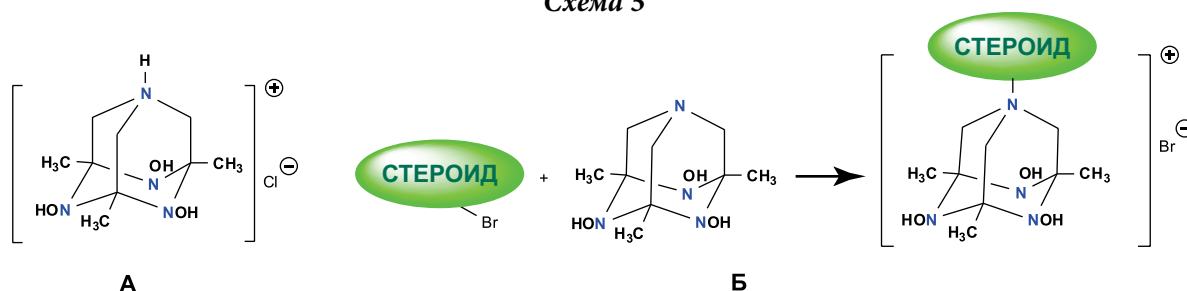
К настоящему моменту выделить производные традиционного уротропина, содержащие заместители у атома углерода, не удалось из-за их нестабильности, зато проделать то же самое с *изо*-уротропином несложно, причем получающиеся соединения устойчивы. Допустим, вы, строя дом, собрали коробку из бетонных плит, а затем в этих плитах вырезаете отверстия для окон. Проще при формовке плит заранее сделать нужные отверстия, а потом собирать из этих плит дом. Точно так же нет необходимости «терять» нашу изящную структуру, пытаясь ввести заместители. *Изо*-уротропин дает возможность осуществить это

до сборки самого каркаса. Достаточно включить заранее намеченную группу (например CH₃) в исходное соединение, то есть в нитроэтан, и провести синтез на основе изомерного нитропропана CH₃—CH(CH₃)NO₂. Точно так же можно присоединить к группам СН и другие органические группы, например бензильную [5, 6].

В процессе работы выяснилась одна интересная деталь. Оказалось, что замыкание каркаса проходит несравненно легче, если к узловому атому N заранее добавить четвертый заместитель – фрагмент углеводорода [5, 7]. Дело в том, что этот атом N легко присоединяет галогенуглеводороды (схема 3, превращение 1), образуя ионные соединения (точно так же, как из аммиака и хлороводорода образуется аммонийхлорид [NH₄]⁺Cl).

Затем можно превратить группы N—OH в NH, восстановив их цинком (схема 3, превращение 2),

Схема 5



а при необходимости на следующем этапе удалить с азота «навешанную» органическую группу действием H_2 в присутствии катализатора (схема 3, превращение 3). Впрочем, удалять органическую группу у узлового атома N не всегда целесообразно. Оказалось, что в таком ионном соединении (полученном после второй стадии на схеме 3) активированы группы NH, и что немаловажно – сам каркас более стабилен [2].

Далее в качестве примера показано исходное соединение с бензильной группой $-CH_2C_6H_5$ у атома N в вершине каркаса. В этом соединении группы NH можно ацилировать действием уксусного ангидрида $[CH_3C(O)]_2O$ (схема 4, путь А). Возможны и более сложные варианты: одну группу NH блокировать ди(*трет*-бутил)дикарбонатом (ДТБДК, реагент для временного блокирования аминогрупп), а оставшиеся две группы ацилировать (схема 4, путь Б). В итоге получаем структуру с различающимися заместителями у атомов N [2]. При действии метилвинилкетона $CH_2=CHC(O)CH_3$ происходит присоединение реагента к группам NH благодаря раскрытию двойной связи в винильной группе (схема 3, путь В). Во всех примерах, показанных на схеме 3, превращения завершаются восстановлением продукта с удалением группы $-CH_2Ph$. В результате ионная структура исчезает, образуются электронейтральные молекулы замещенного *изо*-уротропина.

Таким образом, удалось показать, что химия нового соединения *изо*-уротропина весьма разнообразна и намного богаче в сравнении с обычным уротропином. Подобные исследования интересны не только сами по себе, они указывают на возможность некоторых практических приложений. Поскольку традиционный уротропин мысленно связывают прежде всего с его лекарственным действием, мы решили проверить биологическую активность *изо*-уротропина.

Основная реакционная среда в живом организме – вода, поэтому лекарственные препараты должны быть водорастворимы. В этом случае предпочтительны именно ионные соединения, которые, как теперь понятно, *изо*-уротропин образует

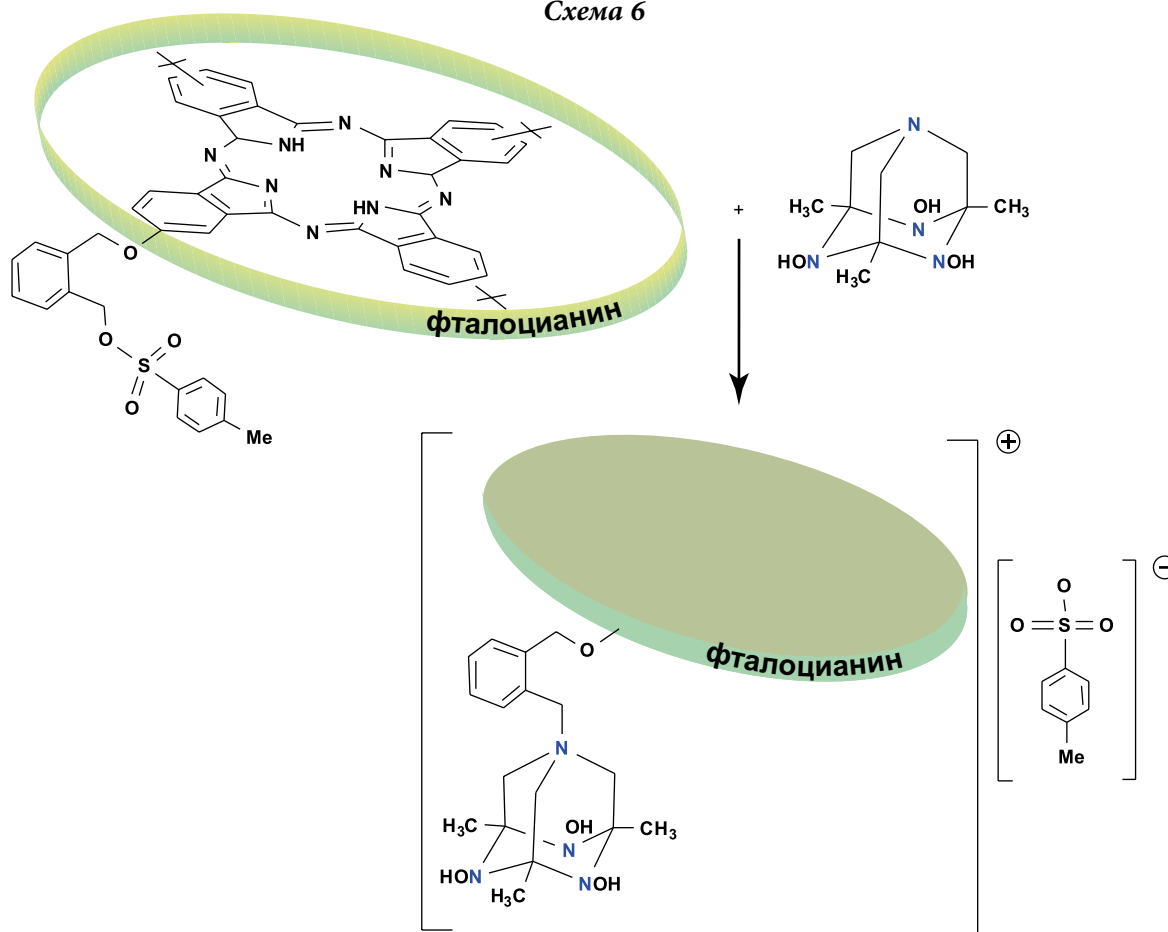
легко. Испытания на лабораторных мышцах солянокислой соли тригидроксизамещенного *изо*-уротропина (схема 5, путь А) показали, что соединение совершенно нетоксично, следовательно, *изо*-уротропин может быть использован в качестве водорастворимого «транспортного средства» для введения лекарственного препарата.

Такая возможность была проверена следующим образом. Модифицированный стероидный препарат прегненолон (воздействует на процессы центральной нервной системы) был присоединен к молекуле *изо*-уротропина [7]. При этом образовалось водорастворимое ионное соединение (схема 5, Б), что позволяет ранее не растворимый в воде исходный стероид вводить в ткань живого организма.

Аналогичный прием был использован для присоединения к *изо*-уротропину биологически активной молекулы фталоцианина [8]. Это плоская циклическая конструкция, собранная из четырех молекул *изо*-индола, соединенных атомами азота. Проведены исследования, показавшие, что фталоцианин обладает антиопухолевой активностью. Мы решили проверить, возможно ли расширить лекарственное действие этого вещества.

Для того чтобы произошло взаимодействие фталоцианина и *изо*-уротропина по той же схеме 5, к молекуле фталоцианина была присоединена группа, содержащая анион толуолсульфокислоты. Этот анион играл ту же роль, что и анионы галогенов в предыдущих превращениях, то есть становился «уходя-

Схема 6



щей» группой, располагающейся вне каркаса (схема 6).

Полученное соединение показало заметную противовирусную активность при введении его в ВИЧ-инфицированную биологическую культуру клеток. Таким образом, удалось расширить диапазон лекарственного действия фталоцианина.

Изо-уротропин пока еще «молод», тем не менее его богатые реакционные возможности удалось показать. Он уже оценен зарубежными

учеными. Так, вскоре после получения *изо*-уротропина, его начала предлагать потребителям немецкая фирма «AKos Building Blocks». Полагаем, что последующие исследования позволят обнаружить новые интересные особенности и направления использования этого своеобразного соединения.

Завершим наш рассказ, вернувшись к упоминавшимся в самом начале историческим событиям. Классический уротропин «ожидал» практически 150 лет появления ближайшего «родственника» – *изо*-уротропина [1, 5].

В статье описаны результаты работы по проекту РФФИ № 09-03-00676-а.

Литература

1. A. Butlerow
Justus Liebigs Ann. Chem., 1859, **111**(2), 242.
DOI: 10.1002/jlac.18591110219.
2. A.N. Semakin, A.Yu. Sukhorukov, Yu.V. Nelyubina, Yu.A. Khomutova, S.L. Ioffe, V.A. Tartakovskiy
J. Org. Chem., 2014, **79**(13), 6079.
DOI: 10.1021/jo5007703.
3. A.N. Semakin, A.Yu. Sukhorukov, A.V. Lesiv, Yu.A. Khomutova, S.L. Ioffe
Synthesis, **2007**, №18, 2862. DOI: 10.1055/s-2007-983847.
4. A.N. Semakin, A.O. Kokuev, Y.V. Nelyubina, A.Yu. Sukhorukov, P.A. Zhmurov, S.L. Ioffe, V.A. Tartakovskiy
Beilstein J. Org. Chem., 2016, **12**, 2471.
DOI: 10.3762/bjoc.12.241.
5. A.N. Semakin, A.Yu. Sukhorukov, A.V. Lesiv, S.L. Ioffe, K.A. Lyssenko, Y.V. Nelyubina, V.A. Tartakovskiy
Org. Lett., 2009, **11**(18), 4072. DOI: 10.1021/ol9015157.
6. I.S. Golovanov, A.Yu. Sukhorukov, Yu.V. Nelyubina, Yu.A. Khomutova, S.L. Ioffe, V.A. Tartakovskiy
J. Org. Chem., 2015, **80**(13), 6728.
DOI: 10.1021/acs.joc.5b00892.
7. А.Н. Семакин, И.С. Голованов, А.Ю. Сухоруков, С.Л. Иоффе, В.А. Тартаковский
Изв. Акад. Наук, Сер. Хим., 2016, **65**(9), 2270.
8. A.Yu. Tolbin, A.Yu. Sukhorukov, S.L. Ioffe, O.A. Lobach, D.N. Nosik, L.G. Tomilova
Mendeleev Commun., 2010, **20**(1), 25.
DOI: 10.1016/j.mencom.2010.01.010.

English ||||||||||||||||||||||||||||

Urotropine: Sleeping History and Awakening*

Alexey Yu. Sukhorukov

N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, RAS
47 Leninskiy Ave., Moscow, 119991, Russia
sukhorukov@ioc.ac.ru

Sema L. Ioffe

Professor, N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry, RAS
47 Leninskiy Ave., Moscow, 119991, Russia
iof@ioc.ac.ru

Abstract

The paper is focused on the chemistry of a novel class of heterocage compounds – 1,4,6,10-tetraazaadamantane (*iso*-urotropine), which were recently synthesized by Russian scientists. The original approach to 1,4,6,10-tetraazaadamantane core structure assembly that was used for the synthesis of target *iso*-urotropine as well as some key transformations of this new heterocage compound are discussed. The plausible applications of *iso*-urotropine and its derivatives in biochemistry and medicine are also emphasized.

Keywords: adamantane, urotropine, *iso*-urotropine, target-oriented organic synthesis, biochemistry.

*The work was financially supported by RFBR (project 17-13-20054).

Images & Tables

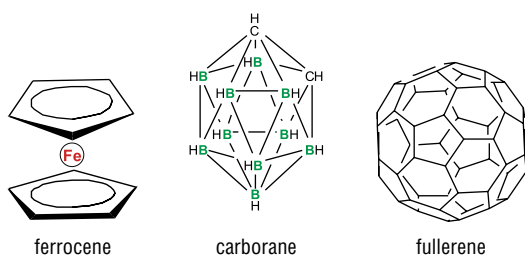


Fig. 1. Outstanding compounds of XXth century.

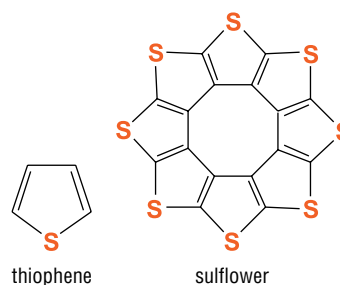


Fig. 2. Thiophene and its transfiguration into sulflower.

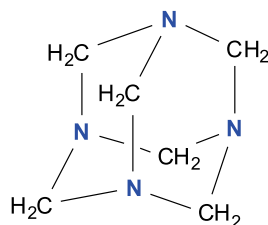


Fig. 3. Structure of urotropine.

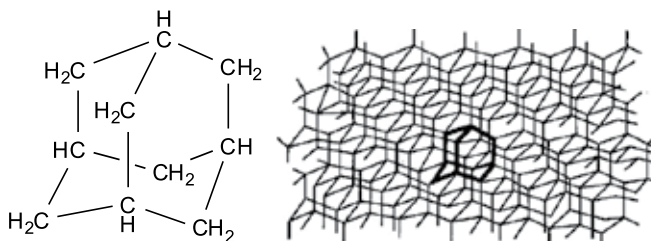


Fig. 4. Structure of adamantane and crystal structure of diamond.

Scheme 1

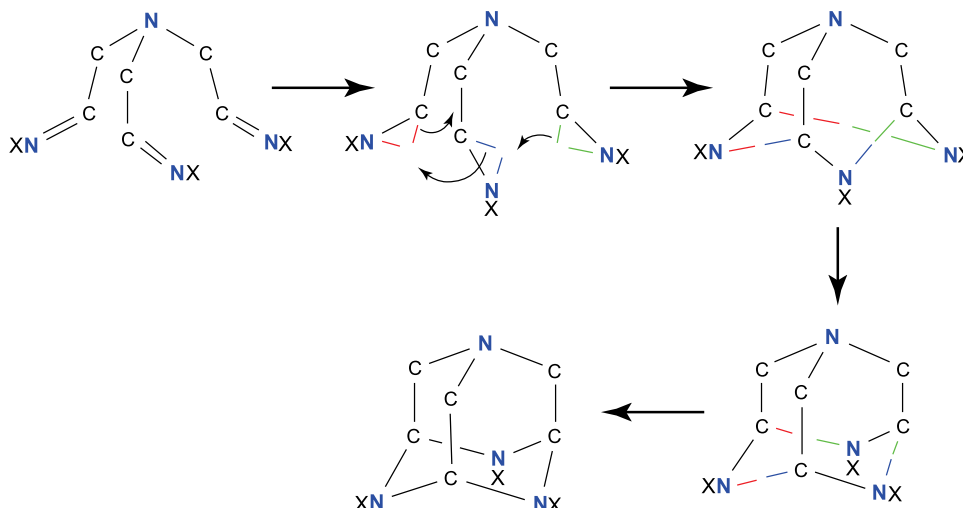
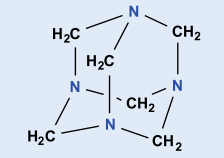
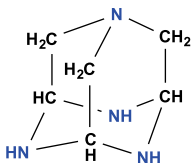
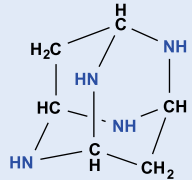
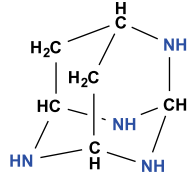
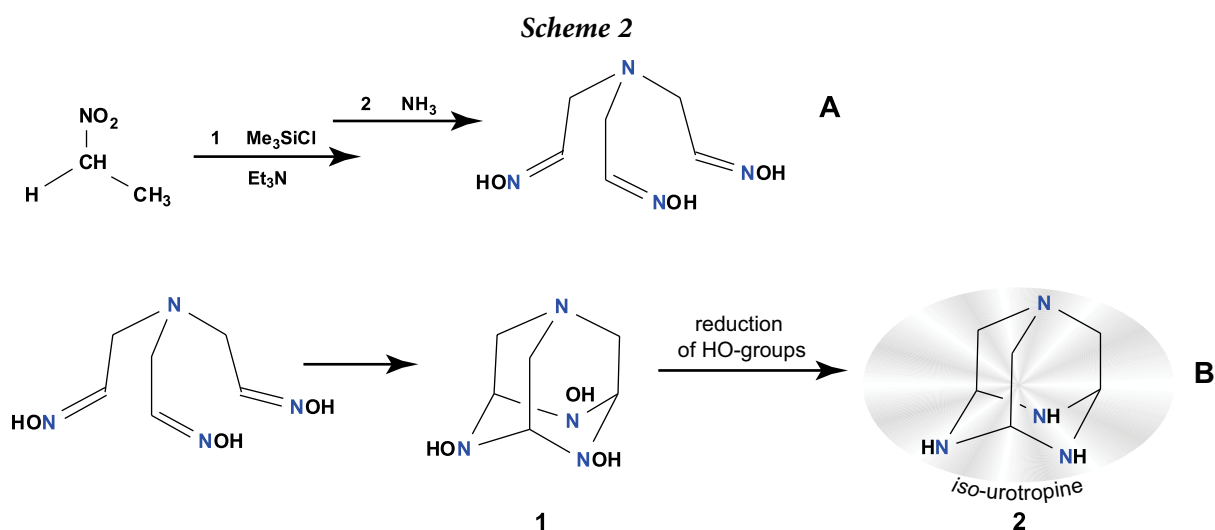
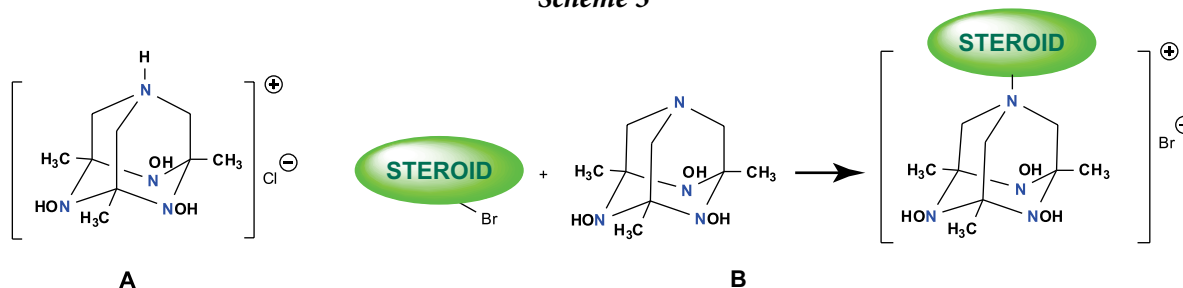


Table 1. Enthalpies of formation for urotropine isomers

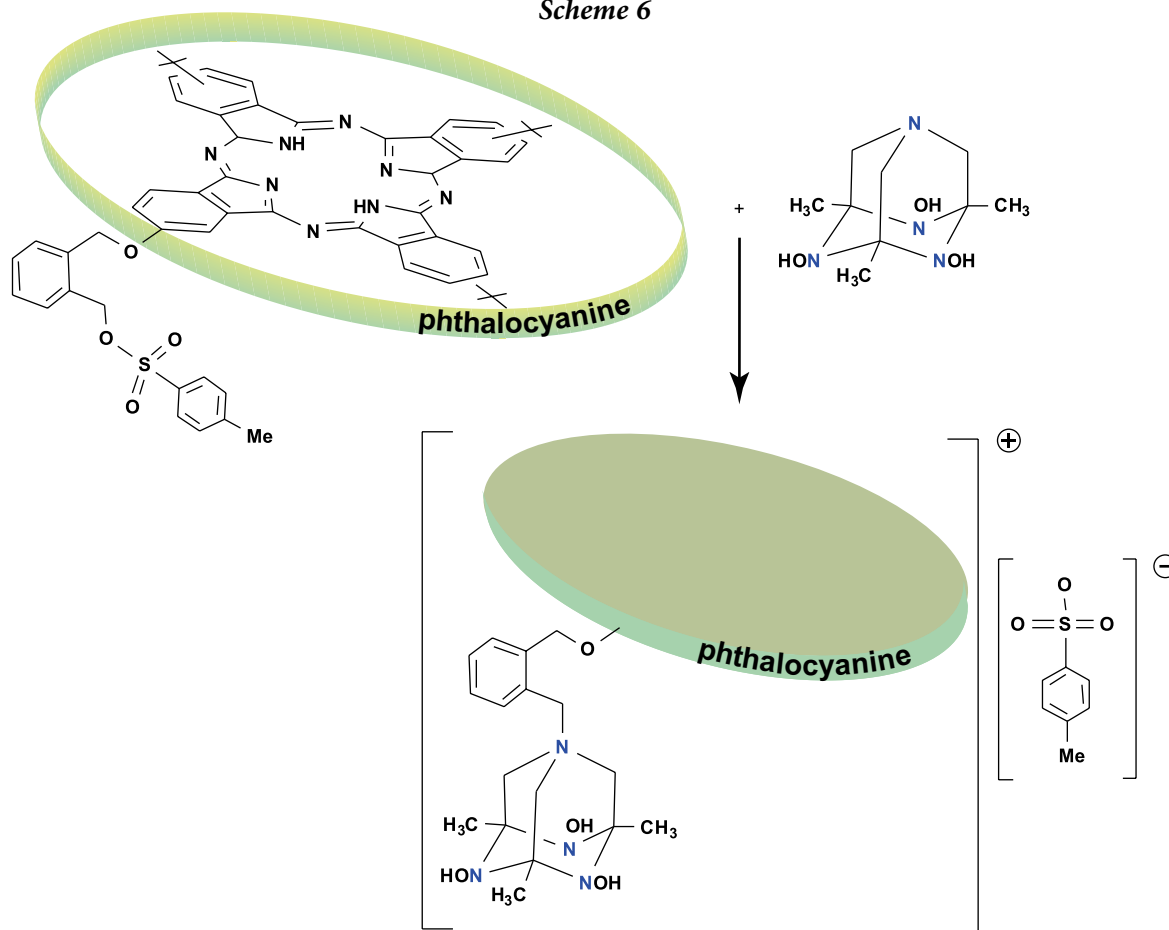
Urotropine isomers	Difference between the enthalpy of corresponding isomer and traditional urotropine, kcal/mol
 <p>Traditional urotropine</p>	0
 <p>Isomer 1</p>	11.4
 <p>Isomer 2</p>	19.7
 <p>Isomer 3</p>	21.7



Scheme 5



Scheme 6



References

1. A. Butlerow
Justus Liebigs Ann. Chem., 1859, **111**(2), 242.
DOI: 10.1002/jlac.18591110219.
2. A.N. Semakin, A.Yu. Sukhorukov, Yu.V. Nelyubina, Yu.A. Khomutova, S.L. Ioffe, V.A. Tartakovsky
J. Org. Chem., 2014, **79**(13), 6079.
DOI: 10.1021/jo5007703.
3. A.N. Semakin, A.Yu. Sukhorukov, A.V. Lesiv, Yu.A. Khomutova, S.L. Ioffe
Synthesis, 2007, №18, 2862. DOI: 10.1055/s-2007-983847.
4. A.N. Semakin, A.O. Kokuev, Y.V. Nelyubina, A.Yu. Sukhorukov, P.A. Zhmurov, S.L. Ioffe, V.A. Tartakovsky
Beilstein J. Org. Chem., 2016, **12**, 2471.
DOI: 10.3762/bjoc.12.241.
5. A.N. Semakin, A.Yu. Sukhorukov, A.V. Lesiv, S.L. Ioffe, K.A. Lyssenko, Y.V. Nelyubina, V.A. Tartakovsky
Org. Lett., 2009, **11**(18), 4072. DOI: 10.1021/ol9015157.
6. I.S. Golovanov, A.Yu. Sukhorukov, Yu.V. Nelyubina, Yu.A. Khomutova, S.L. Ioffe, V.A. Tartakovsky
J. Org. Chem., 2015, **80**(13), 6728. DOI: 10.1021/acs.joc.5b00892.
7. A.N. Semakin, I.S. Golovanov, A.Yu. Sukhorukov, S.L. Ioffe, V.A. Tartakovsky
Russ. Chem. Bull., 2016, **65**(9), 2270.
DOI: 10.1007/s11172-016-1577-7.
8. A.Yu. Tolbin, A.Yu. Sukhorukov, S.L. Ioffe, O.A. Lobach, D.N. Nosik, L.G. Tomilova
Mendeleev Commun., 2010, **20**(1), 25.
DOI: 10.1016/j.mencom.2010.01.010.

Роль белка в первичных световых стадиях фотосинтеза*

В.В. Еремин, А.С. Белов, И.О. Глебов, М.И. Козлов, В.В. Поддубный, Д.В. Хохлов

Белки – самые распространенные и самые разнообразные «молекулы жизни». Сложная, многоуровневая структура молекул и многообразие функциональных групп позволяют им выполнять множество функций в живых организмах – от ускорения химических реакций до переноса, хранения и распознавания молекул. Трудно найти такой химический процесс в живой системе, в котором бы не принимали участие белки.

Неудивительно, что белки играют ключевую роль и во всех стадиях фотосинтеза – самой распространенной реакции на Земле. В статье обсуждены важнейшие функции белков в фотосинтетических устройствах и показано, как природа управляет процессами фотосинтеза, используя структурное разнообразие и свойства белков. Рассмотрены только первичные стадии световой фазы фотосинтеза – те, в которых происходит преобразование световой энергии в электрическую. Наряду с хорошо изученными функциями белков представлены и новые, довольно неожиданные: так, например, показано, что в процессах переноса электрона белки могут играть активную роль.

Ключевые слова: фотосинтез, белок, перенос электрона, светособирающая антенна, реакционный центр, пурпурные бактерии.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-13-20116).

Белки – самые распространенные и самые разнообразные «молекулы жизни». Сложная, многоуровневая структура молекул и многообразие функциональных групп позволяют им выполнять множество функций в живых организмах: от ускорения химических реакций до переноса и хранения молекул. Трудно найти такой процесс в живой системе, в котором бы не принимали участие белки.

Неудивительно, что белки играют ключевую роль и во всех стадиях фотосинтеза – самой распространенной реакции на Земле. В данной статье мы обсудим важнейшие функции белков в фотосинтетических устройствах и покажем, как природа управляет процессами фотосинтеза, используя структурное разнообразие и свойства белков. Мы ограничимся первичными стадиями световой фазы

фотосинтеза – теми, в которых происходит преобразование световой энергии в электрическую. Наряду с хорошо изученными функциями белков мы рассмотрим новые, довольно неожиданные, и покажем, что в процессах переноса электрона белки могут играть активную роль.

Основные стадии фотосинтеза

Фотосинтез – это очень сложный природный физико-химический процесс, протекающий в зеленых растениях, водорослях и некоторых бактериях под действием света. Его результатом являются химические



ЕРЕМИН
Вадим Владимирович
профессор,
Московский государственный
университет имени
М.В. Ломоносова



БЕЛОВ
Александр Сергеевич
Московский
государственный
университет имени
М.В. Ломоносова



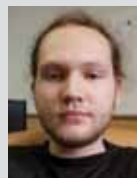
ГЛЕБОВ
Илья Олегович
Московский
государственный
университет имени
М.В. Ломоносова



КОЗЛОВ
Максим Игоревич
Московский государственный
университет имени
М.В. Ломоносова



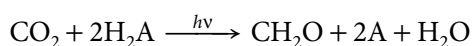
ПОДДУБНЫЙ
Владимир Владимирович
Московский государственный
университет имени
М.В. Ломоносова



ХОХЛОВ
Даниил Витальевич
Московский государственный
университет имени
М.В. Ломоносова

реакции, приводящие к синтезу органических веществ, обладающих высокой энергией. Многие из этих реакций термодинамически невыгодны и могут происходить только за счет внешних источников энергии, в том числе энергии света. По сути, фотосинтез представляет собой механизм превращения световой энергии в химическую, который природа создала на Земле в результате миллиардов лет эволюции.

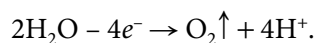
Суммарное уравнение фотосинтеза выглядит несложно:



где H_2A – восстановитель, который окисляется до A (A – O или S), а CH_2O – упрощенная формула органических продуктов фотосинтеза – углеводов.

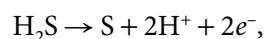
Процессы окисления и восстановления разделены во времени. Сначала происходит окисление H_2A до A , наряду с этим образуются органические молекулы аденозинтрифосфорной кислоты (АТФ) и НАДФ · Н. Эти превращения требуют внешней энергии и происходят под действием света, поэтому называются световой фазой фотосинтеза, или световыми стадиями. Далее, при участии НАДФ · Н и энергии, запасенной в АТФ, углекислый газ восстанавливается до углеводов. Эти реакции составляют темновую фазу фотосинтеза [1].

Обе фазы – и световая, и темновая – это сложные, многоступенчатые процессы, в которые вовлечены сотни тысяч атомов. Мы рассмотрим только световую фазу. Конкретные уравнения световой фазы зависят от сложности живого организма. В самых сложных – зеленых растениях, водорослях и цианобактериях – вода окисляется до молекулярного кислорода:



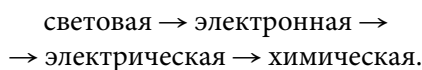
Образовавшиеся при этом электроны и ионы водорода участвуют в восстановлении углекислого газа до углеводов в темновых стадиях.

В более простых организмах – зеленых серобактериях и пурпурных бактериях – всего одна фотосистема. В первых сероводород окисляется до серы:



а в пурпурных бактериях фотосинтез не приводит к окислительно-восстановительным превращениям, его основным результатом является перенос ионов водорода H^+ через фотосинтетическую мембрану и последующий синтез АТФ, которая служит одним из аккумуляторов химической энергии. АТФ называют первичным продуктом фотосинтеза, она образуется во всех фотосинтетических организмах – и относительно простых, и самых сложных.

Несмотря на большое разнообразие фотосинтетических систем, все они обладают рядом общих свойств. Главное из них – принцип действия: любое фотосинтетическое устройство преобразует энергию из световой формы в химическую по схеме:



За каждое преобразование отвечает своя часть фотосинтетического устройства. Свет поглощают светособирающие антенны (фотоантенны), электронная энергия преобразуется в электрическую в реакционных центрах (РЦ) путем переноса электрона, а создаваемый за счет этого электрический потенциал используется в остальных частях фотосистемы для переноса протона и связанных с ним химических реакций.

Основные компоненты фотосинтетических устройств пурпурных бактерий

Устройство фотоантенн и реакционных центров рассмотрим на примере пурпурных бактерий, для которых механизм фотосинтеза изучен наиболее подробно (рис. 1). Бактериальный фотосинтез происходит в клеточной мембране: он начинается с поглощения света и заканчивается синтезом АТФ [2, 3]. Фотоантенна состоит из нескольких десятков молекул-пигментов – бактериохлорофиллов и каротиноидов, плотно окруженных белковыми цепями, т.е. фактически погруженных в белковую среду [4]. Фотоантенны пурпурных бактерий имеют, как правило, циклическую структуру и могут содержать несколько колец, состоящих из взаимодействующих пигментов (рис. 2). Например, фотоантенна, изображенная на рисунке 2, включает два кольца бактериохлорофиллов: одно содержит 18 молекул, другое – 9; с первым кольцом связаны еще девять молекул каротиноидов [5]. При поглощении видимого или инфракрасного света один из пигментов переходит в возбужденное электронное состояние,

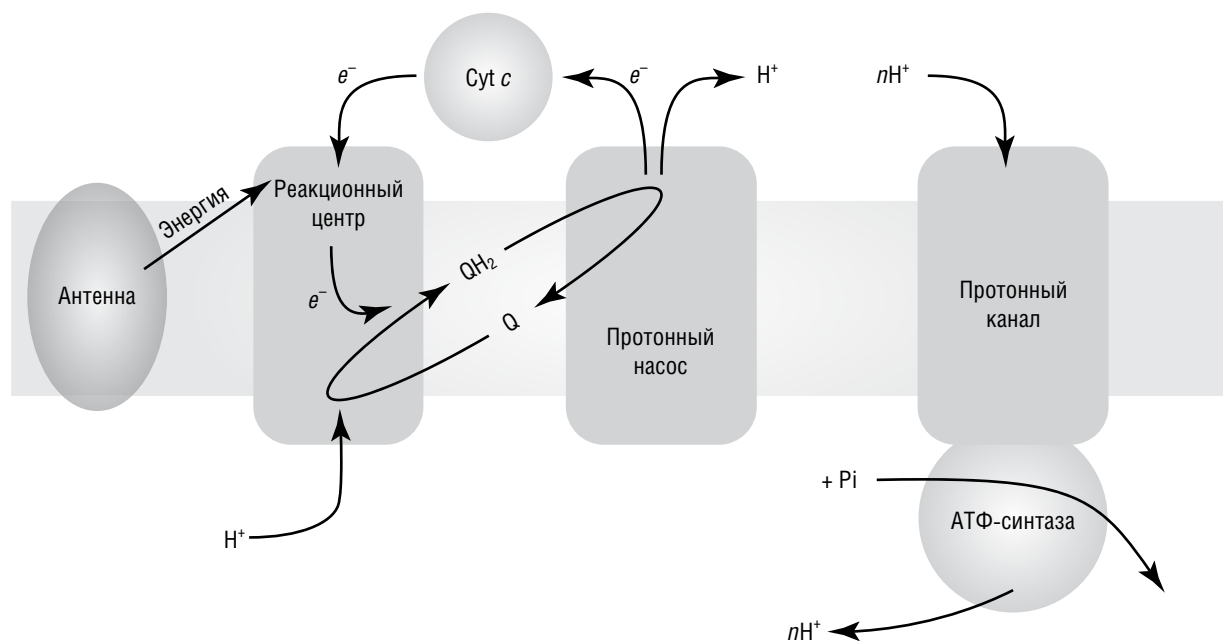


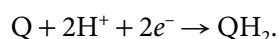
Рис. 1. Схема фотосинтеза в пурпурных бактериях [2]. Горизонтальная полоса представляет бислойную фотосинтетическую мембрану. Стрелками показаны все процессы переноса электронов и протонов.

и избыточная электронная энергия мигрирует по антенне от одного пигмента к другому за счет межмолекулярного взаимодействия (см. далее), пока не достигнет реакционного центра, связанного с фотоантенной.

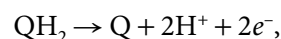
В отличие от фотоантенн, РЦ пурпурных бактерий состоит всего из восьми пигментов – пары связанных бактериохлорофиллов (их называют специальной парой), двух отдельных бактериохлорофиллов, двух бактериофеофитинов (они отличаются от бактериохлорофиллов отсутствием иона магния) и двух хинонов, а также одного иона железа (рис. 3). Молекулы пигментов в РЦ образуют симметричную структуру с осью симметрии, проходящей через центр специальной пары и ион железа.

В РЦ электронная энергия переходит в электрическую путем переноса электрона через клеточную мембрану, в которую встроено фотосинтетическое устройство. Процесс начинается от специальной пары пигментов (первичного донора) и включает серию переходов электрона от одного вещества к другому (рис. 3). Благодаря симметрии РЦ возможны две ветви переноса – их называют А и В. Практически, однако, в переносе задействована только ветвь А, ее называют активной, а ветвь В играет роль запасной [6]. Одна из причин такой селективности обсуждается ниже.

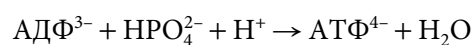
Конечный акцептор электрона – молекула хинона (Q), которая восстанавливается сначала до семихинона QH, а затем, приняв второй электрон, до гидрохинона QH₂:



Два протона, необходимых для полного восстановления хинона, забираются у воды. Образовавшийся гидрохинон переходит в следующий компонент фотосинтетического устройства – протонный насос, который представляет собой комплекс, содержащий белки – цитохромы b и c. Этот комплекс окисляет гидрохинон обратно до хинона:



а выделяющаяся при этом энергия используется для переноса ионов водорода через мембрану и создания градиента их концентрации. Цитохром c возвращает выделившиеся электроны обратно в реакционный центр и приводит его в исходное состояние. Наконец, еще один белок – фермент АТФ-синтаза использует протоны,двигающиеся через мембрану, для синтеза АТФ из аденозиндифосфата (АДФ) и фосфата (Pi на рис. 1):



(внутри клетки АТФ существует преимущественно в виде четырехзарядного аниона). Данная реакция происходит с поглощением большого количества энергии, которая запасается в АТФ и в дальнейшем

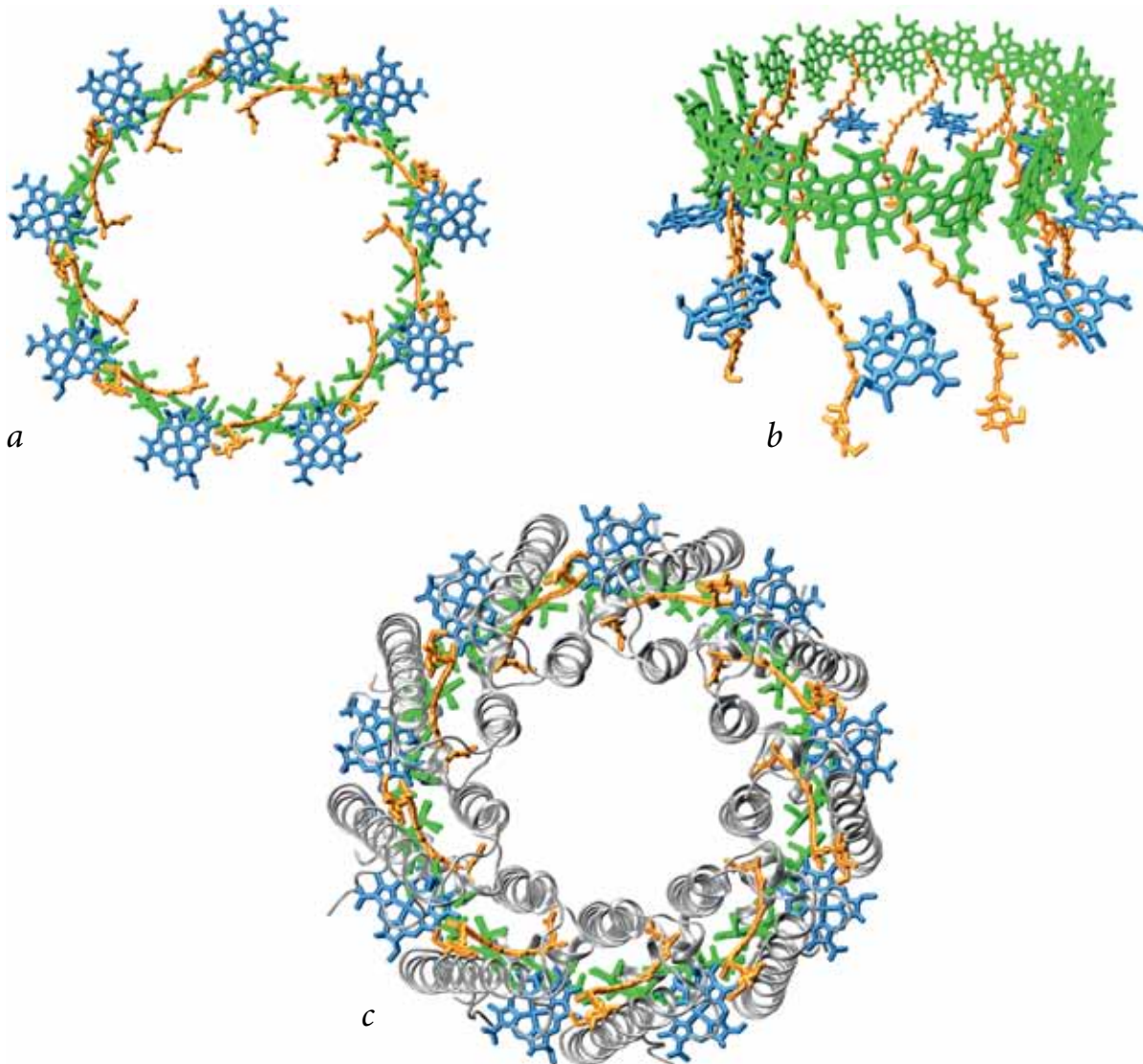


Рис. 2. Строение фотоантенны бактерии *Rps. Acidophila*: *a* – циклическое расположение пигментов, вид сверху. Синим и зеленым цветами изображены бактериохлорофиллы, коричневым – каротиноиды; *b* – циклическое расположение пигментов, вид спереди; *c* – пигменты в белковом окружении, вид сверху. Серым цветом показана вторичная структура белков.

обеспечивает энергетические потребности бактерии. О важности этого вещества для живых систем свидетельствует такой факт: в спокойном состоянии человеческий организм синтезирует и потребляет 1.5 кг АТФ в час.

Таким образом, на примере пурпурных бактерий можно выделить основные части природного фотосинтетического устройства: 1) фотоантенна отвечает за поглощение света; 2) реакционный центр обеспечивает разделение зарядов и создание электрического потенциала; 3) в системе хранения энергии за счет разности потенциалов осуществляются несамопроизвольные хи-

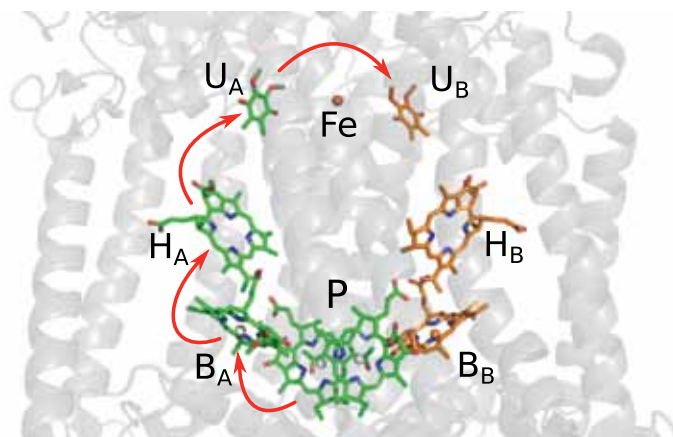


Рис. 3. Структура реакционного центра пурпурной бактерии *Rh. Sphaeroides*. Буквами обозначены различные компоненты РЦ: *P* – специальная пара, *B* – бактериохлорофиллы, *H* – бактериофеофитины, *U* – убикиноны, нижние индексы *A* и *B* – обозначения ветвей переноса электрона. Активная цепь выделена зеленым цветом, направления переноса электрона показаны красными стрелками. Вторичная структура белкового окружения изображена серым фоном.

мические реакции, в которых образуются вещества, обладающие запасом химической энергии.

Все три компонента – фотоантенны, реакционный центр и система хранения энергии – являются общими для любых фотосинтетических организмов. Различия состоят в конкретном строении этих компонентов, механизмах их взаимодействия между собой, энергетике и временах фотосинтеза, а также в химических превращениях.

Механизмы переноса энергии

Прежде чем электронная энергия в поглотившей свет фотоантенне достигнет реакционного центра, она в течение некоторого времени довольно быстро и с низкими потерями мигрирует от одного пигмента к другому. Каким же образом, за счет чего происходит перенос энергии? Любой перенос возможен только за счет взаимодействия. Во всех антеннах пигменты связаны друг с другом нековалентно – ван-дер-ваальсовыми силами (рис. 2). В зависимости от расстояния между молекулами здесь возможны два основных механизма переноса – когерентный и некогерентный. Первый соответствует более сильному взаимодействию, второй – более слабому.

Некогерентный механизм носит имя Ферстера, который первым вывел теоретическое выражение для константы скорости переноса энергии от донора к акцептору [7]. Еще этот механизм называют индуктивно-резонансным, или диполь-дипольным, так как перенос энергии вызван диполь-дипольным взаимодействием. Его можно представить следующим образом. Молекула донора энергии находится в электронно-возбужденном состоянии и в принципе может перейти в основное состояние, испустив квант света. Этот квант может быть поглощен акцептором, который из основного состояния перейдет в возбужденное и тем самым перенос энергии от донора к акцептору закончится. Квант света в таком представлении выступает посредником. На самом же деле испускание и поглощение происходят одновременно, поэтому в явном виде излучение здесь не фигурирует, это – виртуальный процесс.

Некогерентный механизм действует на достаточно больших расстояниях между донором и акцептором – от 1 до 10 нм, когда эти частицы слабо взаимодействуют между собой (энергия взаимодействия – порядка 0.1 кДж/моль). Некогерентность означает, что в процессе переноса участвуют только два пигмента, и между различными актами переноса нет никакой корреляции.

Напротив, в когерентном переносе энергии одновременно участвуют несколько сильно взаимодействующих молекул, между которыми распре-

делено возбуждение. Такой механизм называют экситонным [8]. Он действует между близко расположенными пигментами при энергии взаимодействия более 1 кДж/моль. Сильное взаимодействие приводит к быстрому переносу энергии – за время порядка 100 фс (10^{-13} с).

В сотни раз медленнее (за десятки пикосекунд, т.е. 10^{-11} с) происходит перенос энергии от фотоантенны к реакционному центру. Здесь реализуется механизм Ферстера. Энергия связи между фотоантенной и РЦ мала из-за большого размера последнего. Большое расстояние между РЦ и фотоантенной требуется также для того, чтобы окисленный (т.е. отдавший электроны) донор в реакционном центре не окислял пигменты в фотоантенне, что могло бы привести к прекращению переноса энергии. Кроме того, при быстром поступлении энергии реакционный центр не успеет ее «переварить»: после переноса электрона ему требуется некоторое время, чтобы вернуться в рабочее состояние и быть готовым получить новую порцию энергии. Таким образом, электронная энергия довольно быстро перемещается по антенне и достаточно медленно, на два порядка дольше, перетекает из нее в РЦ.

А вот в самом РЦ перенос электрона между пигментами не может происходить по Ферстеру, он требует сильного взаимодействия между электронными состояниями донора и акцептора. Общепринятым считается такой механизм процесса [9], когда реакционный центр получает электронную энергию, молекула первичного донора электрона – специальной пары Р (рис. 3) – переходит в возбужденное электронное состояние P^* , при этом геометрия молекулы становится неравновесной. В возбужденном состоянии электронная энергия зависит от координат некоторых ядер специальной пары (комбинация таких координат называется «координатой реакции») (рис. 4) и при некоторой геометрии

специальной пары происходит электронный переход – молекула оказывается в состоянии, в котором электрон перешел от специальной пары (донора) к соседнему бактериохлорофиллу (акцептору). Тем самым перенос электрона обеспечивается согласованным движением ядер донора и акцептора вдоль координаты реакции. В результате образуется состояние с разделенными зарядами – донор приобретает положительный, а акцептор – отрицательный заряд. Дальнейшие переходы электрона от первичного акцептора к другим пигментам способствуют разнесению противоположных зарядов в пространстве и созданию разности потенциалов, которая используется затем в системе хранения энергии.

Описанная картина переноса электрона имеет серьезный недостаток – в ней совсем не учитывается белок. Наши квантовохимические расчеты взаимодействия пигментов РЦ с белком показывают, что участие белка может кардинально изменить этот механизм.

Разнообразные функции белка в первичных световых стадиях

Молекулы пигментов, участвующие в переносе энергии и переносе электрона, не висят в вакууме – они погружены в белковую среду (рис. 2 и 3), которая, как считалось раньше, непосредственно в переносе не участвует, но жизненно необходима фотосинтетическим организмам для осуществления их функций. Аминокислотные остатки белка образуют ковалентные химические связи с пигментами, объединяя их в единую супрамолекулярную структуру и выполняя тем самым структурообразующую роль. Число атомов белка в фотосинтетических устройствах в несколько раз превышает число атомов пигментов. Так, фотоантенна, изображенная на рисунке 2, включает 18 белковых цепей, содержащих примерно 13 200 атомов, и 36 молекул пигментов, всего около 4800 атомов. Таким образом, на

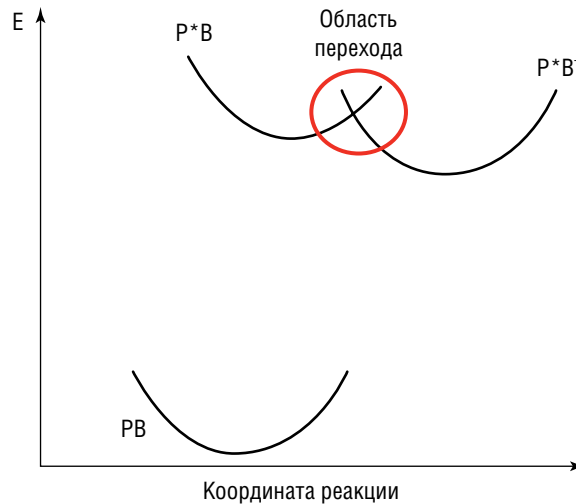


Рис. 4. Перенос электрона в РЦ как взаимодействие электронных состояний. PB – основное электронное состояние донора электрона P и акцептора B , P^* – возбужденное состояние донора, P^*B^- – состояние с разделенными зарядами.

долю белка приходится примерно три четверти всех атомов в фотоантенне, а в РЦ доля белка еще выше.

Все атомы в белке колеблются около равновесных положений. Взаимодействие колебаний белка с колебаниями молекул пигментов (фонон-фононное взаимодействие) и с их электронными состояниями (электрон-фононное взаимодействие) позволяет белку эффективно поглощать энергию пигментов и тем самым служить для них тепловым окружением («термостатом»). При слишком интенсивном облучении фотосистемы белок, рассеивая избыточную энергию, защищает систему от «перегрева». Вторая функция белков в фотосистемах – защитная, или протекторная.

Диссипация энергии пигментов в белок используется не только для защиты фотосистемы, но и для того, чтобы путем тонкой настройки электронных свойств пигментов облегчать перенос энергии и электрона между ними. Так, на определенном этапе переноса электрона в РЦ белок, взаимодействуя с акцептором, отнимает у него часть энергии после переноса электрона и делает невозможным обратный процесс, что повышает эффективность разделения заряда.

Более того, в некоторых случаях именно белок определяет направление процесса переноса. Так, в РЦ пурпурных бактерий перенос электрона идет по ветви А, но практически не идет по ветви В, хотя расположение пигментов в обеих ветвях совершенно симметрично. Все дело в белковом окружении пигментов, оно заметно различается у разных ветвей. Именно это различие приводит к тому, что по одной ветви перенос электрона идет, а по другой – нет. Эксперименты с мутантами показали, что замена всего одного, точно выбранного аминокислотно-

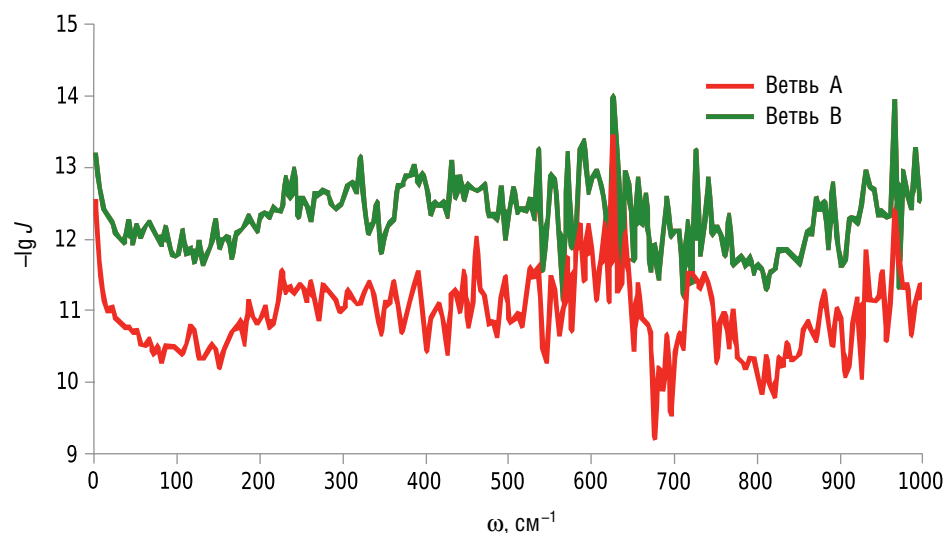


Рис. 5. Зависимость интенсивности взаимодействия (J) пигментов с белком от частоты колебаний (ω) на первой стадии переноса электрона в РЦ. По оси ординат используется логарифмическая шкала с обратным знаком.

го остатка в белковом окружении может полностью остановить перенос электрона [10]. Это означает, что взаимодействие пигментов с белком играет определяющую роль при выборе ветви, по которой пойдет перенос электрона. Данный вывод подтверждается нашим расчетом спектральных функций взаимодействия на ветвях А и В (рис. 5). Видно, что они сильно отличаются в первую очередь по порядку величины: в ветви А взаимодействие пигментов и белков в среднем на два порядка больше, чем в ветви В.

Таким образом, взаимосвязь и конкуренция различных взаимодействий – пигментов между собой и пигментов с белковым окружением – определяют свойства процессов переноса энергии и электрона: их скорость, эффективность, характер (обратимый или необратимый) и направление. В этом – суть регулирующей функции белка.

Мы не рассматриваем здесь традиционную функцию белка – каталитическую. Она, разумеется, реализуется во всех фотосинтетических организмах, но на более поздней стадии, когда после разделения зарядов в РЦ и переноса протонов через мембрану начинаются химические реакции.

Еще одна неожиданная функция белка обнаружилась при детальном теоретическом анализе первичного переноса электрона в РЦ пурпурной бактерии *Rh. sphaeroides*. Высокоточный квантовохимический расчет электронных состояний РЦ и его ближайшего белкового окружения показал, что в возбужденном электронном состоянии колебания ядер характеризуются частотами, которые сильно превышают экспериментальные [11]. Такие высокочастотные движения не могут вызвать переход РЦ из одного электронного состояния в другое, а других движений, как показывает эксперимент, нет. Получается,

что в таком РЦ у переноса электрона отсутствует ядерная координата реакции, поэтому общепринятый механизм, изображенный на рисунке 4, здесь неприменим.

Тогда как же происходит перенос? Оказалось, что исходное электронное состояние и состояние с перенесенным электроном взаимодействуют не напрямую, а только через белковое окружение пигментов. Без белка перехода вообще бы не было, так как нет взаимодействия между исходным и конечным состояниями. Такой механизм взаимодействия через среду известен в литературе [12], однако в живых системах он обнаружен впервые [11]. Доказательством справедливости этого механизма служат результаты сравнения наших теоретических расчетов и экспериментальных данных, полученных методом спектроскопии с временным разрешением (рис. 6). На рисунке видно, как меняется со временем заселенность исходного и конечного электронных состояний в течение первых 500 фс, что составляет примерно шестую часть от полного времени первичного переноса электрона.

Заключение

Полученные нами результаты показывают, что в простейших фотосинтетических организмах –

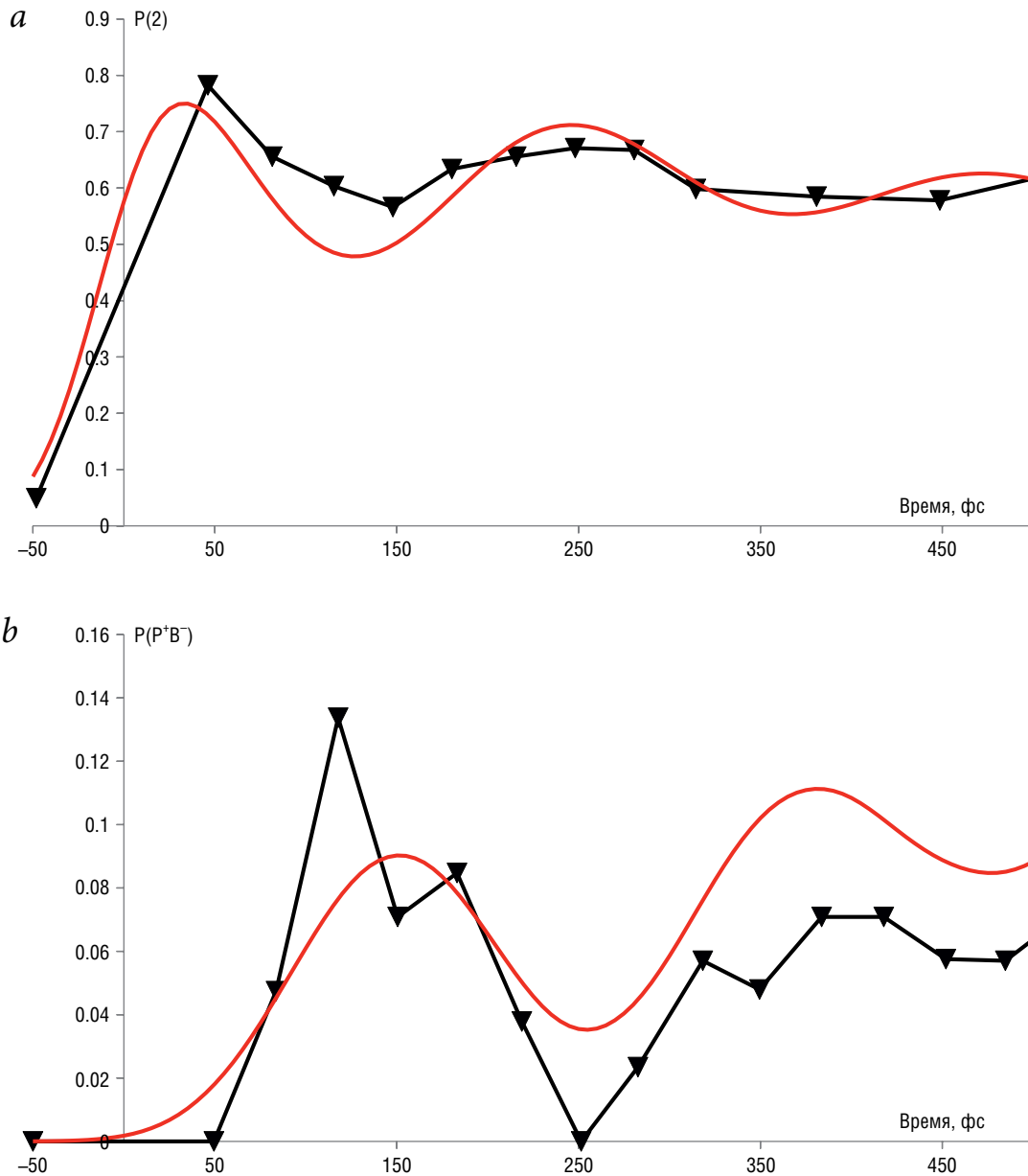


Рис. 6. Зависимость от времени заселенности: возбужденного электронного состояния РЦ до переноса электрона (P^*V) (а) и продукта переноса – состояния с разделенными зарядами P^+V^- (б). Красная кривая – расчет [11], черные треугольники – экспериментальные данные [9].

пурпурных бактериях – белок не просто играет роль среды, но активно взаимодействует с основными участниками фотофизических и фотохимических процессов – пигментами. Это взаимодействие, не меняя состояния самого белка, помогает фотосистемам регулировать процессы переноса энергии и электрона на первичных световых стадиях фотосинтеза, определяет скорости, вероятности и даже само направление этих процессов. В некоторых процессах переноса электрона белок осуществляет роль «посредника», через который осу-

ществляется взаимодействие электронных состояний донора и акцептора электрона. Все это становится возможным благодаря разнообразному аминокислотному составу белков и тонкой подстройке его пространственной структуры и колебательной энергии к структуре и энергии системы пигментов.

Подобная структурная сложность и активная роль среды пока недостижима в системах искусственного фотосинтеза, в которых среда значительно более однородна, чем белок. Поэтому существующие искусственные фотосистемы уступают по характеристикам своим природным аналогам.

В данной работе мы исследовали только первичные стадии в простейших фотосинтетических

Images & Tables ●

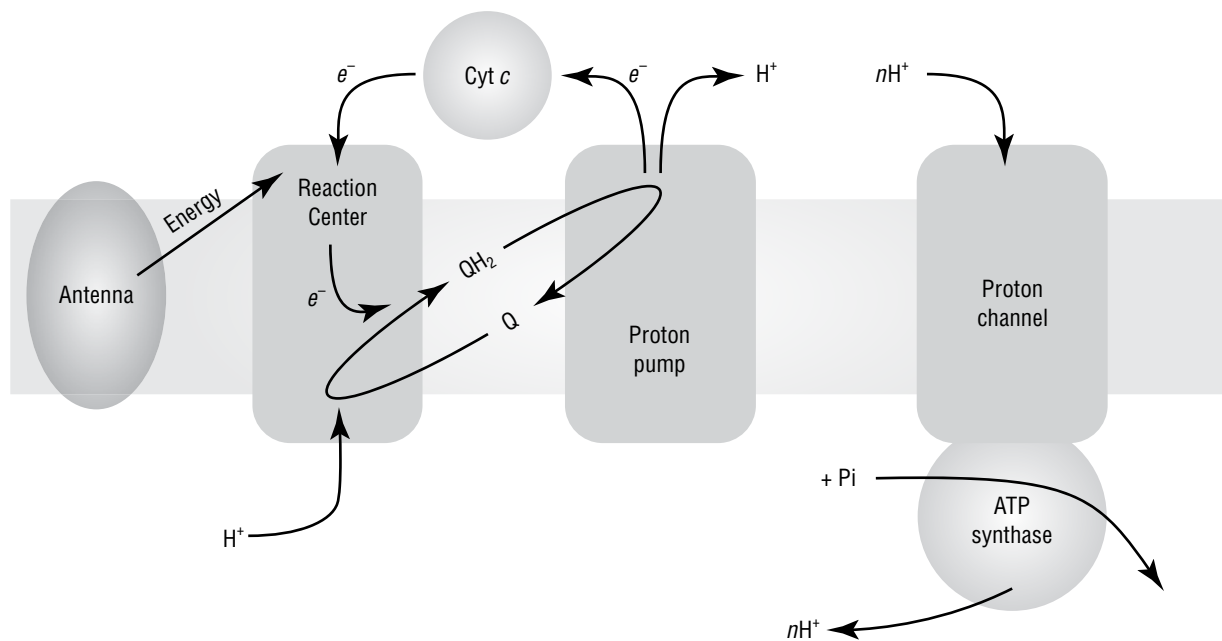


Fig. 1. The scheme of photosynthesis in purple bacteria [2]. The horizontal band represents the bilayer photosynthetic membrane. Arrows show all the processes of electron and proton transfer.

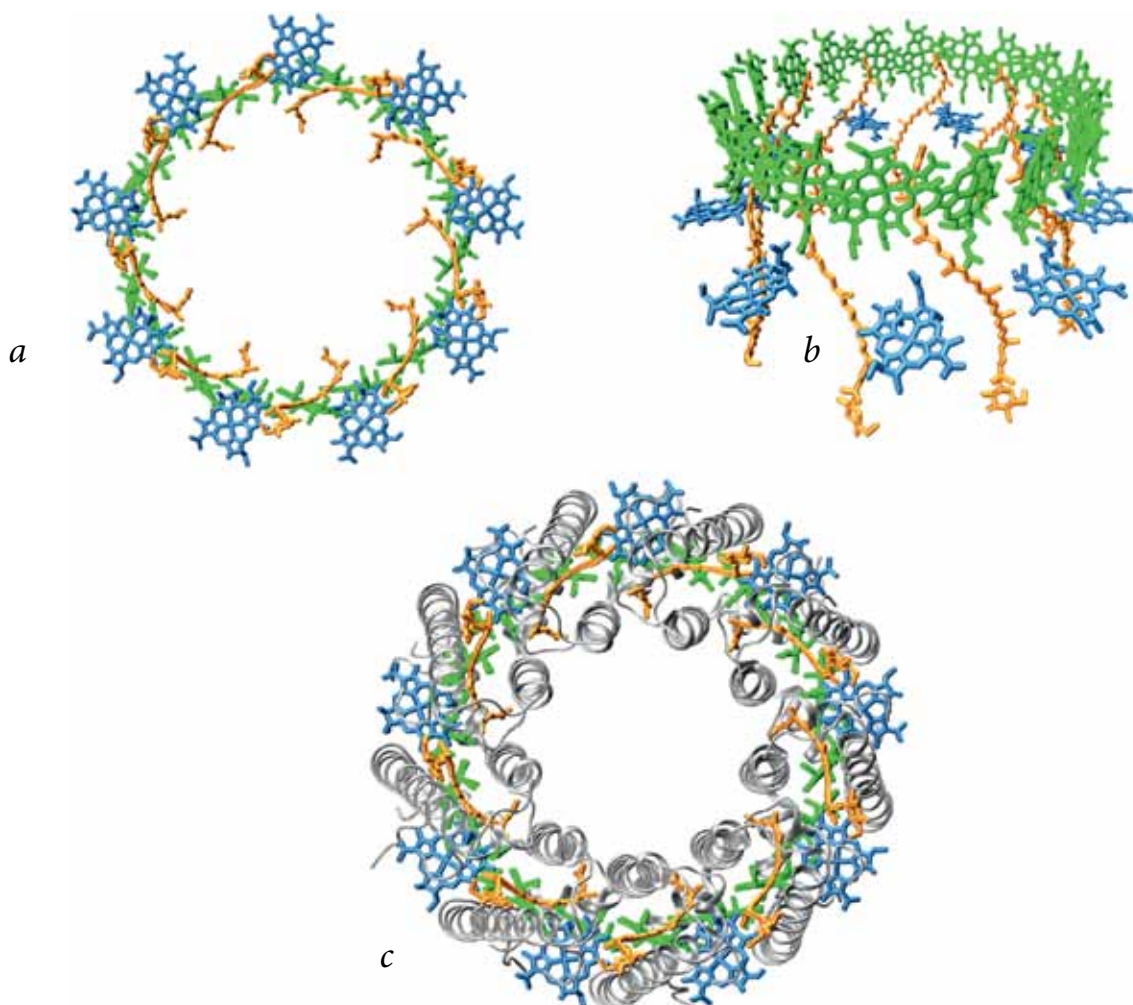


Fig. 2. The structure of the light-harvesting antenna of bacteria *Rps. Acidophila*: a – the cyclic arrangement of pigments, top view. Bacteriochlorophylls are shown in blue and green, carotenoids – in brown; b – the cyclic arrangement of pigments, front view; c – pigments in the protein environment, top view. Gray color shows the protein secondary structure.

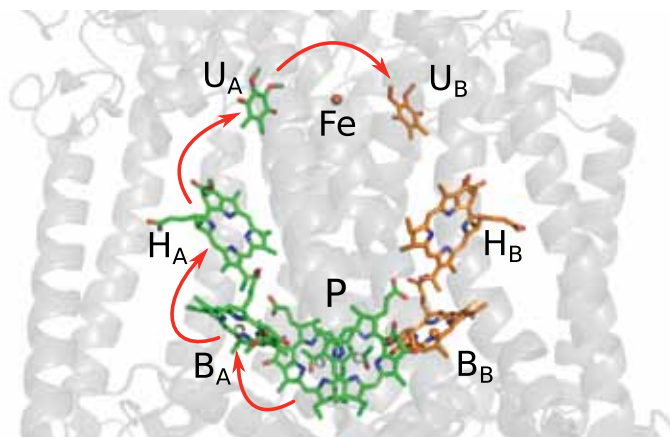


Fig. 3. The reaction center (RC) structure of the purple bacteria *Rh. Sphaeroides*. Letters denote various components of RC: P is a special pair, B – bacteriochlorophylls, H – bacteriopheophytins, U – ubiquinones, subscripts A and B denote two branches of electron transfer. The active branch is shown in green, the direction of electron transfer is shown by red arrows. The secondary structure of the protein environment is depicted by gray background.

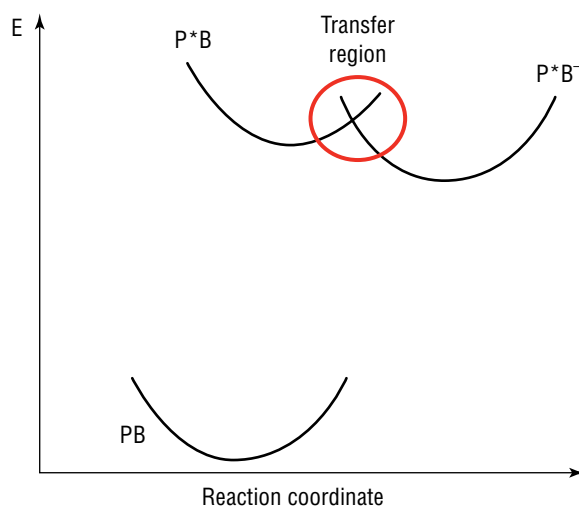


Fig. 4. Electron transfer in RC as a result of interaction of electronic states. PB is the ground electronic state of the electron donor P and acceptor B, P* is the excited electronic state of the donor, P*B⁻ is the charge-separated state.

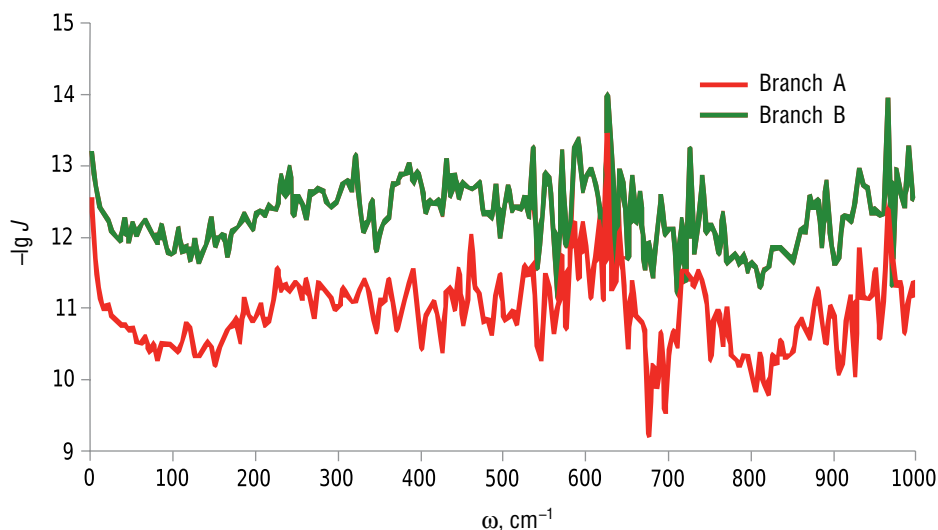


Fig. 5. The dependence of intensity (I) of pigment-protein interaction on vibration frequency (ω) during the first stage of electron transfer in RC. The ordinate axis is a logarithmic scale with a negative sign.

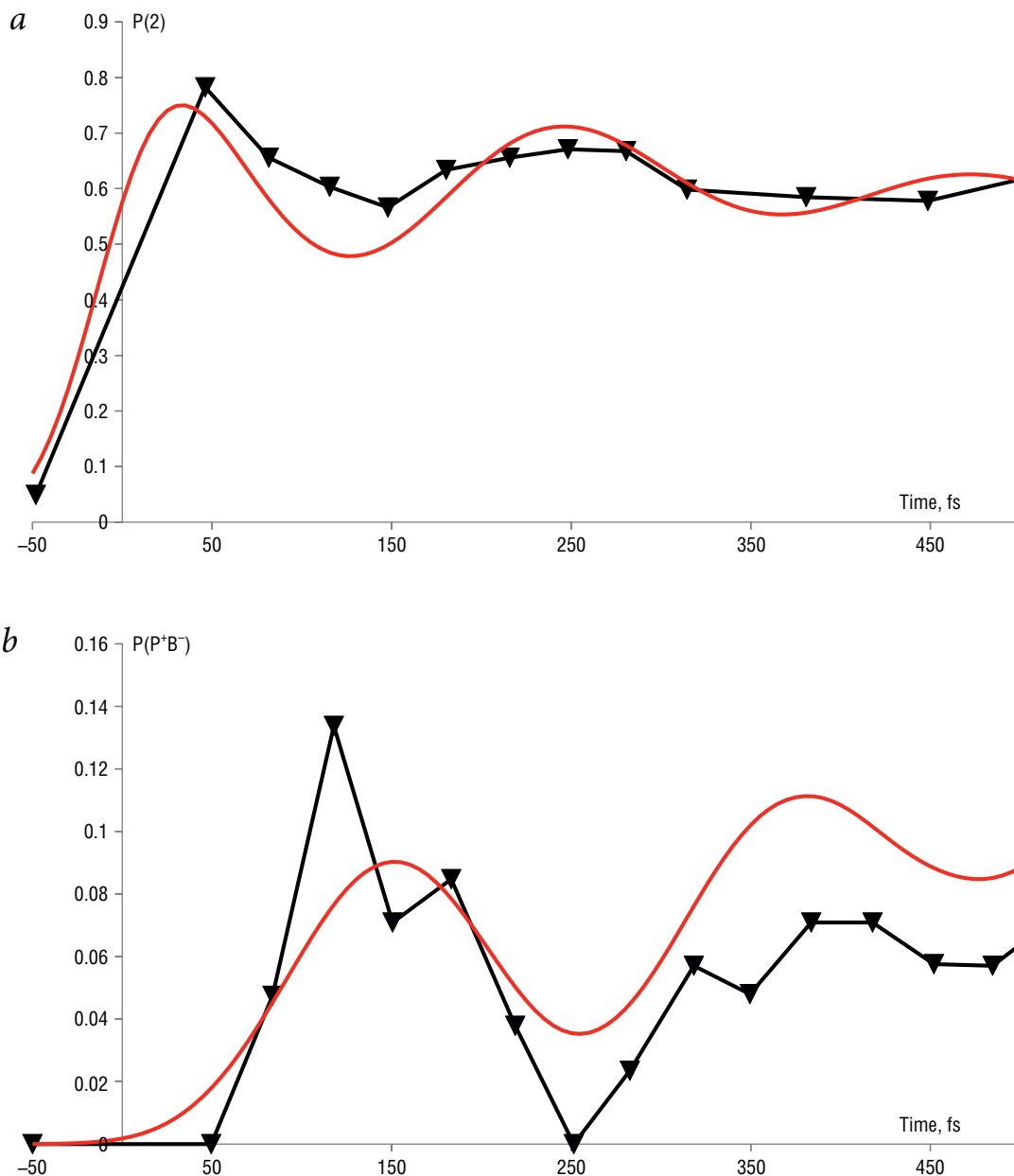


Fig. 6. The population of the excited electronic state of the RC prior to the electron transfer (P^*B) (a) and the transfer product – the charge-separated state (P^*B^-) (b) – as a function of time. Red curves show the calculation results [11], black triangles – the experimental data [9].

References

1. R.E. Blankenship
Molecular Mechanisms of Photosynthesis, GB, London, Blackwell Science, 2002, 321 pp.
2. D. Gust, T.A. Moore, A.L. Moore
Acc. Chem. Res., 2001, **34**(1), 40. DOI: 10.1021/ar9801301.
3. V.V. Eremin
Priroda: Mithly Sci. J. RAS [Russ. Nature], 2008, №12, 3 (in Russian).
4. V.V. Eremin, A.S. Belov
Russ. Chem. Rev., 2012, **81**(7), 662.
DOI: 10.1070/RC2012v081n07ABEH004252.
5. V. Cherezov, J. Clogston, M.Z. Papiz, M. Caffrey
J. Mol. Biol., 2006, **357**(5), 1605. DOI: 10.1016/j.jmb.2006.01.049.
6. D. Frolov, M.C. Wakeham, E.G. Andrizhiyevskaya, M.R. Jones, R. van Grondelle
BBA, 2005, **1707**, 189.
DOI: 10.1016/j.bbabi.2004.12.006.
7. T. Förster
Ann. Phys., 1948, **2**, 55. DOI: 10.1002/andp.19484370105.
8. A.S. Davydov
Sov. Phys. Usp., 1964, **7**(2), 145.
DOI: 10.1070/PU1964v007n02ABEH003659.
9. A.G. Yakovlev, A.Y. Shkuropatov, V.A. Shuvalov
FEBS Letters, 2000, **466**, 209.
DOI: 10.1016/S0014-5793(00)01081-4.
10. V. Nagarajan, W.W. Parson, D. Gaul, C. Schenck
Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1990, **87**(20), 7888.
11. I.O. Glebov, V.V. Poddubnyy, V.V. Eremin
Mol. Phys., 2015, **113**(21), 3196.
DOI: 10.1080/00268976.2015.1013070.
12. P. Rebertrost, M. Mohseni, I. Kassal, S. Lloyd, A. Aspuru-Guzik
New J. Phys., 2009, **11**(3), 033003.
DOI: 10.1088/1367-2630/11/3/033003.

Новые парадоксы старых дубрав*

М.В. Бобровский

Дубравы представляются одними из наиболее знакомых и изученных лесных сообществ. Однако большинство исследований было выполнено в существенно антропогенно преобразованных лесных ландшафтах. В итоге пока мы очень мало знаем о том, какими были широколиственные леса до начала активной антропогенной деятельности и какими они могли стать без воздействий человека. Основываясь на результатах наших исследований, проведенных в старовозрастных дубравах заповедника «Калужские засеки» и на других территориях, мы предлагаем свои ответы на вопрос: в какой мере разные биотические и антропогенные факторы ответственны за поддержание биоразнообразия дубрав в прошлых и современных ландшафтах. Рассмотрены возможности расселения видов растений широколиственных лесов на новые участки после прекращения распашки и выпаса; влияние «окон» и валежа на видовое разнообразие растений; особенности строения и развития почв наиболее старовозрастных дубрав.

Ключевые слова: широколиственные леса, история природопользования, динамика биоразнообразия, гэд-динамика, сукцессии, темногумусовые почвы.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-14-20094).

Не на далекой Амазонке, не в джунглях Африки, а в старой Европе сохранились на нашей Земле редкие и удивительные леса – дубравы. Их площадь сокращается быстрее, чем площадь дождевых тропических лесов. При этом видовое разнообразие и продуктивность этих лесов выше, чем в остальных сообществах бореального и умеренного поясов.

Некогда широколиственные леса занимали обширные пространства Европы. Однако деятельность человека принципиально изменила облик живого покрова. Широколиственные леса как зональная растительность сохранились в виде узкой полосы между лесостепью и тайгой. Вернее, даже не полосы, а небольших островков среди распаханых территорий в давно и хорошо освоенных человеком районах Европы.

На протяжении столетий дубравы служили хозяйству человека и во многом являются результатом этого хозяйства. Поэтому до сих пор неизвестно, в какой мере разные биотические и антропогенные факторы ответственны за существование различных видов растений в древних и современных ландшафтах. Какую роль сыграло хозяйство человека в фор-

мировании современных дубрав? Каковы механизмы поддержания разнообразия этих лесов в прошлом и современных дубравах? На эти вопросы мы постараемся ответить в настоящей статье.

Где сохранились наименее нарушенные дубравы?

Наиболее крупные массивы дубрав на Русской равнине сохранились на месте бывших засечных черт – оборонительных линий. Первой чертой была Заокская, которая была создана с образованием Московского государства как линия сплошных лесов и оборонительных сооружений вдоль его южной границы. К середине XVI в. эта линия протянулась на 600 км от Козельска до Рязани через Тулу, Каширу [1]. Пограничное положение засечных лесов в течение длительного вре-



БОБРОВСКИЙ

Максим Викторович

Институт физико-химических
и биологических проблем почвоведения РАН

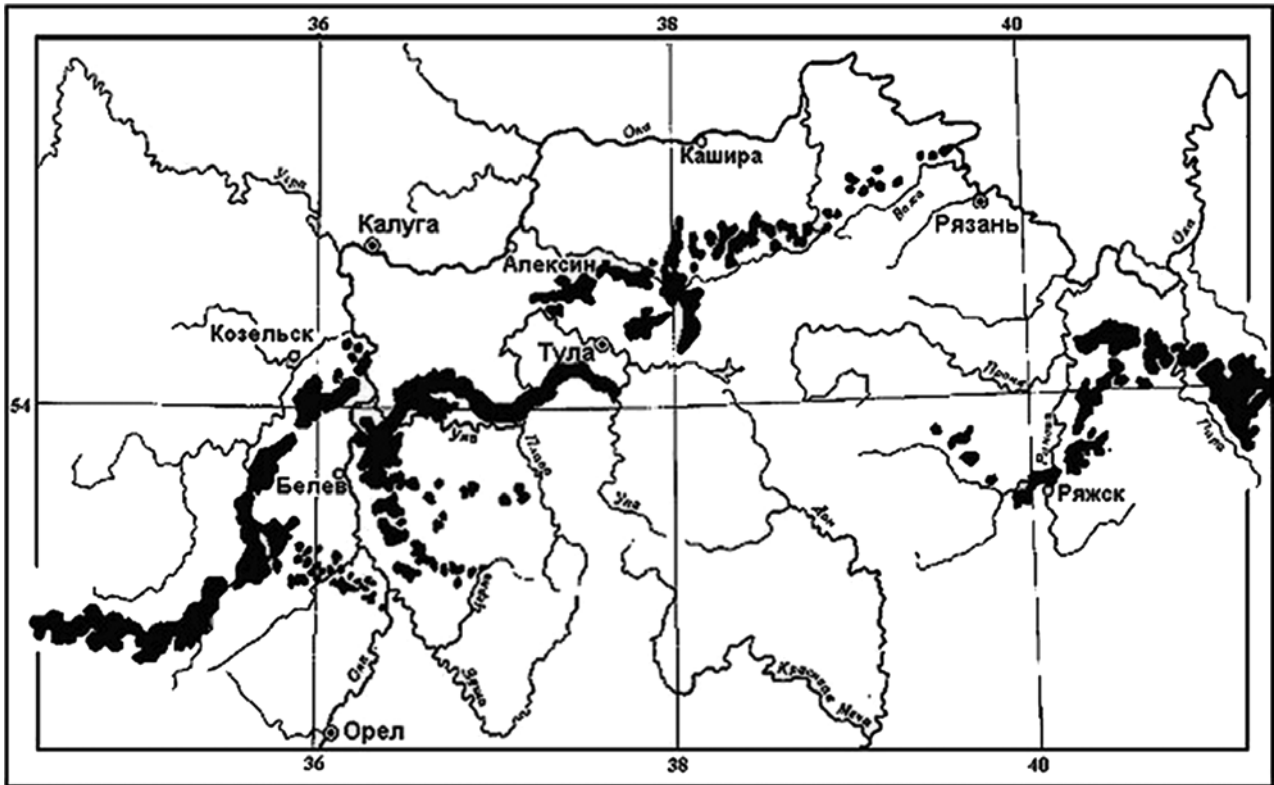


Рис. 1. Сохранившиеся массивы лесов на территории Заокской засечной черты.

мени сохраняло их от уничтожения. После потери оборонительного значения большая часть засек сохранила статус казенных лесов, что обеспечивало им некоторую охрану, а главное – стабильность границ лесных массивов [2]. Таким образом сохранились леса Тульских и Калужских засек.

Очертания остатков засечных лесов можно легко увидеть на космических снимках или топографических картах (рис. 1). В 1935 г. был учрежден государственный заповедник «Тульские засеки» им. В.В. Докучаева, однако в 1951 г. он был упразднен наряду со многими другими заповедниками страны. Дубравам Калужских засек повезло больше. В XX в. они были фактически забыты, чему способствовало их расположение в «медвежьем углу» на границе трех областей (Калужской, Тульской и Орловской) и, как следствие, отсутствие удовлетворительных дорог. Созданный в 1992 г. заповедник «Калужские засеки» включил в себя два крупных массива засечных дубрав, а оставшаяся

часть дубрав охраняется на территории учрежденного в 1997 г. национального парка «Угра». Основным объектом наших исследований послужили массивы дубрав на территории «Калужских засек».

Современный облик засечных дубрав

Дубравы – многовидовые широколиственные леса, для которых характерна сложная структура [3]. В «Калужских засеках» мы можем видеть сохранившиеся осколки наиболее богатых дубрав (рис. 2): здесь рядом растут дуб черешчатый, липа сердцелистная, ясень обыкновенный, вязы шершавый и горный, клены остролистный и полевой. Возраст дуба здесь достигает 300 лет, остальных деревьев – 170 лет [4].

В ярусе кустарников наиболее заметное место занимает лещина. Некогда человек специально заботился о поддержании «плантаций» лещины для получения лесных орехов. Современное доминирование лещины связано с тем, что омоложение и разрастание ее кустов было стимулировано повреждениями при рубках и выпасе скота. Возраст отдельных кустов лещины более 200 лет. Кроме лещины, в лесах засек повсеместно встречаются такие кустарники, как бересклеты бородавчатый и европейский, жимолость обыкновенная, крушина ломкая и др.

В травяном покрове основной части дубрав безраздельно господствуют типичные виды широколиственных лесов: сныть, зеленчук, пролесник, копы-



Рис. 2. Дубравы «Калужских засек» весной.

тень, медуница, осока волосистая, бор развесистый, колокольчик широколистный и др.

Особенностью флоры широколиственных лесов является значительное участие эфемероидов – многолетних трав, цветущих ранней весной и заканчивающих вегетацию до смыкания полога леса. Разноцветный ковер эфемероидов, который можно увидеть в конце апреля – первой половине мая в дубравах, составляют: хохлатки Маршалла, полая, промежуточная; зубянки клубненосная и пятилистная. Рядом с ними цветут хохлатка плотная, ветреница лютичная, чистяк весенний, гусиные луки желтый и малый – эфемероиды, которые можно встретить и в других сообществах. С начала мая до июля во многих дубравах засек почва густо покрыта медвежьим луком – черемшой. К сожалению, леса подобного состава занимают сейчас очень небольшие площади.

Жизнь прожить – не поле перейти

В почвах большинства дубрав присутствуют следы древней распашки. Например, в почвах лесов района Куликова поля (Тульская обл.) нами описан старопахотный горизонт XII в., в почвах дубрав Калужских засек – предположительно XIV в. Вероятно, эти земли прошли через распашку в XI–XIV вв., после колонизации славянами и до формирования засек как пограничных лесов. Насколько успешно могли восстановиться дубравы на месте бывших пашен? Много ли растений дубрав способны «выбраться» из леса на заброшенные пашни?

Для ответа на эти вопросы мы исследовали пашни, примыкающие к старовозрастным дубравам и заброшенные 25–30 лет назад. За это время здесь сформировались ивово-березовые леса с подростом из широколиственных деревьев. Разные виды деревьев смогли расселиться на разные дистанции. Дальше всех (более километра) способен рассе-

ляться дуб, желуди которого разносят сойки. Липа, соплодия которой снабжены «парусом», способным скользить по снегу, встречена нами на расстоянии 600 м от леса. Расселяющиеся семенами-крылатками ясень, вяз шершавый, клены остролистный и полевой – до 400 м.

Изучению дальности расселения широколиственных деревьев посвящено немало работ [5, 6]; наши данные, в целом, совпадают с результатами других исследователей. При этом благодаря нахождению уникальных объектов, где с начала зарастания достоверно не было таких воздействий, как травяные палы и выпас скота, нам удалось впервые выявить этапы спонтанного зарастания пашен. Формирование сомкнутого полога из мелколиственных видов деревьев происходит через 3–5 лет после начала зарастания, через 10–15 лет происходит возобновление широколиственных деревьев, наиболее интенсивное – ближе к стене дубравы (рис. 3). Под укрытием широколиственных деревьев в это время на пашни начинают расселяться даже наиболее требовательные к условиям теневого леса травы.

Среди травянистых растений дальше всех расселились те, семена которых способны цепляться к шерсти животных, – такие травы, как звездчатка жестколистная, лютик кашубский иногда можно встретить за сотни метров от дубравы (рис. 4).



Рис. 3. Иво-березняки с подростом широколиственных деревьев на бывших пашнях.

На втором месте по дальности расселения виды, семена или споры которых переносит ветер: они встречены нами на расстоянии до 120 м от дубравы. Большинство трав широколиственного леса – копытень, медуница, зеленчук – являются мирмекохорами, их семена разносят муравьи. Семена многих из этих растений снабжены специальными выростами (эласмосомами), питательными для муравьев. Эти травы образовали почти сплошной ковер до 50–80 м от границы дубравы.

Недавно считалось, что по присутствию в лесах ряда эфемероидов можно отделить длительно лесные территории от участков, в прошлом прошедших через распашку. Однако мы встретили на бывших пашнях, заброшенных 25–30 лет назад, все виды эфемероидов, хотя дальность расселения некоторых из них (хохлатка Маршалла, черемша) составила всего 20–40 м.

В целом, на зарастающих пашнях было встречено более 90% растений, растущих в примыкающих широколиственных лесах. Получается, что почти все виды растений современных дубрав способны относительно быстро заселять брошенные пашни. Был сделан принципиальный вывод, что для это-

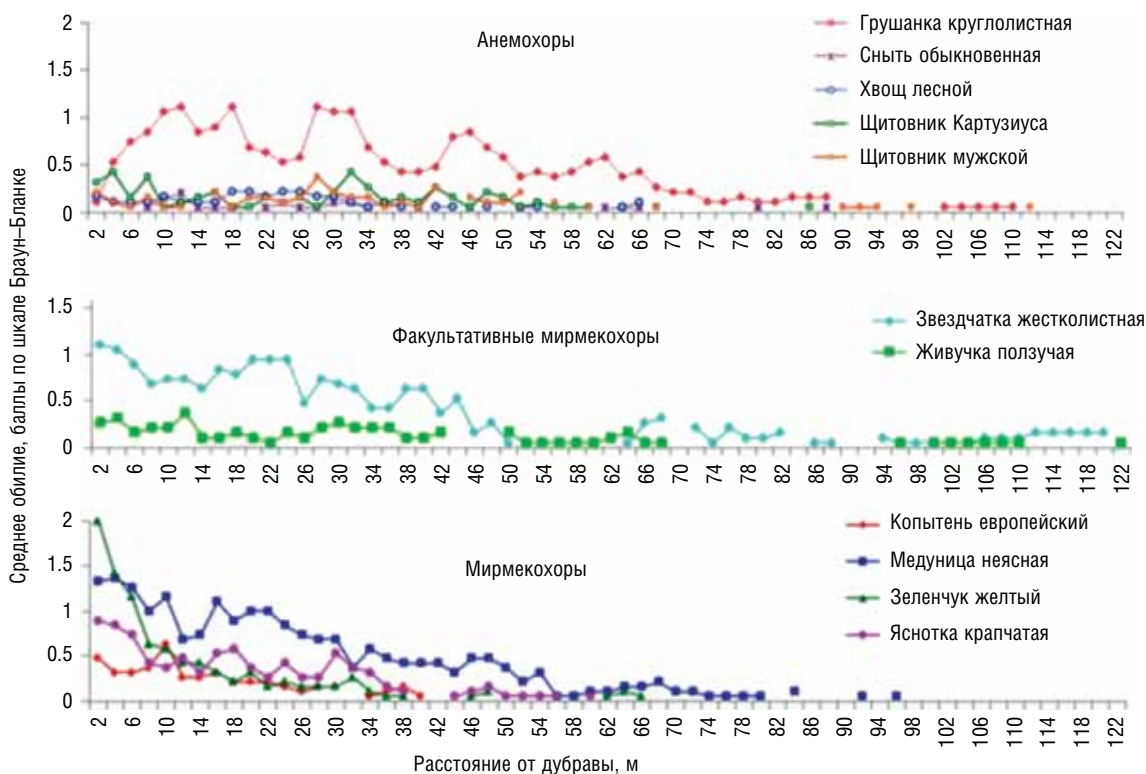


Рис. 4. Дальность расселения некоторых лесных растений на зарастающие пашни.

го необходимо совпадение нескольких условий: возможности заноса семян (то есть близости леса, в котором обитают эти виды, и небольшой площади пашен) и отсутствия нарушений, прежде всего пожаров, после начала зарастания.

При размерах нарушений лесной растительности больше десятков – первых сотен метров формируются участки с обедненным разнообразием лесных видов растений. Если такие обедненные участки сохраняются, но при этом уничтожаются соседние дубравы с богатой флорой, общее видовое богатство лесных видов растений на территории уменьшается. В свою очередь травяные палы препятствуют заселению пашни деревьями, вместо них здесь начинает господствовать бурьян. Наши исследования показали, что после многократных палов даже после их прекращения заселение таких участков деревьями и травами широколиственных лесов сильно заторможено. Сейчас пожары являются главным фактором, препятствующим нормальному восстановлению лесов на заброшенных пашнях.

С одной стороны, полученные результаты могут быть причиной для оптимизма – широколиственные леса могут успешно восстанавливаться на бывших пашнях. Даже бедные почвы не являются помехой для поселения видов растений, традиционно считающихся требовательными к почвенному богатству (ясень, черемша). Однако возможен другой вывод: современная флора даже наиболее хорошо сохранившихся дубрав – результат предшествующего чередования распашек и зарастания пашен лесом: сохранились именно те виды растений, которые могли расселяться на пашни, а остальные виды были утрачены.

Окна в лесу и другие странности

Особенностью дубрав северной части Русской равнины считали их «теневой» характер: летом плотный древесный полог пропускает минимум солнечных лучей [7]. В напочвенном покрове здесь

преобладают средние по размеру травы, такие как осока волосистая, сныть, зеленчук, медуница, копытень. Однако со временем пришло осознание факта, который сейчас кажется очевидным, – сомкнутыми леса могут быть только после сильных нарушений (обычно это первое, редко второе поколение деревьев после распашки, сплошной рубки и т.п.) [3]. В лесах без нарушений деревья старятся и падают, образуя «окна» – разрывы в пологе (рис. 5). Старый, «свободный» от нарушений лес должен представлять собой разновозрастную мозаику таких «окон», повсюду должны встречаться упавшие стволы деревьев. Подобные леса хорошо описаны в бореальных и тропических широтах, однако даже в самых старовозрастных дубравах нет подобной мозаики, здесь удается найти участки только с отдельными «окнами».

Основную причину мы предполагаем в том, что дубравы расположены в густонаселенных областях и до совсем недавнего времени контролировались человеком. Например, в ныне безлюдном районе «Калужских засек» в конце XIX в. плотность населения составляла 50 чел./км² [8]. Деревья рубили, не давая им возможности состариться и упасть. Кроме того, в лесах собирали хворост, удаляли сухие и упавшие деревья; с ранней весны до поздней осени пасли коров. Ситуация принципиально изменилась



Рис. 5. «Окна» и валежины в старовозрастных дубравах «Калужских засек».



Рис. 6. Двулепестник альпийский (а) и береза (b) на старых валежинах.

только во второй половине 80-х гг. прошлого века, как в связи с развитием газификации, так и в результате социально-экономического кризиса, приведшему к резкому сокращению численности сельского населения. Только в наиболее удаленных от деревень лесах в глубине засечных массивов эти воздействия ослабли раньше, в основном после Второй мировой войны. В результате здесь можно встретить стволы деревьев, упавшие в разное время, в том числе десятки лет назад. Нашими исследованиями показано, что флора на таких участках заметно отличается от остальных дубрав. В световых окнах, возникших при падении старых деревьев, преобладают высокие травы – лунник оживающий, крапива, двулепестник парижский. На лежащих стволах, на разлагающейся древесине растут «клумбы» из разнообразных трав и папоротников, в том числе представителей так называемого мелкотравья, более характерного для таежных лесов: двулепестника альпийского, майника двулистного (рис. б). Здесь же можно встретить растения, которые вовсе не ожидаешь увидеть в глубине дубравы, – лесную землянику, иван-чай. По сравнению с почвой на валежинах намного выше плотность подроста деревьев – рядом растут маленькие вязы, ясени и липы. Здесь обычны и виды деревьев, возобновление которых на почве отсутствует: березы, рябина.

Сколько еще видов появится в дубравах, когда пройдет время и здесь сформируется нормальная «оконная» мозаика? И сколько видов в результате столетий воздействий хозяйства человека потеряны для этих лесов необратимо? Ответы на эти вопросы – результат будущих исследований.

А был ли мальчик?

Дубраву обычно воспринимают как слаженный ансамбль видов, сложившийся в ходе долгой совместной эволюции [9]. Однако может ли быть так, что это относительно случайная компания видов, собравшаяся вместе, как в сиротском доме? По мере распашки остальных пространств здесь могли «собраться» виды, способные относительно устойчиво существовать в условиях теневых лесов, которые человек сохранял для нужд заготовки строевой и дровяной древесины.

Работами О.В. Смирновой [10, 11], Ф. Веры [12] и других авторов показано, что до активного развития производящего хозяйства наиболее мощным фактором, организующим живой покров и определяющим компоновку видов в сообществах, была деятельность крупных стадных фитофагов, которые способны создавать и поддерживать нелесные местообитания. В зоне дубрав, помимо уцелевших до наших дней зубров, обитали ныне вымершие туры, лесные лошади (тарпаны). Наибольший «научный экстремизм» проявил Ф. Вера, предположивший, что лесная растительность на большей части планеты – результат совсем недавнего, по биологическим меркам, исчезновения стадных фитофагов, в котором человек сыграл решающую роль [12]. Есть ли запрет на существование видов растений «теневых дубрав» вне постоянной лесной среды, внутри мозаики сообществ, создаваемой выпасом копытных?

Изучение нами процесса расселения растений дубрав на заброшенные пастбища, который может



Рис. 7. Возобновление дубов на зарастающих пастбищах в «Калужских засеках».

служить условной моделью таких сообществ при временном снижении пастбищной нагрузки или ее низкой интенсивности, принесло немало сюрпризов. Оказалось, что, как и при зарастании пашен, большинство (более 2/3) видов растений дубрав способно за 20–30 лет «выбраться» на прилегающие к лесу участки пастбищ. Здесь формируется своеобразная опушка шириной 30–80 м с ивово-березовым древостоем, подростом из широколиственных видов деревьев и покровом из дубравных трав.

Ранее совместно с О.В. Смирновой мы писали о недостаточности разделения видов деревьев на группы пионерных и позднесукцессионных [13, 14]. Некоторые виды, такие как яблоня лесная, груша обыкновенная и, как ни удивительно, дуб черешчатый, не вписываются в эти группы, образуя «опущенную» группу. Вне вторичных березовых или сосновых лесов их устойчивое возобновление можно встретить только на зарастающих лугах. Это оказалось справедливо и для пастбищ в «Калужских засеках» (рис. 7). Однако результаты показали, что успешно заселять пастбища способны вообще все виды деревьев, а также некоторые кустарники. При этом заселение пастбищ разными древесными видами происходит практически одновременно: в этом случае уже не приходится говорить о группах видов, все виды являются пионерами.

Конечно, при интенсивном выпасе подрост большинства из них был бы в основном уничтожен стадными копытными. Но в заповеднике подросту удастся уцелеть при довольно высокой численности лосей, а также пока умеренном выпасе на этих полях части вольноживущей популяции зубров.

Пока полученных данных недостаточно, чтобы предположить возможность устойчивого существования видов дубрав в условиях полуоткрытых и открытых ландшафтов. Вероятно, многие виды дубрав способны к этому, а успешное возобновление некоторых видов, традиционно считающихся

дубравными (собственно дуб, лещина) наиболее массово именно в таких условиях. Однако заметной части дубравных видов для жизни все-таки необходима лесная среда.

Последнее слово за почвами

Можно ли установить, какая растительность была на месте современных широколиственных лесов в прошлом? Какие виды растений их составляли? Существует множество методов реконструкции состава растительных сообществ прошлого, основной из которых – споро-пыльцевой (палинологический) анализ отложений. Чаще всего изучают пыльцевые зерна и споры растений, последовательно отложившиеся и захороненные в болотах (торфах) или озерах. На основании результатов определения спор и пыльцы выявляют спорово-пыльцевые спектры и комплексы, по которым реконструируют состав растительности. У споро-пыльцевого анализа есть несколько серьезных ограничений: разные виды имеют разную пыльцевую продуктивность; дальность разноса пыльцы разных видов различна и у некоторых видов очень велика; сохраняется пыльца не всех видов; только некоторые растения определяют до вида или рода (например многие деревья), большинство растений определяют только до семейства. В итоге получается примерная картина представленности родов и семейств на некоторой



Рис. 8. Западины древних вывалов в темногумусовых почвах «Калужских засек».

территории. Метод может показывать значимые изменения в составе растительности, однако представляя компоновку видов в сообществе мы ориентируемся на наши знания о том, как сообщества устроены. Выше мы показали, что на очень небольших территориях одни и те же виды могут встречаться в составе совершенно разных сообществ – старовозрастных теневых лесов, молодых ивово-березовых лесов на месте недавних пашен или лугов.

Независимым свидетельством длительного существования лесных участков являются следы вывалов деревьев в почвах. При падении корни деревьев выворачиваются вместе с почвенным комом, материал с которого потом отсыпается обратно в западину. В результате в почве формируются специфические структуры, которые выглядят на стенке почвенного разреза как котлы или чаши [15–17]. Мы исследовали такие структуры в темногумусовых почвах «Калужских засек» (рис. 8), развитых под старовозрастными дубравами, проведя почвенно-морфологический анализ и определение возраста материала почвы, перемещенного древними вывалами, с помощью радиоуглеродного метода. Результаты показали, что на исследованном участке почва периодически перемещается вывалами уже не менее 8000 лет, при этом характер почвообразования не менялся. Все это позволяет

предположить, что состав растительности также не претерпевал принципиальных изменений. Конечно, наличие больших деревьев, их свободная жизнь и формирование вывалов не исключают обитания на этой же территории стадных копытных. Но в целом результаты свидетельствуют в пользу долговременного существования лесной растительности с близким к современному характером биологического круговорота.

На протяжении столетий дубравы были одним из центральных объектов исследования для ботаников, лесоводов, географов. Была детально описана структура этих сообществ, подробно изучены биология и экология большинства слагающих их видов. Однако большинство исследований было выполнено в условиях интенсивных воздействий человека на ландшафты широколиственной зоны, практически полного контроля за популяционными потоками деревьев и разнообразием местообитаний. В итоге пока мы очень мало знаем о дубравах – таких, какими они были до начала активной антропогенной деятельности и какими могут стать без воздействий человека.

В связи с этим необходим поиск природных ситуаций, которые могут послужить экспериментами для пополнения наших знаний о видах и сообществах дубрав. В последние десятилетия на многих территориях складываются уникальные возможности для изучения полностью спонтанной динамики этих сообществ, в некоторых случаях вместе с жизнедеятельностью восстанавливающихся популяций вольноживущих зубров. Необходимо проверить и определить, как действуют предсказанные на основе экологической теории механизмы формирования и поддержания биологического разнообразия, связанные со свободной жизнью популяций растений и животных, преобразующих среду.

В условиях заповедания одновременно с вольным выпасом зубров на территории «Калужских

Images & Tables ●

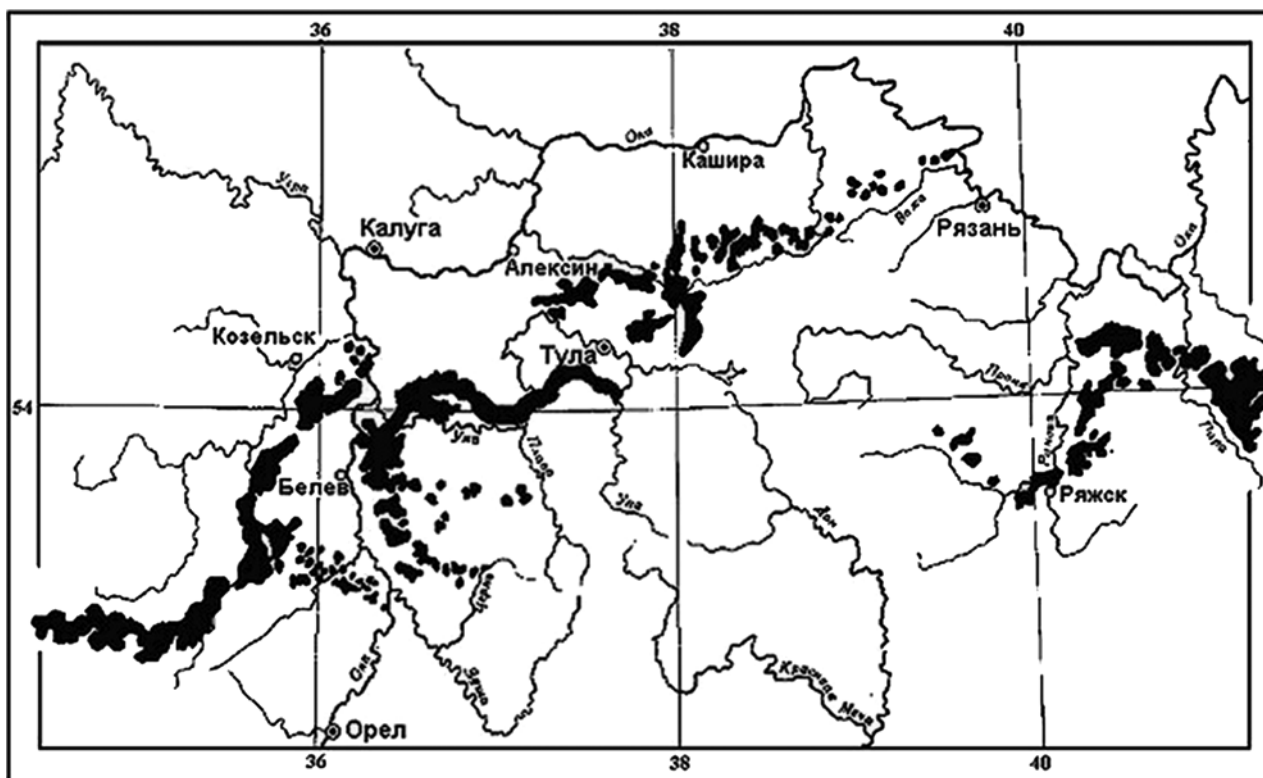


Fig. 1. Preserved forest tracts within the Zaokskaya Abatis (the former defence line) area [7].



Fig. 2. The oak forests in the State Nature Reserve “Kaluzhskie Zaseki” (“Kaluga Abatises”) in spring.



Fig. 3. Willow-birch forests and undergrowth of the broad-leaved trees on the abandoned croplands.

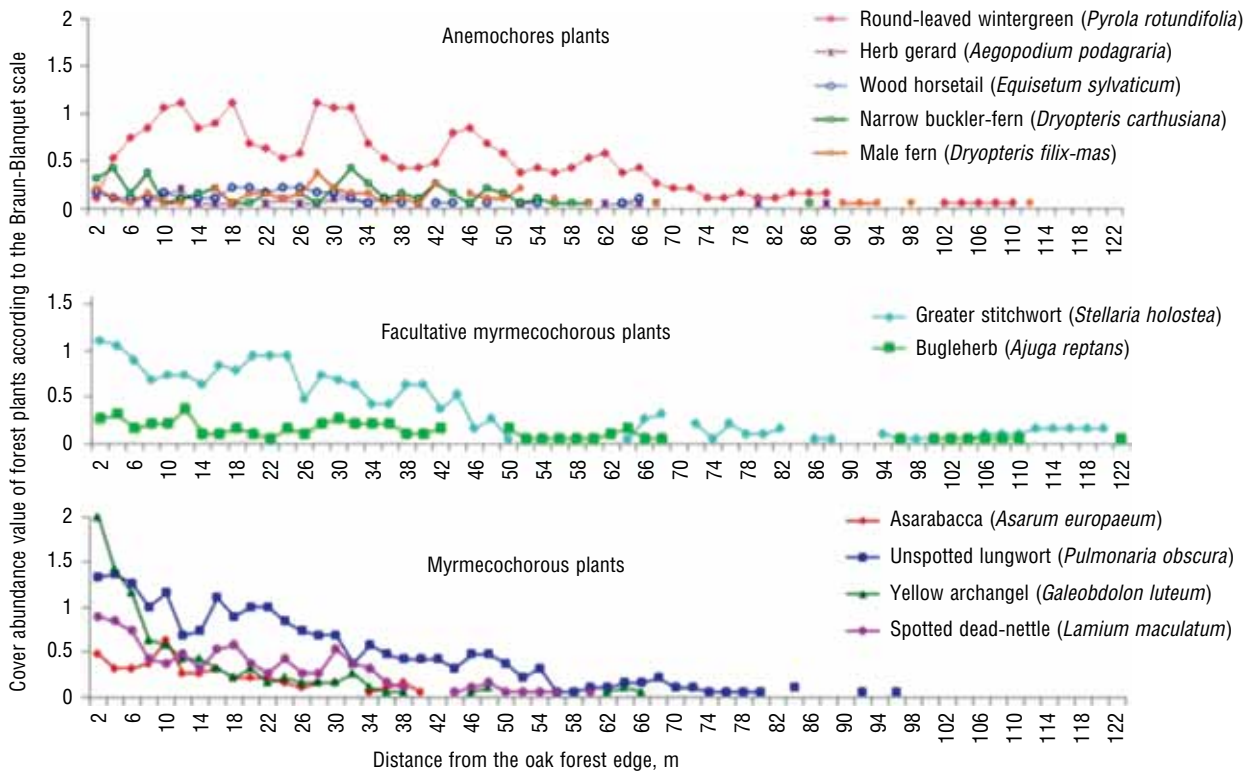


Fig. 4. Dispersion range of forest plants on abandoned croplands.



Fig. 5. Canopy gaps and fallen trunks in the old-growth oak forests in the State Nature Reserve “Kaluzhskie Zaseki” (“Kaluga Abatises”).



Fig. 6. a – Enchanter’s nightshade (*Circaea alpine*) and b – birch (*Betula*) on the dead woods.



Fig. 7. Oak forest regenerations on abandoned pastures in the State Nature Reserve “Kaluzhskie Zaseki” (“Kaluga Abatises”).



Fig. 8. Patterns of old pits caused by ancient treefalls in Phaeozems (dark-humus soils) of the State Nature Reserve “Kaluzhskie Zaseki” (“Kaluga Abatises”).

References

- A.I. Yakovlev**
Abatis Line of the Moscow State in the XVII Century: an Essay from the Defense History of the Moscow State Southern Frontiers [Zasechnaya cherta Moskovskogo Gosudarstva v XVII veke: ocherk iz istorii oborony yuzhnoy okrainy Moskovskogo gosudarstva], Russian Empire, Moscow, Print. G. Lissner & D.Sobko, 1916, 316 pp. (in Russian).
- M.V. Bobrovsky**
Kozelsk Abatises (Ecological-Historical Essay) [Kozelskie zaseki (ekologo-istoricheskiy ocherk)], RF, Kaluga, N. Bochkareva Publ., 2002, 90 pp. (in Russian).
- Eastern European Broad-Leaved Forests [Vostochnoevropeskie shirokolistvennyye lesa]*, Ed. O.V. Smirnova, RF, Moscow, Nauka Publ., 1994, 362 pp. (in Russian).
- M.V. Bobrovsky, L.G. Khanina**
In Assessment and Conservation of the Forest Cover Biodiversity in the European Russia Nature Reserves [Otsenka i sokhranenie bioraznobraziya lesnogo pokrova v zapovednikakh Evropeyskoy Rossii], Ed. L.B. Zaugolnova, RF, Moscow, Nauchnyy Mir Publ., 2000, 104–124 pp. (in Russian).
- I.F. Udra**
The Plants Dispersal and the Questions of Paleo- and Biogeography [Rasselenie rasteniy i voprosy paleo- i biogeografii], USSR, Kiev, Naukova Dumka Publ., 1988, 195 pp. (in Russian).
- O.I. Evstigneev, I.A. Murashev, V.N. Korotkov**
Russ. J. Forest Sci., 2017, № 1, 45 (in Russian).
- S.F. Kurnaev**
Shade Broad-Leaved Forests of the Russian Plain and the Urals [Tenevye shirokolistvennyye lesa Russkoy ravniny i Urala], USSR, Moscow, Nauka Publ., 1980, 316 pp. (in Russian).
- Statistical Survey of the Kaluzhskaya (Kaluga) Governorate, Vol. 1, The Kaluzhskiy District, Iss. 2 [Statisticheskoe opisaniye Kaluzhskoy gubernii, t. 1, Kozelskiy uезд, vyp. 2]*, Russian Empire, Kaluga, Govern. Administr. Board Publ., 1898, 744 pp. (in Russian).
- Yu.D. Kleopov**
Analysis of the Broad-Leaved Forests Flora of the European Part of the USSR [Analiz flory shirokolistvennykh lesov evropeyskoy chasti SSSR], USSR, Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990, 532 pp. (in Russian).
- O.V. Smirnova**
Adv. Curr. Biol. [Uspekhi sovremennoy biologii], 1998, **118**(2), 148 (in Russian).
- O.V. Smirnova, S.A. Turubanova, M.V. Bobrovsky, V.N. Korotkov, L.G. Khanina**
Adv. Curr. Biol. [Uspekhi sovremennoy biologii], 2001, **121**(2), 144 (in Russian).
- F.W.M. Vera**
Grazing Ecology and Forest History, UK, Wallingford, CABI Publishing, 2000, 506 pp.
- O.V. Smirnova, M.V. Bobrovsky, L.G. Khanina**
Bull. Moscow Soc. Nat., 2001, 106(5), 25 (in Russian).
- O.V. Smirnova, M.V. Bobrovsky**
Priroda (Russ. Nature), 2004, №12, 26 (in Russian).
- E.V. Ponomarenko**
In Successional Processes in Protected Areas of Russia and Problems of Biodiversity Conservation [Suktsessionnyye protsessy v zapovednikakh Rossii i problemy sokhraneniya biologicheskogo raznobraziya], Eds O.V. Smirnova, E.S. Shaposhnikov, RF, St-Petersburg, Russian Botanical Society Publ., 1999, pp. 34–57 (in Russian).
- M.V. Bobrovsky**
Forest Soils of European Russia: Biotic and Anthropogenic Factors of Formation [Lesnye pochvy Evropeyskoy Rossii: bioticheskie i antropogennyye faktory formirovaniya], RF, Moscow, Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2010, 359 pp. (in Russian).
- M.V. Bobrovsky, S.V. Loyko**
RJEE, 2016, **1**(1), 22 pp. (http://rjee.ru/wp-content/uploads/2016/08/rjee_1_1_2016_3_Bobrovsky.pdf). DOI: 10.21685/2500-0578-2016-1-3.

Причины и следствия разнообразия углеводов, или три «сахарных» истории из жизни одного растения*

П.В. Микшина

В статье приведены сведения о причинах и следствиях разнообразия углеводов в органическом мире в целом (по сравнению с другими биомолекулами) и в пределах одного типа полисахаридов. На примере рамногалактуронана I – пектинового гетерополисахарида крайне варибельного строения – наглядно обрисованы варианты структурно-функционального разнообразия полисахаридов, сформированных на основании одного типа строения остова в одном растении; приведен обзор сведений о строении и функциях этих полисахаридов в различных источниках.

Ключевые слова: растительные полисахариды, пектины, рамногалактуронан I, клеточная стенка растений, структурно-функциональное разнообразие углеводов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-14-20098).

Из разнообразия возникает совершенная гармония
Гераклит Эфесский

Я с детства хорошо помню тот факт, что в мире нет двух одинаковых снежинок. После школы и уж тем более после университета в голову пришло осознание, что благодаря генетическому разнообразию в мире нет и двух одинаковых людей. И несмотря на то, что цвет кожи, волос или пропорций двух людей могут быть абсолютно одинаковыми, можно не сомневаться, что их лица будут уникальными, даже для таких «копий», как однойцевые близнецы. И это только внешние проявления, не затрагивающие характер, интересы, предпочтения и многое другое.

Что же касается базовых систем, работающих на уровне клетки, то тут многим, если говорить упрощенно, кажется, что все работает по шаблону: биосинтетический аппарат «штампует» на матрице определенные структуры под те или иные задачи. Безусловно, в функционировании таких аппаратов задействованы множественные клеточные «работники» и процессы эти не настолько просты, но, в общем и целом, суть остается такой. За исключением, как минимум, тех биомолекул, что синтезируются не на матрице, диктующей строгую однородность первичной последовательности. Ключевыми биополимерами такого плана являются углеводы – неотъемлемый компонент всех представителей растительного и животного мира, составляющий основную часть органического вещества на Земле.

Следствием нематричного биосинтеза углеводов служит огромное разнообразие их структур в принципе (по сравнению с другими биомолекулами) и даже в пределах одного углеводного типа. Первое наглядно объясняется на простом примере: если вы будете строить тример для молекулы ДНК на основе трех нуклеотидов, отличающихся четырьмя видами азотистых оснований, то число возможных структурных комбинаций в итоге будет насчитывать 4^3 , то есть 64. Если аналогичный расчет проводить для трипептида, включающего различные комбинации 20 основных аминокислот, в результате можно получить 8000 вариантов (20^3). А если посчитать структурные комбинации, учитывая все потенциальные возможности моносахаридных остатков при формировании трисахарида (10 типов ключевых моносахаридов, пиранозная или фуранозная форма, α - или β -конфигурация, D- или L-изомеры, пять различных типов связи), то их



МИКШИНА
Полина Владимировна
Казанский институт биохимии
и биофизики КНЦ РАН

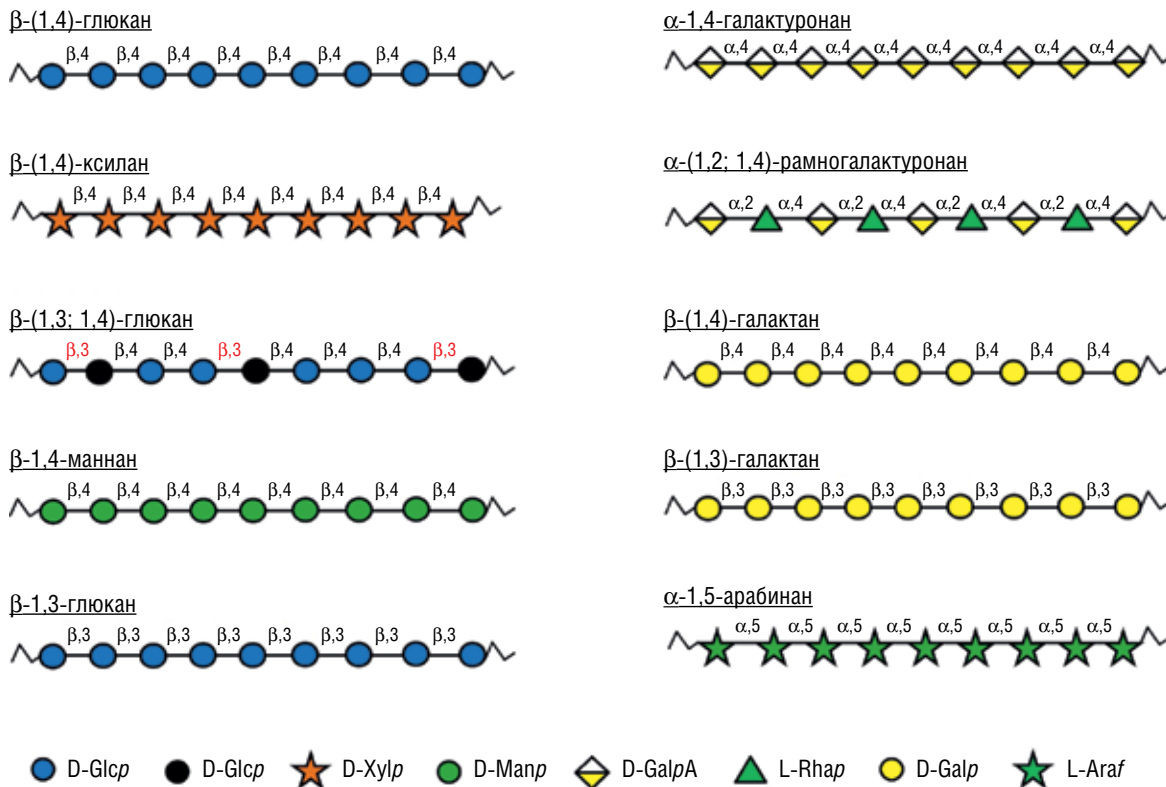


Рис. 1. Типы остовов полисахаридов клеточных стенок высших растений. Glcp – глюкопираноза, Xylp – ксилопираноза, Manp – маннопираноза, GalpA – галактопиранозилурановая кислота, Rhap – рамнопираноза, Galp – галактопираноза, Araf – арабинофураноза.

число будет составлять 64 000 000 ((10 × 2 × 2 × 2 × 5)³)!

Подтверждением разнообразия углеводов в пределах одного типа может служить пара других примеров.

1. Назовем его «масштабное» разнообразие. В целом, в клеточной стенке высших растений представлено всего лишь около 10 типов полисахаридных остовов (рис. 1). Однако их «декорирование» разнообразными заместителями (боковые цепи, модифицирующие группы), степень полимеризации и вытекающие из этого особенности свойств и пространственной структуры, а также способность к различного рода взаимодействиям с себе подобными и неподобными приводит к формированию бесконечного множества углеводных структур даже в пределах этих 10 типов.

2. «Частное» разнообразие затрагивает пределы значительной степени структурной вариабельности отдельного типа углеводов, с успехом выполняющего определенную функцию. К примеру, используя один

и тот же протокол выделения и очистки из одного и того же объекта, на одной и той же стадии его развития и где функция целевого полисахарида вам известна, при всех прочих одинаковых условиях, вам никогда не удастся выделить двух идентичных полисахаридов. Всегда будет присутствовать некая степень вариабельности структуры и молекулярной массы выделяемого полисахарида, которая никоим образом существенно не повлияет на его «функциональную пригодность». И ключевая причина такого разнообразия – все тот же нематричный биосинтез.

Сам факт того, что доля полисахаридов достигает 80% от сухой массы растений, предполагает, что именно растения активно и пользуются таким разнообразием углеводных структур, сосредоточенных главным образом в особой надмолекулярной структуре растительной клетки – клеточной стенке. В общем и целом, это действительно так. Однако, казалось бы, зачем, как многие считают, таким «несложным» растениям нужны такие «сложные» решения и разнообразие полисахаридов даже в пределах одного их типа? Зачем вообще природе придумывать такие мощные биосинтетические и модифицирующие «машины», рождающие множество самых разнообразных углеводных молекул, для таких «недумающих» и, как кажется со стороны, даже неподвижных созданий, основная задача кото-

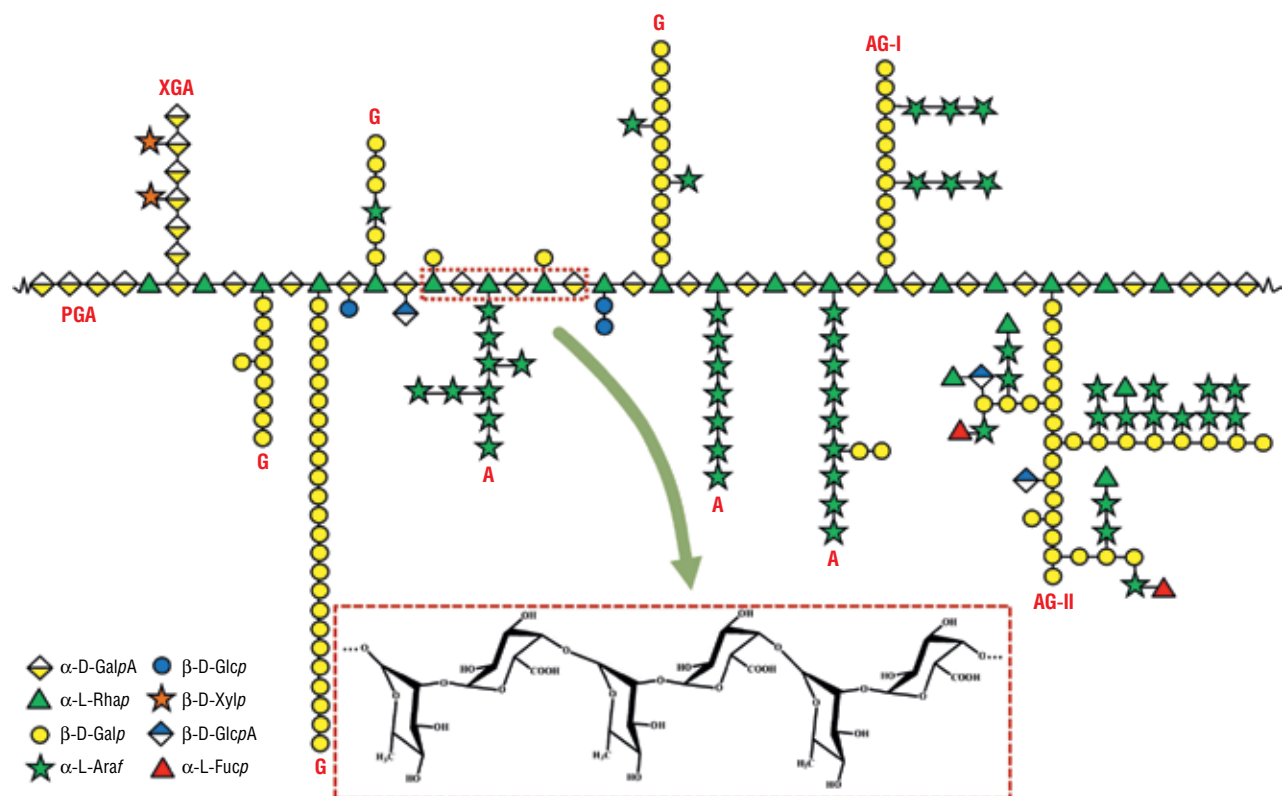


Рис. 2. Схематичное представление строения рамногалактуронана I высших растений. PGA – полигалактуроновая кислота, XGA – ксилогалактуронан, G – галактан, A – арабинан, AG-I – арабиногалактан первого типа, AG-II – арабиногалактан второго типа – гипотетическая боковая цепь рамногалактуронана I; GlcpA – глюкопиранозилуруоновая кислота, Fucp – фукопираноза.

рых – обеспечивать нас кислородом, для чего особой структуры клеточной стенки-то и не требуется, ее основная задача лишь обеспечивать каркас клетки? Но, как показывает жизнь, не все так просто и, как говорил великий поэт, «если звезды зажигают, значит это кому-нибудь нужно». И в этой статье на трех примерах растительных полисахаридов одного типа, обитающих в одном растении, я постараюсь познакомить вас и с результатом работы тех самых «машин», рождающих разнообразие структур, и с тем, для чего могут «зажигать» некоторые «звезды».

Речь пойдет о рамногалактуронанах I, сложных и крайне вариабельных растительных полисахаридах, относящихся к пектинам и построенных на основе остова, содержащего чередующиеся остатки рамнозы и галактуроновой кислоты, соединенные 1→2- и 1→4-типами связи (рис. 2). Разнообразие многих деталей строения рамногалактуронанов I настолько велико, что их по праву можно считать предельным вариантом вариабельности структуры полисахаридов. При этом разновидности рамногалактуронанов I могут быть уникальны не только для каждого растения, но и в различных тканях одного растения, а иногда и на разных стадиях развития одной ткани.

Перед тем, как перейти к обещанным трем примерам, позволю себе сделать небольшой обзор, касающийся общего устройства рамногалактуро-

нанов I, наглядно рисующий потенциал структурно-функциональных возможностей и разнообразие этих полисахаридов.

Что же делает их такими сложными? Размах вариабельности рамногалактуронанам I придает главным образом количество и разнообразие боковых цепей различной длины и структуры (рис. 2, G, A, AG-I, AG-II). Однако и в строении казалося бы «просто устроенного» остова этих полисахаридов также отмечены различия. Во-первых, может отличаться протяженность остова (описаны варианты от 15 до 300 димеров, причем различия могут наблюдаться и в пределах одного растительного объекта). Во-вторых, может нарушаться регулярность чередования моносахаридов, в результате чего формируются участки, содержащие несколько последовательно соединенных остатков рамнозы или, особенно часто, галактуроновой кислоты. Наконец, в-третьих, до сих пор ведутся дискуссии о наличии и характере свя-

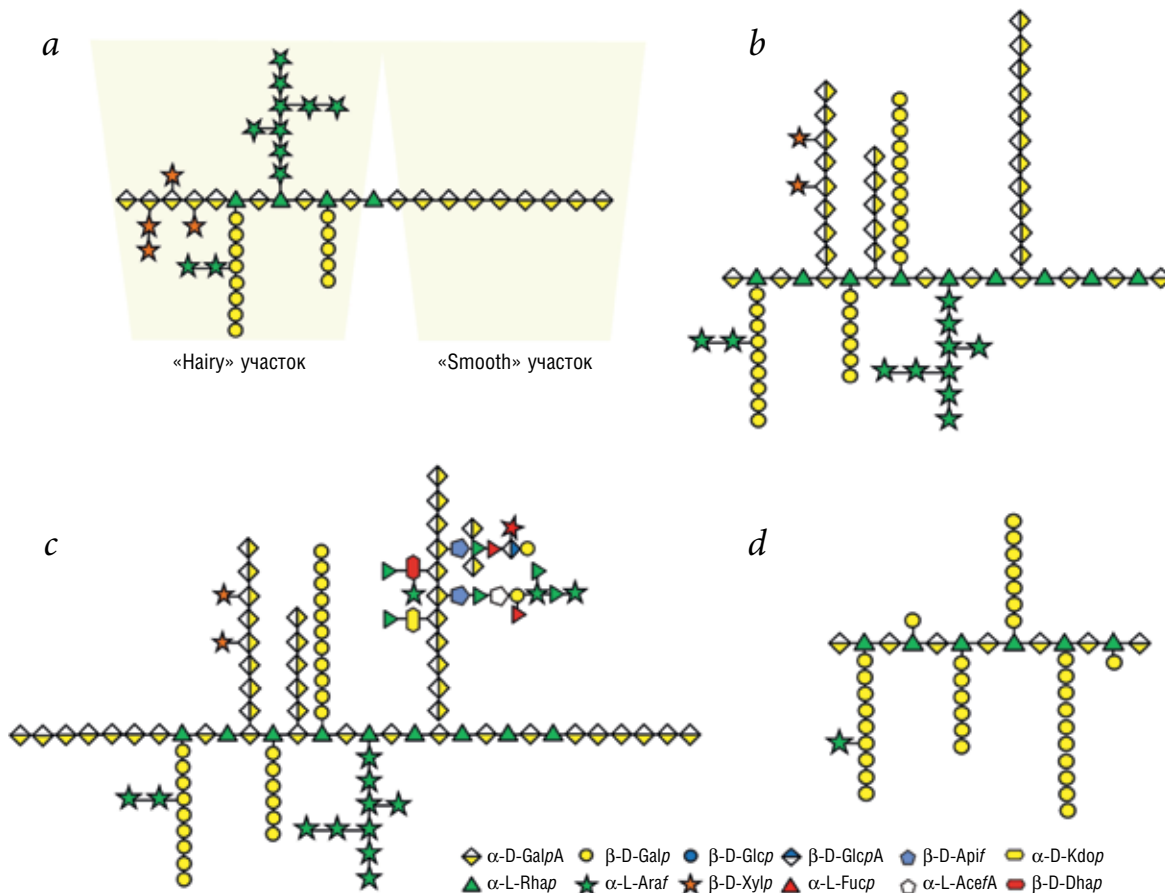


Рис. 3. Модели расположения рамногалактуронана I в пектиновой макромолекуле. Компоненты рамногалактуронана II: Arif – апиофураноза, AcefA – ацетовая кислота (3-С-карбоксит-5-дезоксит-L-ксилофураноза), Kdor – 2-кетот-3-дезоксит-D-маннооктоновая кислота, Dha – 3-дезоксит-D-ликогептулозаровая кислота [1–5].

зей между остовом рамногалактуронана I и другими компонентами пектиновых веществ. Многие считают, что рамногалактуронан I ковалентно связан с гомогалактуронаном, соединенным в свою очередь с рамногалактуронаном II и ксилогалактуронаном, результатом чего являются сложные комплексы пектиновых веществ в клеточной стенке. При этом по поводу того, каким образом различные структурные блоки расположены в пектиновой макромолекуле, до сих пор нет окончательного мнения. На сегодняшний день существует, как минимум, три гипотетические модели (рис. 3а-с).

Первая модель попеременного расположения блоков линейного гомогалактуронана («гладкие» («smooth») участки пектина) и разветвленного рамногалактуронана I («волосатые» («hairy») участки) (рис. 3а). Эта модель долгое время использовалась как структурная мо-

дель пектинов независимо от растительного источника [1, 2].

Однако накопление данных, преимущественно с использованием химического и ферментатического разрушения пектинового комплекса, привело к появлению альтернативной модели, в которой гомогалактуронан выступает в качестве боковой цепи рамногалактуронанового остова [3]. Согласно этой модели макромолекулярный комплекс представляет собой исключительно «hairy» тип пектиновой молекулы (рис. 3б).

После расширения списка проанализированных видов растений, набора разрушающих агентов и способов деградации была предложена еще одна так называемая «живая» («living thing») модель, представляющая собой некий симбиоз двух предыдущих вариантов [4]. В этой модели пектиновый комплекс состоит из двух линейных гомогалактуронановых элементов и одного блока из рамногалактуронана I, встроенного между ними, к которому присоединены различные боковые цепи (рис. 3с).

В дополнение к этим трем моделям был обнаружен и совершенно «чистый» рамногалактуронан I, не содержащий участков гомогалактуронана (рис. 3д [5]).

Возвращаясь к сложности и разнообразию самого рамногалактуронана I, будь то в «чистом» виде, будь то в составе пектинового комплекса, следует снова сконцентрировать внимание на том, что размах варибельности этому полимеру придает в основном разнообразие боковых цепей. Уже 25 лет назад в рамногалактуронанах I из различных источников было выявлено, по меньшей мере, 30 видов различных олигомерных боковых цепей, включающих галактаны, арабинаны и арабиногалактаны (рис. 2); к настоящему времени число их типов увеличилось в несколько раз. Боковые цепи рамногалактуронана I, как правило, присоединены к остатку L-Rhap в положении O(4) (рис. 2); редким исключением служит замещение остатков L-Rhap в O(3)-положении, выявленное пока только для отдельного представителя, о котором чуть позже. Считается, что остатки D-GalpA в остове рамногалактуронана I не имеют боковых цепей, хотя опять же для единичного рамногалактуронана I (из сахарной свеклы) было продемонстрировано замещение примерно 2% этого остатка по O(3)-положению единичным остатком D-GlcрA. Степень замещения L-Rhap (от 20% до 96%), как и наличие, пропорции, длина и детали структуры боковых цепей рамногалактуронанов I могут варьировать в зависимости от источника полисахарида, стадии его «процессинга» и места локализации, а также от стадии развития растительного объекта, из которого он был выделен.

В дополнение к вариациям в строении остова и боковых цепей, рамногалактуронаны I могут быть различным образом «декорированы» модифицирующими группами, в первую очередь ацетильными и метоксиальными. Ацетилирование обычно происходит по положениям O(2), O(3) α -D-GalpA, а также, редко, по O(3)-положению α -L-Rhap. Степень ацетилирования галактуроновой кислоты рамногалактуронановых блоков варьирует, что наглядно будет видно на примере обещанных трех «героев» чуть позже. Что касается метилирования: считается, что метоксилированы у рамногалактуронанов I только нейтральные боковые цепи (в положениях O(2), O(3), O(4) в (1→5)-связанных арабинанах или в положениях O(2), O(3), O(6) в (1→4)-связанных галактанах), хотя для ряда рамногалактуронанов I, выделенных из различных источников, продемонстрировано наличие метоксилированной GalpA, доля которой достигает в некоторых случаях аж 100%. Кроме того, в структуре рамногалактуронанов I может присутствовать феруловая кислота (присоединена в O(2)-положении в (1→5)-связанных арабинанах или в O(6)-положении в (1→4)-связанных галактанах), при участии которой полимеры могут взаимодействовать друг с другом.

Таким образом, нет никаких сомнений в том, что именно структурная варибельность рамногалактуронана I придает исключительную сложность строения пектиновым полисахаридам. И этот факт наглядно демонстрируют все существующие на сегодня модели организации пектиновых макромолекул (рис. 3).

Ну а теперь перейдем к обещанным трем типам рамногалактуронанов I, уживающимся и прекрасно функционирующим в одном растении. С функционирования и начнем. В целом, среди ключевых функций рамногалактуронанов I на сегодня отмечают три.

Рамногалактуронаны I наиболее известны как характерный компонент тонких первичных клеточных стенок, где эти полисахариды в составе пектиновых комплексов выполняют роль своеобразного «клея» для сцепления соседних клеток. Этот «клей» сочетает эластичность и пористость с высокой прочностью – именно за счет него обеспечивается целостность растительного организма, по крайней мере, у молодых проростков или формирующих органов.

Другую функцию рамногалактуронанов I связывают с их водоудерживающей способностью. Рамногалактуронаны I секретируются на поверхность семян некоторых видов растений и при попадании влаги набухают, формируя своеобразную капсулу и играя роль «мягкой губки», обеспечивающей комфортное микроокружение для прорастающих семян и/или адгезию к различным субстратам.

И наконец, третья известная функция рамногалактуронанов I реализуется в клетках особого типа – растительных волокнах, формирующих утолщенную третичную клеточную стенку. В этом случае рамногалактуронан I участвует в создании натяжения в клеточной стенке, в результате чего появляются контракильные свойства, благодаря которым волокна играют роль

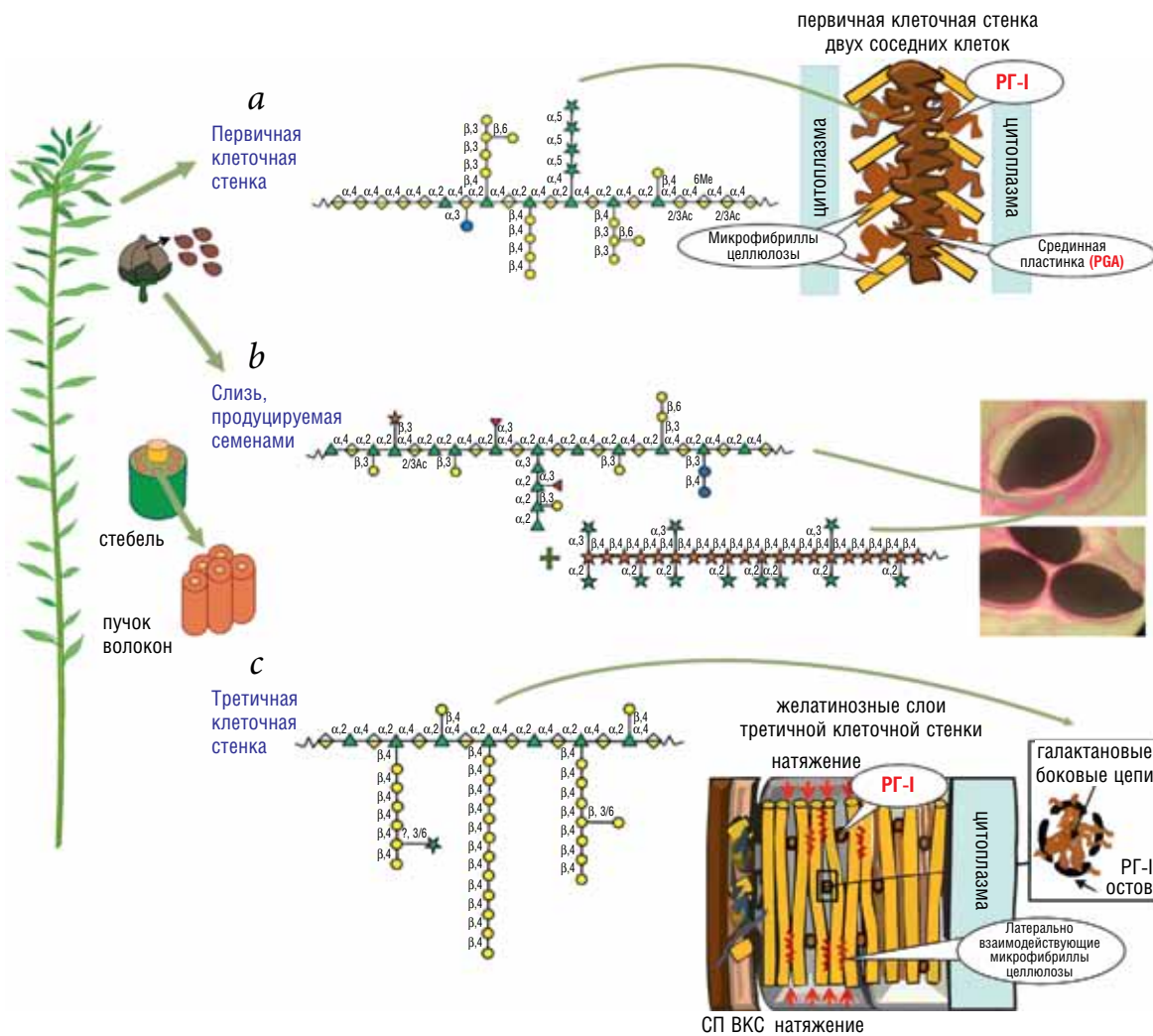


Рис. 4. Структурно-функциональное разнообразие рамногалактуронанов I в пределах растения льна.

своеобразных растительных «мускулов». Такие волокна позволяют растениям бороться с полеганием при дожде и ветре, возвращаться в вертикальное положение, если оно было нарушено по каким-то причинам, удерживать тяжелые плоды, прикрепляться к различным поверхностям и многое другое.

Рамногалактуронаны I, выполняющие все эти функции охарактеризованы пока для единственного вида растений – льна. Они-то и будут «героями» моего последующего повествования.

Первый тип рамногалактуронанов I был выделен из суспензионной культуры клеток и гипокотилей льна и приурочен к первичной клеточной стенке (рис. 4a). Второй тип рамногалактуронана I получен из слизи, выделяемой семенами льна при набухании (рис. 4b). И третий –

рамногалактуронан I, выделенный из утолщенной клеточной стенки льняных волокон (рис. 4c).

Структура рамногалактуронана I из первичной клеточной стенки клеток льна сходна со структурой рамногалактуронанов I первичной клеточной стенки других источников. В целом, достаточно распространенный вариант: боковые цепи, присоединенные к Rha_p в положении O(4), представлены главным образом (1→5)-арабинанами и (1→4)-, (1→3)- и (1→6)-галактанами. В структуре остова присутствуют включения из полигалактуроновой кислоты, значительная часть остатков галактуроновой кислоты при этом ацетилирована (29–83%). Функциональную пригодность такого полисахарида для реализации механизмов адгезии клеток связывают со способностью последовательно расположенных остатков галактуроновой кислоты формировать шивки с себе подобными (срединная пластинка), а боковых цепей такого типа – «закоривать» рамногалактуронансодержащий пектиновый комплекс в клеточной стенке (рис. 4a).

Второй тип рамногалактуронана I льна (полученный из слизи, выделяемой семенами) представляет

собой экстремальный вид по типу боковых цепей и характеру замещения. Его отличает: а) наличие коротких (главным образом из одного остатка) боковых цепей, содержащих редкий моносахарид – L-Gal, а также Fuc и Xyl; б) их присоединение к Rha_p в O(3)-положении; в) нерегулярность остова, обусловленная высокой долей остатков рамнозы и/или наличием боковых цепей, представленных гоморамнаном (GalA/Rha = 0.3). Степень замещения остова этого полисахарида достаточно высока (55%), а доля ацетилированной галактуроновой кислоты гораздо ниже, чем у рамногалактуронана I из первичной клеточной стенки (5–14%). Работает этот полисахарид всегда в паре с арабиноксиланом, структура которого тоже весьма оригинальна, если сравнивать с другими его «сородичами»: как и все арабиноксиланы, он содержит в боковых цепях арабинозу, однако замещает остатки ксиланы она, в основном, не по O(3)- (более распространенный вариант), а по O(2)-положению либо встречается вариант дизамещенной ксиланы и по O(3), и по O(2). Хотя и химия «сожителства» рамногалактуронана I и арабиноксилана до сих пор не объяснена, установлено, что совместная работа таких необычных полисахаридов позволяет им повышать вязкость слизи и, как следствие, формировать «комфортное» окружение семенам, необходимое для прорастания (рис. 4б).

Ключевыми особенностями структуры третьего типа рамногалактуронана I, выделенного из утолщенной клеточной стенки флоэмных волокон льна, отличающими этот полисахарид от большинства рамногалактуронанов I другого происхождения, являются: а) исключительная регулярность остова и отсутствие связи с гомогалактуронановыми участками – это «чистый» рамногалактуронан I (Rha/GalA = 1); б) высокая степень замещения остатков Rha_p (72%); в) наличие достаточно протяженных боковых галактановых цепей (средняя длина – 14 остатков Gal_p), сохраняющихся даже после модификаций этого полимера в клеточной стенке. В утолщенной клеточной стенке такой рамногалактуронан I оказывается «запечатанным» между микрофибриллами целлюлозы и служит причиной возникновения их натяжения при латеральном взаимодействии. Эффективность этого обеспечивается, как минимум, двумя установ-

ленными параметрами рамногалактуронана I такого типа: 1) способностью формировать надмолекулярные структуры с заряженным остовом на поверхности, что обеспечивает низкое сродство к целлюлозе и эффективное «отталкивание» ее микрофибрилл в зоне захвата рамногалактуронана I; 2) гиперэластичными свойствами этого полисахарида, позволяющими ему не быть сдавленным при такой локализации и давлении со стороны протопласта (рис. 4с).

Следует отметить, что это только три варианта полисахаридов одного типа и только для одного растения, а насколько тонкое и красивое структурное решение придумано для «функциональной пригодности» каждого из них! И это все при условии, что работа биосинтетических «машин» в случае полисахаридов действительно «ручная», а в растениях, где отсутствует блочный биосинтез, и подавно – каждый остаток методично «пришивается» определенным ферментом к «растущей» структуре. Просто в голове не укладывается, насколько совершенные механизмы работают в этих «неподвижных и недумających» растениях и насколько великолепно рождается в результате богатство полисахаридных структур, не менее уникальных, чем затронутые мною в начале снежинки и каждый из нас!

Проведение работ по характеристике рамногалактуронана I волокон льна выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 15-04-02560, 14-04-31462, 11-04-01602, 12-04-97077-р_поволжье и 16-04-01350).

Литература

1. J.A. de Vries, C.H. den Uijl, A.G.J. Voragen, F.M. Rombouts, W. Pilnik *Carbohydr. Polym.*, 1983, 3(3), 193. DOI: 10.1016/0144-8617(83)90018-8.
2. H.A. Schols, A.G.J. Voragen *Prog. Biotechnol.*, 1996, 14, 3. DOI: 10.1016/S0921-0423(96)80242-5.
3. J.-P. Vincken, H.A. Schols, R.J.F.J. Oomen, M.C. McCann, P. Ulvskov, A.G.J. Voragen, R.G.F. Visser *Plant Physiol.*, 2003, 132(4), 1781. DOI: 10.1104/pp.103.022350.
4. B.M. Yapo *Carbohydr. Polym.*, 2011, 86(2), 373. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.05.065.
5. O.P. Gur'janov, T.A. Gorshkova, M. Kabelb, H.A. Scholsb, J.E.G. van Dam *Carbohydr. Polym.*, 2007, 67(1), 86. DOI: 10.1016/j.carbpol.2006.04.018.

English

The Causes and Consequences of the Carbohydrate Diversity, or Three «Sugar» Stories From the Life of a Single Plant*

Polina V. Mikshina

Kazan Institute of Biochemistry and Biophysics KazSC, RAS
2/31 Lobachevsky Str., Kazan, 420111, Russia
p.mikshina@gmail.com

Abstract

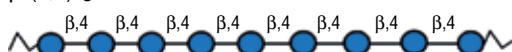
The article constitutes a data review on the causes and consequences of the diversity of carbohydrates in the organic world as a whole (in comparison with other biomolecules) and within the same polysaccharide type. The variants of the structural and functional diversity of polysaccharides, based on the same type of backbone and isolated from the same flax plants, are clearly described on the example of rhamnogalacturonan I – the pectin heteropolysaccharide of extremely variable structure. The overview of data on the structure and functions of these polysaccharides from various sources is provided as well.

Keywords: plant polysaccharides, pectins, rhamnogalacturonan I, plant cell wall, structural and functional variety of carbohydrates.

*The work was financially supported by RFBR (project 17-14-20098).

Images & Tables

β -(1,4)-glucan



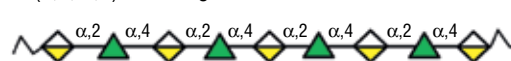
α -1,4-galacturonan



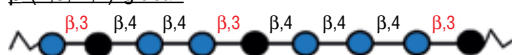
β -(1,4)-xylan



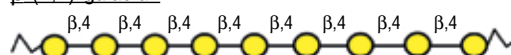
α -(1,2; 1,4)-rhamnogalacturonan



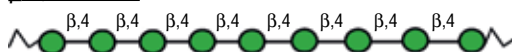
β -(1,3; 1,4)-glucan



β -(1,4)-galactan



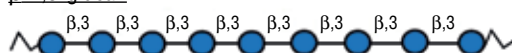
β -1,4-mannan



β -(1,3)-galactan



β -1,3-glucan



α -1,5-arabinan



Fig. 1. Types of backbones of cell wall polysaccharides of higher plants. Glcp – glucopyranose, Xylp – xylopyranose, Manp – mannopyranose, GalpA – galactopyranosyl uronic acid, Rhap – rhamnopyranose, Galp – galactopyranose, Araf – arabinofuranose.

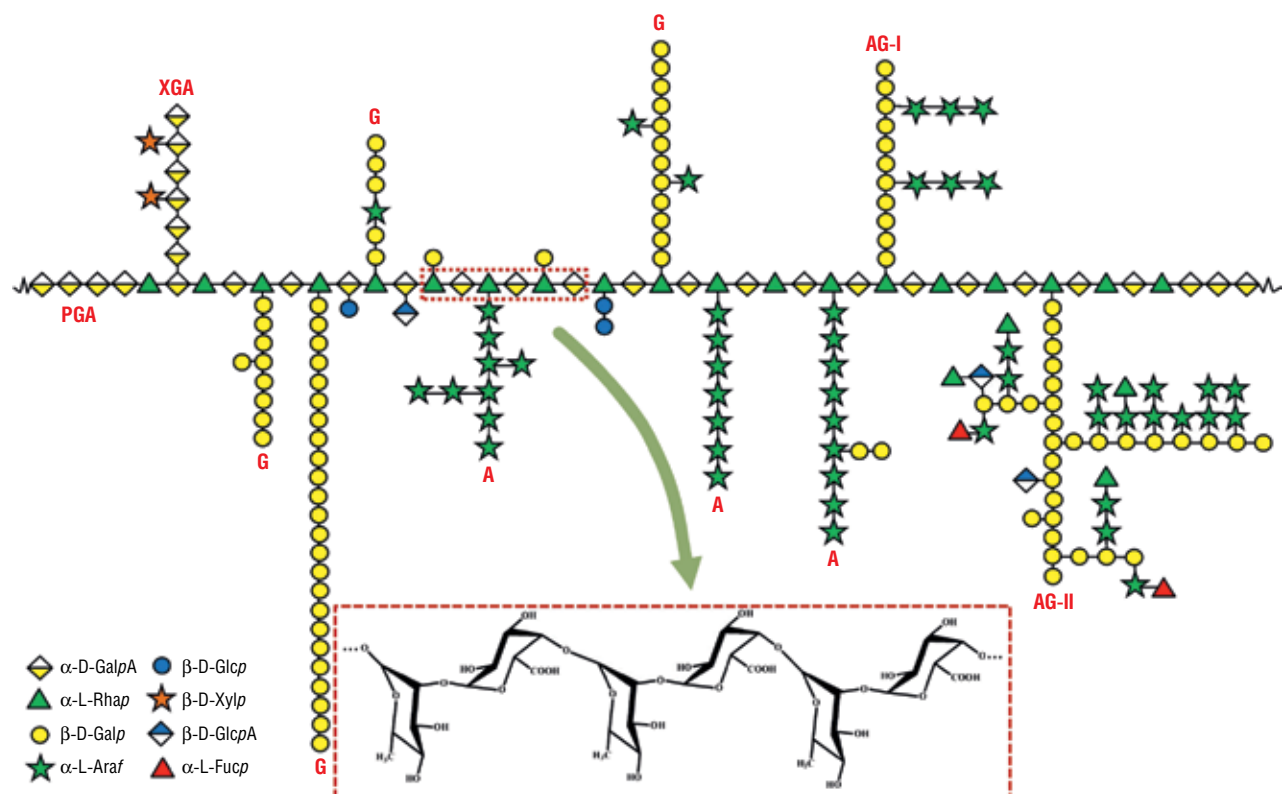


Fig. 2. Schematic representation of rhamnogalacturonan I structure of higher plants. PGA – polygalacturonic acid, XGA – xylogalacturonan, G – galactan, A – arabinan, AG-I – arabinogalactan type I, AG-II – arabinogalactan type II – a hypothetical side chain of rhamnogalacturonan I, GlcpA – glucopyranosyl uronic acid, Fucp – fucopyranose.

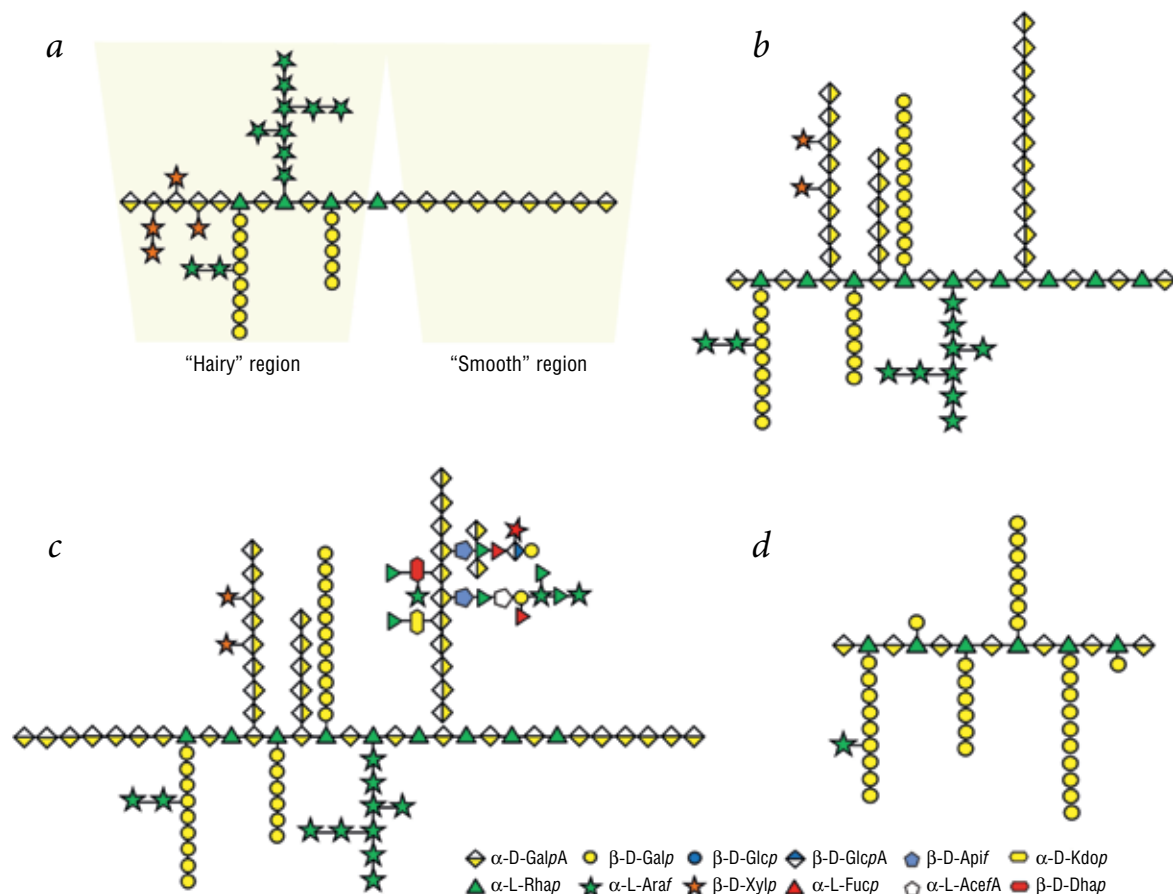


Fig. 3. Models of rhamnogalacturonan I location in a pectic macromolecule. Rhamnogalacturonan II components: Apif – apiofuranose, AcefA – aceric acid (3-C-carboxy-5-deoxy-1-xylofuranose), Kdop – 2-keto-3-deoxy-d-manno-octulosonic acid, Dha – 2-keto-3-deoxy-d-lyxo-heptulosaric acid [1–5].

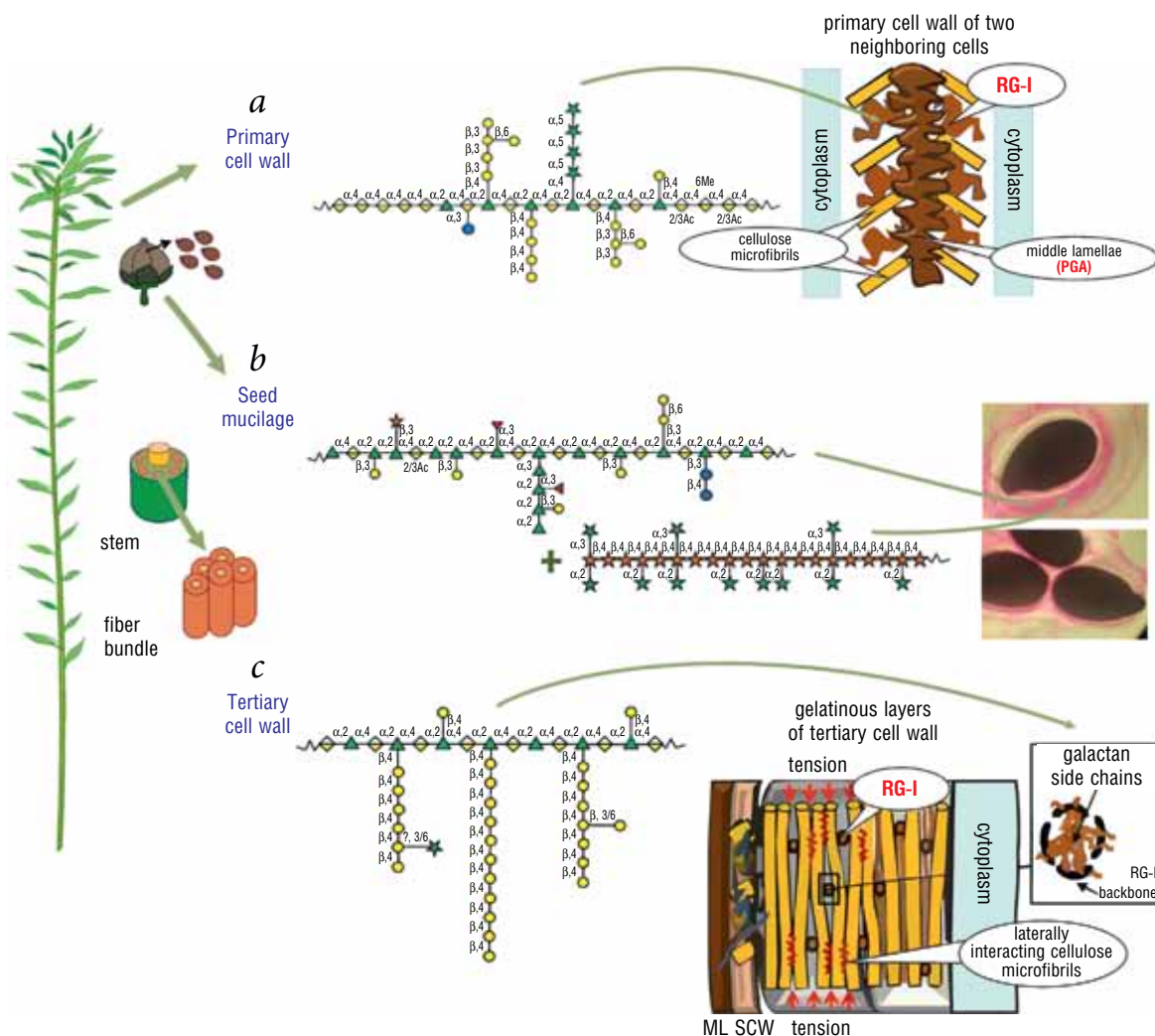


Fig. 4. Structural and functional diversity of rhamnogalacturonans I in flax plant.

References

1. J.A. de Vries, C.H. den Uijl, A.G.J. Voragen, F.M. Rombouts, W. Pilnik *Carbohydr. Polym.*, 1983, 3(3), 193. DOI: 10.1016/0144-8617(83)90018-8.
2. H.A. Schols, A.G.J. Voragen *Prog. Biotechnol.*, 1996, 14, 3. DOI: 10.1016/S0921-0423(96)80242-5.
3. J.-P. Vincken, H.A. Schols, R.J.F.J. Oomen, M.C. McCann, P. Ulvskov, A.G.J. Voragen, R.G.F. Visser *Plant Physiol.*, 2003, 132(4), 1781. DOI: 10.1104/pp.103.022350.
4. B.M. Yapo *Carbohydr. Polym.*, 2011, 86(2), 373. DOI: 10.1016/j.carbpol.2011.05.065.
5. O.P. Gur'janov, T.A. Gorshkova, M. Kabelb, H.A. Scholsb, J.E.G. van Dam *Carbohydr. Polym.*, 2007, 67(1), 86. DOI: 10.1016/j.carbpol.2006.04.018.

Эволюция механизмов клеточного деления – длинный путь от случайного к закономерному*

И.Б. Алиева, Р.Э. Узбеков

В статье излагаются результаты современных исследований об эволюции механизмов клеточного деления живых организмов, обитающих на планете Земля в настоящее время. Основой существования жизни на нашей планете является способность населяющих ее организмов к росту и размножению. С момента слияния яйцеклетки и сперматозоида новый организм растет за счет увеличения количества составляющих его клеток и их последующей дифференцировки, что дает начало тканям и органам. Количество клеток увеличивается за счет периодического деления материнской клетки на две дочерние, роста дочерних клеток и вступления в следующее деление. При этом реализуется главная задача – генетический материал равномерно распределяется по дочерним клеткам. Как и когда впервые клетки древних организмов «научились» делиться на две равные части? Какой эволюционный путь прошли механизмы, позволяющие клеткам воспроизводиться, передавая следующей генерации наследственную информацию? Ответы на эти вопросы даются в нашей статье.

Ключевые слова: митоз, митотический аппарат, веретено деления, центросома, центриоль, эволюция клеточного деления.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-14-20105).

Основой существования жизни на нашей планете является способность населяющих ее организмов к росту и размножению. Начиная свое развитие с момента слияния яйцеклетки и сперматозоида, новый организм растет за счет увеличения количества составляющих его клеток и их последующей дифференцировки, что дает начало тканям и органам. Это происходит за счет деления материнской клетки на две дочерние, их роста и вступления в следующее деление. Такой цикл воспроизведения получил название клеточного цикла. Несмотря на огромное разнообразие вариантов его прохождения у разных типов клеток основной принцип – «деление надвое» – остается неизменным.

В настоящей статье мы не будем касаться процесса образования половых клеток – мейоза, а сконцентрируем свое внимание на митозе – более эволюционно древнем механизме деления соматических клеток.

Митоз – процесс комплексный, в ходе которого параллельно осуществляется перестройка расположенных в клеточном ядре носителей генетического

материала – хромосом, их равномерное распределение по дочерним клеткам, а также формируются механизмы разделения цитоплазмы материнской клетки [1].

Последовательность нуклеотидов в молекулах ДНК хромосом определяет всю информацию о структуре двух других основных типов биологических молекул в клетке – белков и РНК, но в процессе митоза хромосомы компактизируются в тысячи раз путем суперспирализации и «замолкают» – с них перестает считываться информация. «Молчащие» хромосомы равномерно расходятся в две дочерние клетки не самостоятельно. Для того, чтобы обеспечить их правильное распределение, клетка в начале митоза создает сложно устроенную структуру – веретено деления (митотическое веретено), которое



АЛИЕВА

Ирина Борисовна

Научно-исследовательский институт
физико-химической биологии
имени А.Н. Белозерского
Московского государственного
университета имени М.В. Ломоносова



УЗБЕКОВ

Рустем Эдуардович

Университет Франсуа Рабле
(Франция)

по окончании деления разбирается. Таким образом, хромосомы оказываются относительно пассивными пассажирами, перемещение которых по дочерним клеткам обеспечивает целый комплекс клеточных преобразований, включающий формирование специальных, предназначенных исключительно для перераспределения хромосом, структур. Характеризуя пассивность поведения хромосом во время митоза, французский клеточный биолог Даниэль Мэзия выразился достаточно образно, сказав, что «хромосомы подобны покойнику на похоронах – окружающие собрались исключительно ради него, а он никак не участвует в происходящем». Каким же образом современные клетки осуществляют перемещение хромосом и что заставляет их равномерно распределяться между дочерними клетками в ходе митоза? Какой эволюционный путь прошли механизмы, позволяющие клеткам воспроизводиться, передавая следующей генерации наследственную информацию? Ответить на эти вопросы мы постараемся в нашей статье.

Как возникло клеточное деление и как делятся бактерии?

Мы можем только предполагать, когда и как впервые клетки древних организмов «научились» делиться на две равные части. Когда-то на заре зарождения жизни белково-липидные пузырьки – коацерваты – делились спонтанно и асимметрично (рис. 1а). Их содержимое механически разделялось по мере роста, когда объем достигал неких критических размеров. Рост, как таковой, происходил за счет более оптимальных условий для синтеза полимерных молекул во внутренней среде этих пузырьков. Далее, уже после того, как эти протоорганизмы «научились» матричному синтезу нуклеиновых кислот, их деление все еще не стало равномерным. Но давление естественного отбора давало

преимущество тем организмам, которые могли гарантированно передавать своим потомкам наследственную информацию. При неравномерном (иррегулярном) делении была велика вероятность гибели одной из отделившихся частей, поэтому преимущество получили особи, научившиеся делиться примерно поровну (квазирегулярно) (рис. 1б).

Именно на этом этапе у части организмов произошел переход на использование новых молекул – хранителей генетической информации. «РНК-мир» в значительной степени сменился «ДНК-миром». Этому качественному скачку способствовало то, что двойная спираль молекулы ДНК химически значительно более устойчива. Специфические последовательности ДНК – протогены – благодаря этому получили возможность лучше сохранять передаваемую информацию и обеспечивать преемственность между поколениями. Конечно, генетическое разнообразие, порождаемое мутациями – случайными изменениями в структуре ДНК, являющимися материалом для естественного отбора, продолжило производить все новые и новые варианты механизмов клеточного деления. Современное разнообразие этих вариантов является отражением путей эволюционного развития процессов клеточного деления. Первичные, примитивные механизмы деления,

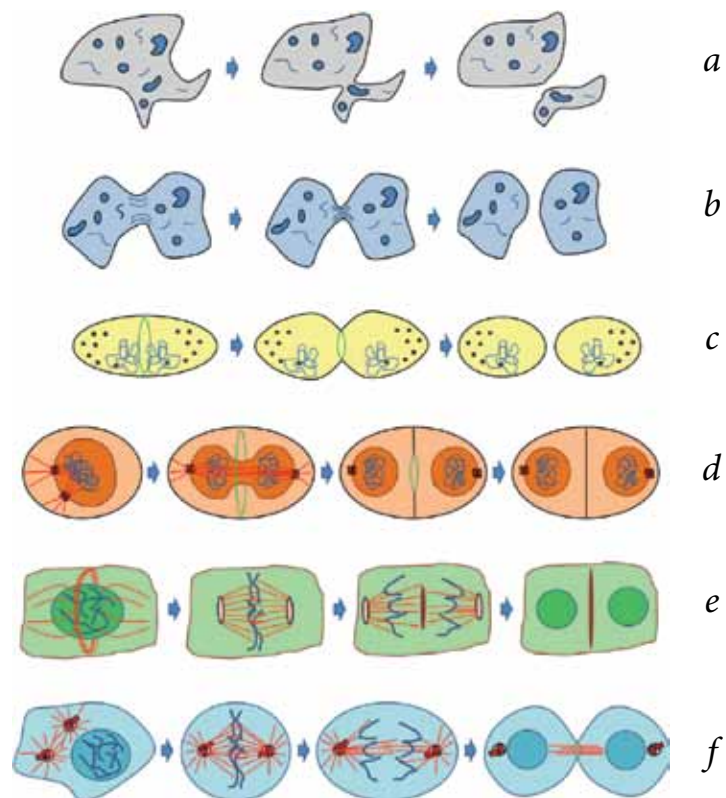


Рис. 1. Эволюция механизмов клеточного деления: а – иррегулярное деление коацерватов, б – квазирегулярное деление коацерватов, с – регулярное деление прокариот, d – закрытый митоз у дрожжей, e – открытый митоз у растений, f – открытый митоз у позвоночных.

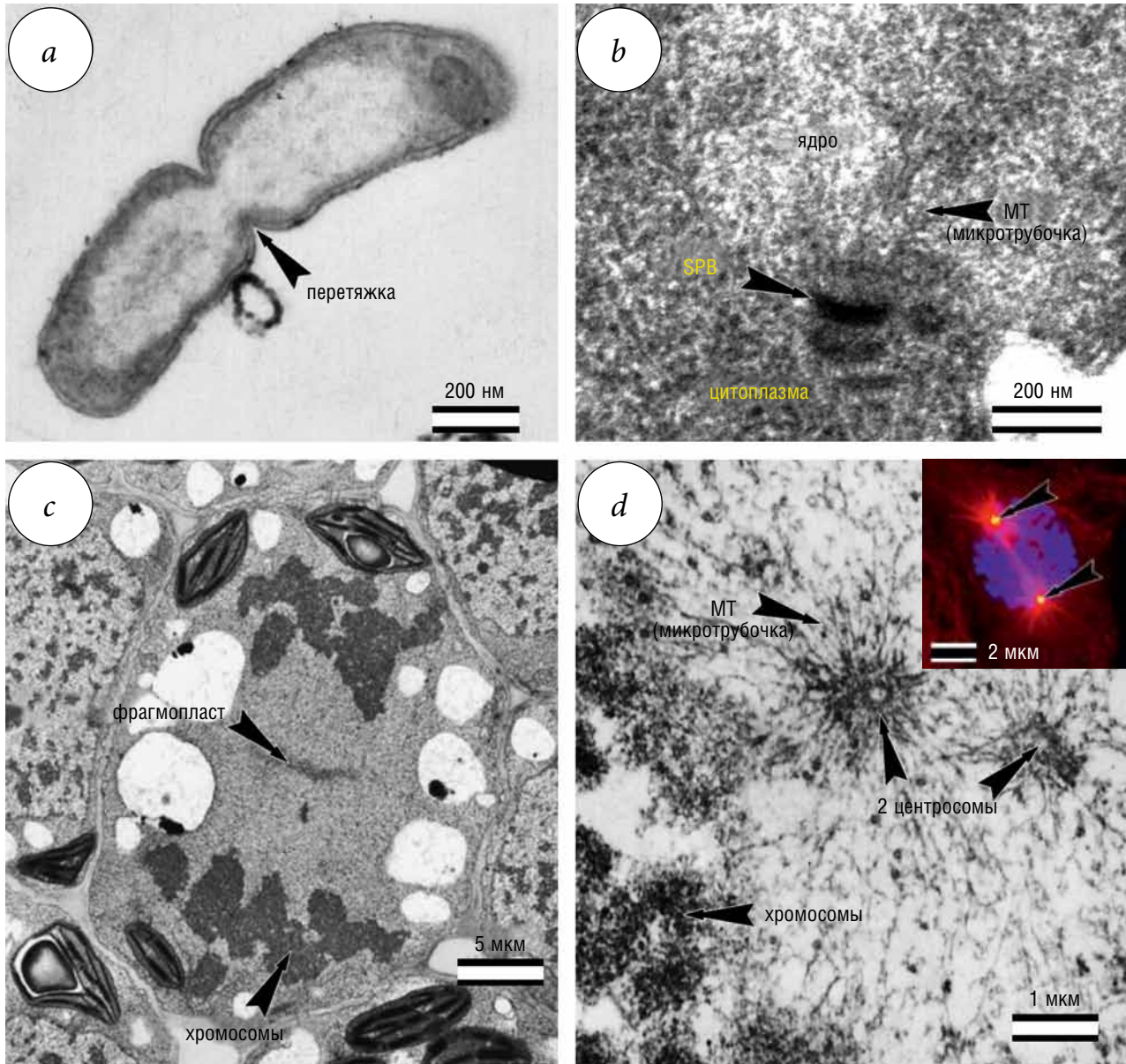


Рис. 2. Деление клеток у различных организмов: *a* – деление бактерии кишечной палочки *Escherichia coli* проходит без образования специальных структур за счет перетяжки, разделяющей клетку надвое; *b* – тельце полюса веретена (SPB) в клетке дрожжей *Saccharomyces cerevisiae* с отходящими от него внутрь ядра микротрубочками веретена деления при закрытом митозе; *c* – разделение цитоплазмы в митозе растительной клетки происходит за счет образования фрагмопласта – перегородки, растущей от центральной оси клетки к ее периферии; *d* – формирующиеся на двух centrosомах полюса веретена в профазной клетке культуры почки эмбриона свиньи. На вставке: специфическое мечение микротрубочек митотического веретена (окрашено красным), centrosом (окрашены желтым, показаны стрелками) и хромосом (окрашены синим) в культуре клеток ксенонуса (профаза). *a, b, d* – Фото Р.Э. Узбекова; *c* – фото из архива К. Esau (<http://ccber.ucsb.edu/light-and-electron-microscope-images>).

вероятно, наиболее близкие к древним формам, сохранились у бактерий.

Бактерии относятся к прокариотам (доядерным организмам), то есть организмам, в клетках которых внутренняя среда не разделена мембранами и генетический материал располагается непосредственно в цитоплазме.

У современных бактерий генетический материал сосредоточен в одной кольцевой молекуле ДНК, которая прикреплена изнутри к внешней мембране бактерии. Перед делением эта молекула расплетается на две нити, к каждой из которых из нуклеотидов

достраивается комплементарная цепочка. При этом точки прикрепления двух образовавшихся молекул ДНК располагаются на мембране на некотором расстоянии друг от друга. Разделение геномов бактерии происходит путем деления всей клетки (рис. 1с и 2а), что обеспечивается образованием перетяжки (выделена зеленым цветом на рисунке 1с), формирующейся под клеточной мембраной. В некотором смысле та-

кое механическое разделение клетки сродни делению коацерватов. Существенное различие заключается в том, что перетяжка образуется за счет активной перестройки мембраны и подлежащих слоев цитоплазмы, причем проходит между точками прикрепления двух кольцевых ДНК дочерних геномов.

Удивительно, но в ходе эволюции бактерии сохранили такой способ деления. Возможно, это связано с тем, что их относительно «простое» строение позволяет осуществлять клеточные деления значительно чаще, чем это могут делать более сложно устроенные клетки эукариотических организмов. Таким образом, смена поколений происходит быстрее, и естественный отбор может быстрее выбирать наиболее приспособленные организмы, что особенно важно при изменении условий существования и завоевании новых ареалов обитания. Таким образом, можно заключить, что цитотомия – разделение цитоплазмы с помощью перетяжки – является более древним механизмом, предшествовавшим появлению митоза.

Новый эволюционный шаг – клетки организуют специальный аппарат, обеспечивающий эффективную передачу наследственной информации

Более эволюционно развитые клетки эукариотических организмов имеют в цитоплазме многочисленные органоиды – ограниченные от цитоплазмы мембранами компартменты, обеспечивающие выполнение различных клеточных функций. Самый крупный из компартментов – клеточное ядро – является хранилищем генетического материала.

Как мы уже упоминали, перед делением клетки хромосомы в ядре компактизируются, надежно, как в сейфе, запирая генетическую информацию, представленную к этому моменту в виде удвоенной копии – двух сестринских хроматид. Для того, чтобы правильно разделить

две эквивалентные копии и уберечь материал от возможных потерь при перераспределении по дочерним клеткам, в цитоплазме формируется специальная структура – веретено деления. Веретено состоит из микротрубочек (МТ) – протяженных неветвящихся нитей, представляющих собой полые цилиндры с внешним диаметром 25 нм, а внутренним – 14 нм. Свойства МТ настолько важны для понимания функционирования веретена деления, что на них необходимо остановиться более подробно.

В отличие от нуклеиновых кислот, МТ являются биополимерами с гомогенным составом. Они формируются димерами двух родственных белков – альфа- и бета-тубулинов. По длине МТ димеры располагаются униполярно. Таким образом, вся МТ является полярной структурой – на одном из ее концов (минус-конце) полимерная молекула оканчивается альфа-тубулинами, а на другом (плюс-конце) – бета-тубулинами димеров [2]. Полимеризация МТ в клетке не является результатом матричного синтеза на предсуществовавших молекулах, а происходит на специфических затравках – центрах нуклеации МТ. Таким образом, в клетке создается уникальная архитектура – защищенные от разборки минус-концы МТ собраны в одной области клетки, вблизи ядра, а их плюс-концы направлены в сторону периферии клетки [3]. МТ формируют своеобразные «рельсы», расходящиеся из центра, по которым белки-моторы переносят «грузы» (отдельные молекулярные ансамбли и целые клеточные органеллы) в нужном для клетки направлении. В клетке существует два типа белков-моторов, связанных с МТ: динеины осуществляют перенос «грузов» центростремительно – по направлению к центру клетки, кинезины – напротив, центробежно – от центра клетки в сторону ее периферии [4].

И МТ, и оба типа моторов активно участвуют в формировании и функционировании веретена деления. Но, как мы уже указывали, митотическое веретено – лишь одна часть специального аппарата, сформированного клеткой для обеспечения эффективной передачи наследственной информации. Второй компонент – полюса митотического веретена. Они могут иметь различную морфологию у организмов разных таксономических групп, но обладают несомненным функциональным единством. Кроме этого, их объединяет наличие МТ в составе аппарата для разделения хромосом, которые и составляют основную часть веретена деления. Как мы видели в бактериальной клетке, аналогом таких районов могут быть точки прикрепления двух молекул ДНК. Но хромосомы эукариотических организмов существенно больше по размеру, чем кольцевые ДНК бактерий, и такой метод разделения для них,

очевидно, не подходит. Поэтому в эукариотических организмах мы видим появление новых механизмов для распределения хромосом по дочерним клеткам.

Главной функцией митотического веретена является перенесение двух копий хромосомных наборов в две дочерние клетки. Отсюда очевидно, что для его организации необходимо существование двух специфических областей в клетке, к которым бы перемещались хромосомы. Как показали многочисленные, в том числе и наши собственные, исследования наличие двух полюсов принципиально – если экспериментальным путем спровоцировать образование трех- или однополюсных (монополярных) веретен, митоз не может завершиться нормально [5].

Простейшим примером митотического деления эукариот является деление дрожжевой клетки *Saccharomyces cerevisiae*, всем нам хорошо известных пекарских дрожжей (рис. 1d и 2b). В клетках этих

организмов на ядерной мембране имеются трехслойные структуры, которые получили название телец полюсов веретена (по-английски spindle pole bodies, или сокращенно SPB). SPB в дрожжах являются центрами нуклеации МТ (рис. 1d, SPB и МТ выделены красным цветом). При этом часть SPB, обращенная в сторону цитоплазмы, нуклеирует МТ цитоплазмы, а противоположная часть образует МТ внутри ядра [8]. Удвоение SPB происходит только один раз между делениями. Поскольку разделение хромосом происходит без разборки ядерной мембраны, такой митоз называют закрытым.

У растений нет ясно выраженных центров организации МТ в интерфазе (интерфаза – промежуток между клеточными делениями). Перед митозом МТ (рис. 1e и 2c, МТ выделены красным цветом) образуют кольцо, располагающееся в экваториальной области клетки под клеточной мембраной. В профазе митоза это кольцо распадается, и одновременно образуются отдельные МТ по обеим сторонам ядра. Далее эти МТ группируются и формируют веретено, которое отличается бочкообразной формой, а его «полюса» имеют форму пластинок, в которых отсутствуют морфологически идентифицируемые структуры. Несмотря на различия в процессе построения веретена, основные фазы митоза у растений сходны с таковыми у животных.

Наиболее сложно организовано веретено в животных клетках (рис. 1f и 2d). Интересно, что даже у таких таксономически далеких видов, как насекомые и позвоночные, оно имеет удивительно сходное строение. В отличие от растений, у животных в интерфазных клетках имеется центросома, содержащая две центриоли [9].

Центриоли по своему строению существенно отличаются от остальных клеточных компонентов – они имеют геометрически правильную форму (рис. 3) с характерной для

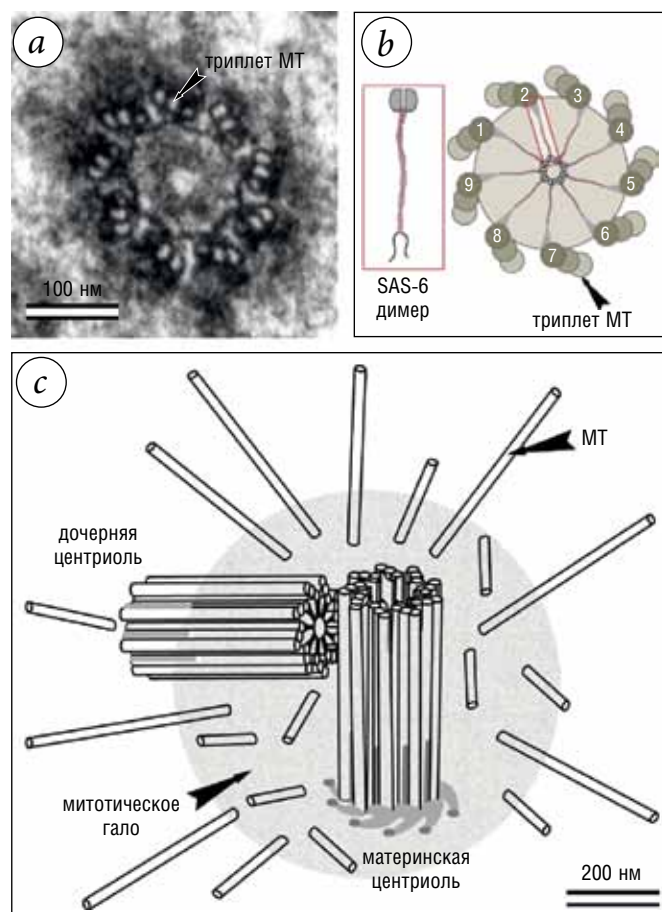


Рис. 3. Ультраструктура центросомы: а – поперечный срез центриоли в клетке культуры ткани почки эмбриона свиньи. Девять триплетов МТ (триплет отмечен стрелкой) соединенных системой связей, образуют стенку центриоли [6]; б – симметрия девятого порядка возникает при формировании центриолей за счет взаимодействия концевых участков димеров белка SAS-6, угол между которыми составляет ровно 40 градусов. Соединение девяти таких димеров и дает полное кольцо в 360 градусов [7]. Триплет МТ отмечен стрелкой; в – схема строения центросомы в профазе митоза. Две взаимноперпендикулярные центриоли образуют диплосому, окруженную митотическим галом, от которого отходят МТ.

большинства животных клеток симметрией девятого порядка, задаваемой на молекулярном уровне при формировании этих органелл взаимодействием комплексов недавно открытого белка, названного SAS6 (рис. 3b). Количество МТ в стенке центриоли может варьировать: в большинстве клеток различных организмов она содержит девять триплетов МТ (трех связанных общими участками стенок МТ); у насекомых, включая плодую мушку дрозофилу, являющуюся популярным объектом для исследователей, стенка содержит девять дуплетов МТ (две МТ, имеющие общую часть стенки), а у круглого червя *Caenorabditis elegans* – девять синглетов МТ (девять одиночных МТ). Исследования последних лет показали, что в половых (генеративных) клетках у дрозофилы центриоли состоят из девяти триплетов, то есть структура этой органеллы может быть тканеспецифичной [10]. Центриоли способны к самовоспроизведению, при этом дочерняя центриоль формируется рядом с материнской центриолью, а не растет от одного из ее концов.

Центросома – вершина эволюционного развития механизма клеточного деления

Центриоли вместе с перицентриольным материалом, содержащим целый комплекс белков и белковых ансамблей, образуют центросому. Центросому изучают уже более ста лет, ее описали первые исследователи клеточного деления – В. Флемминг, О. Гертвиг и Э. ван Бенеден [11–13]. Однако они наблюдали только темные гранулы в обоих полюсах митотического веретена – размер центросомы настолько мал, что находится на пределе разрешения светового микроскопа. Тогда же было показано, что центриоли служат основой для роста производных структур клеточного центра – ресничек и жгутиков, центриоль в этом случае называется

базальным тельцем. Реснички и жгутики обеспечивают клеточную подвижность и чувствительность; за счет их работы движутся многие одноклеточные организмы и сперматозоиды, а также обеспечивается восприятие внеклеточных сигналов.

С легкой руки этих исследователей долгое время роль центросомы в клетке связывали с функционированием митотического веретена и ростом ресничек и жгутиков. Впоследствии оказалось, что такое представление в значительной степени ограничено, и правы были те исследователи, которые уже в начале XX в. поняли, что эта органелла играет в клетке совершенно особую роль [6].

Согласно современным представлениям центросома – это уникальный многофункциональный регуляторный центр, структурная часть механизма, управляющего динамической морфологией клетки в целом, а способность к полимеризации и организации МТ – лишь одна из функций центросомы.

Тем не менее способность нуклеировать МТ различных типов обусловила универсальную роль центросомы в жизнедеятельности клетки и удивительная устойчивость центриолей, связанная с модификацией входящих в их состав МТ, не могла не привлечь «внимание естественного отбора». По мере усложнения строения клетки значительно усложнились и регуляторные процессы в ней. Для успешной работы молекулярных каскадов необходима встреча сразу нескольких молекул в одной точке пространства. Таким местом для концентрации регуляторных молекул стала центросома. Формируемая ею система радиально сходящихся МТ, имеющих полярность и организующих внутриклеточный транспорт, определили оптимальную точку, ставшую в ходе эволюционного развития клетки центральным комплексом внутриклеточной регуляции. Такой центр дает очевидное преимущество: белки-моторы осуществляют доставку молекул, связанных с регуляцией клеточного цикла и формированием веретена клеточного деления, в малый объем центросомы, существенно повышая эффективность их работы.

В процессе подготовки к митозу количество центриолей в клетке удваивается – на каждой из двух центриолей, имеющих в клетке после окончания предыдущего деления, формируются по одной новой органелле. Сначала они имеют небольшую длину, но к началу деления клетки достигают длины «взрослых» материнских центриолей. Согласно нашим собственным исследованиям удвоение центриолей может начинаться еще до того, как начался процесс удвоения хромосом [14, 15]. Оба процесса находятся под управлением общей системы внутриклеточной регуляции, связанной с белками

семейства циклинов, но обладают определенной автономией. Их координация происходит в особые моменты клеточного цикла, названные критическими точками. Известно, что при кратном увеличении числа хромосом в клетке количество центриолей также кратно увеличивается. Этот факт породил представление о существовании связи между числом центриолей и числом хромосомных наборов. Действительно, большая часть организмов имеет двойной набор хромосом – дублирование наследственных молекул ДНК является несомненным эволюционным достижением, ведь такие организмы лучше защищены от случайных вредных или даже летальных мутаций наличием второго, «резервного» набора хромосом. Но не все организмы являются диплоидными. У перепончатокрылых насекомых существует оригинальная система определения пола. У них из оплодотворенных яйцеклеток развиваются самки, имеющие двойной набор хромосом, а из неоплодотворенных – самцы с одиночным набором хромосом. Сколько же центриолей будет в полюсах митотического веретена в клетках этих самцов? Две или одна? Наши эксперименты показали, что в полюсах веретена у них имеется по две центриоли (так же, как у организмов с двойным набором хромосом), а, следовательно, строение centrosомы не зависит напрямую от числа геномных копий, и структура centrosомы сформировалась независимо от эволюции генетического материала клеток.

Происхождение центриолей

Как и когда в ходе эволюции возникли центриоли? В последнее десятилетие для морфологических исследований степени эволюционного расхождения разных групп живых организмов успешно используют молекулярно-биологические методы, что позволило с большей надежностью разделить живые объекты на царства, типы, классы и т.д. В настоящее время принято подразделять все живые организмы на пять больших супергрупп, приведем наиболее типичных представителей каждой из них: I – диатомовые водоросли, бурые водоросли, инфузории и одноклеточные паразитические плазмодии, II – красные водоросли и растения, III – разнообразные виды одноклеточных организмов, IV – амобы и слизевики, V – наиболее многочисленная и морфологически разнообразная группа, в нее входят грибы, губки, насекомые, черви, моллюски, млекопитающие и др.

Оказалось, что центриоли имеются у представителей всех описанных супергрупп современных эукариотических организмов! Это прямо свидетельствует об эволюционной древности центриолей [16].

До последнего времени эволюционисты спорили, могли ли центриоли – столь сложные клеточные органеллы – возникнуть независимо у разных групп животных (и тогда их сходство есть результат конвергентного развития)? Анализ белковых последовательностей дал однозначный ответ на происхождение центриолей – у таких далеких и по морфологии, и по эволюционному возрасту организмов, как человек, насекомые и жгутиковые простейшие, центриоли не только похожи внешне, они имеют в своем составе гомологичные белки. Таким образом, центриоли, по-видимому, возникли у далекого общего предка всех современных эукариот, а наблюдаемые нами модификации аппарата клеточного деления, описанные нами выше у дрожжей или покрытосеменных растений, у которых центриолей нет ни на одной из стадий развития, являются результатом частичной утраты его компонентов в ходе эволюционного развития. Поскольку у низших растений центриоли имеются хотя бы на некоторых стадиях развития, эволюционная потеря центриолей высшими покрытосеменными растениями является относительно «недавней», хотя ее возраст и исчисляется сотнями миллионов лет.

Как же возникли центриоли? Отвечая на этот вопрос, мы сталкиваемся с извечной дилеммой: «Курица или яйцо?», которая в нашем случае звучит как: «Центриоль или ресничка/жгутик?» С одной стороны, формирование реснички или жгутика невозможно без центриольных цилиндров, выступающих в роли базальных телец. Значит, центриоли возникли раньше? Формирование реснички или жгутика, являющихся их продолжением, – единственная функция, для которой принципиальна структура центриолей. Для всех остальных активностей наличие центриолей не критично. Даже триплеты формирующейся дочерней центриоли не являются про-

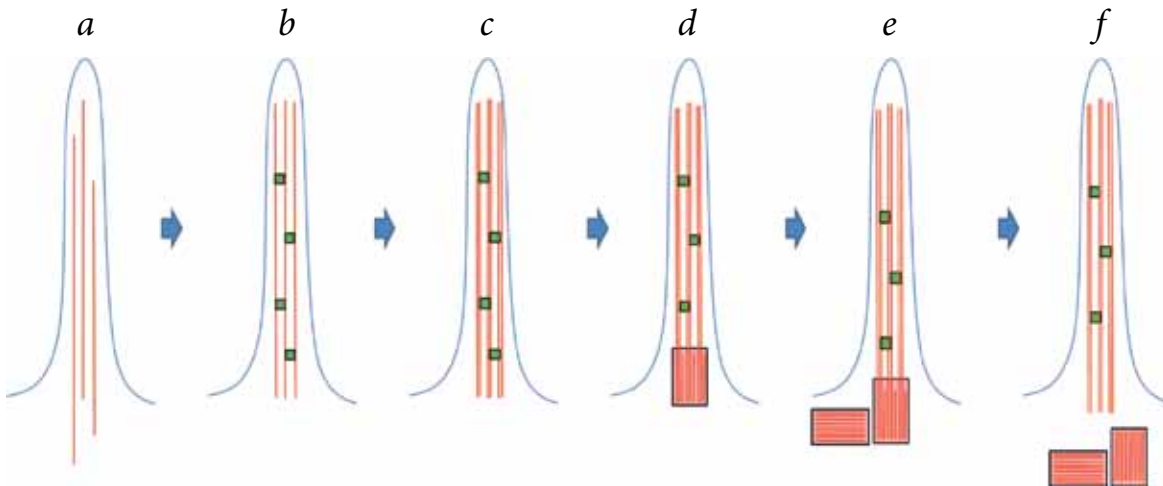


Рис. 4. Гипотетическая схема происхождения и эволюции ресничек и центриолей: а – образование вытянутого участка цитоплазмы за счет роста плюс-концов МТ, расположенных вблизи края клетки; б – латеральное взаимодействие соседних МТ и появление способности МТ к скольжению друг относительно друга за счет работы белков-моторов; в – формирование из отдельных МТ, лежащих вплотную друг к другу дуплетов МТ; д – появление в основании будущей реснички аналога белка SAS6. Образование структуры, имеющей симметрию девятого порядка. Фиксация концов МТ жгутика за счет формирования триплетов МТ на базальном конце (парабазальное тельце). Стабилизированная таким образом структура (связки триплетов МТ не дают им скользить) получает возможность осуществлять движение за счет скольжения дуплетов МТ жгутика друг относительно друга; е – утрата второго жгутика (известно, что у предка эукариот жгутиков было изначально два). Образование базального тельца, состоящего из двух центриолей; ф – появление механизма отделения центриоли от жгутика. Формирование centrosомы из двух центриолей, способной к самовоспроизведению. Перемещение ее в центральную часть клетки. Приобретение centrosомой функций центра организации интерфазных и митотических МТ при сохранении способности образовывать реснички и жгутики.

должением триплетов материнской, а МТ веретена и вовсе формируются на затравках в митотическом гало. МТ, входящие в состав и веретена деления, и центриолей, и ресничек жгутиков, намного более древние эволюционные приобретения живых существ, чем сами центриоли, поскольку в современных бактериях обнаружены белки-аналоги тубулинов. Можно предположить, что в начале эволюционного пути (когда у предков эукариот отсутствовали как центриоли, так и реснички/жгутики) динамичные, но прочные МТ уже выполняли цитоскелетные функции. Если это верно, гипотетическая схема формирования жгутиков и центриолей на основе модификации МТ-содержащих структур клетки может выглядеть следующим образом (рис. 4).

Считается, что впервые центриоли появились у древних потомков одноклеточных жгутиконосцев [17]. Входящие в состав centrosомы большинства эукариотических организмов центриоли, по-видимому, изначально были частью двигательного аппарата клетки – базальными тельцами, лежа-

щими в основании жгутиков и ресничек. И за сотни миллионов лет центриоли современных жгутиконосцев практически не изменились, что показывает идентичность их строения центриолям человека. Такая устойчивость однажды возникшей структуры свидетельствует о достижении ею близкой к идеальной приспособленности для выполняемых функций.

Эволюционный процесс развития организмов на нашей планете шел по пути, обеспечивающему наилучшую сохранность генетической информации, передаваемой от предков к потомкам, то есть по пути обеспечения преемственности между поколениями. Генетическое разнообразие, возникающее как следствие мутаций, также является результатом того, что измененная информация передавалась по наследству от материнской клетки к дочерней и закреплялась в ряду поколений в случае, если результат мутации давал организмам эволюционное преимущество над другими особями. Таким образом, с эволюционной точки зрения механизмы клеточного деления развивались и совершенствовались, следуя по длинному пути – от случайного, спонтанного и неравномерного разделения первых коацерватов к строго упорядоченному разделению наследственного материала.

Большинство клеток высших животных делится митотически, при этом распределение по дочерним клеткам обеспечивает целый комплекс клеточных преобразований, включающий формирование временных специализированных структур. Эти преоб-

разования клеточных компонентов, выработанные в ходе эволюционного развития, эффективно обеспечивают равномерное распределение генетического материала в ряду поколений клеток, воспроизводимость самих клеток и стабильность генотипа конкретного организма.

Статья написана по результатам проектов РФФИ №№ 95-04-12703, 00-15-99366, 03-04-48035, 06-04-99008, 06-04-49233, 09-04-00363, 11-04-11515, 12-04-00488, 13-04-11515, 13-04-07016 и 15-04-08550.

Литература

- 1. Ю.С. Ченцов**
Введение в клеточную биологию: Учебник для вузов, 4-е изд., РФ, Москва, Изд. Академкнига, 2004, 495 с.
- 2. E. Nogales, M. Whittaker, R.A. Milligan, K.H. Downing**
Cell, 1999, **96**(1), 79. DOI: 10.1016/S0092-8674(00)80961-7.
- 3. J.R. McIntosh**
B Spatial Organization of Eukaryotic Cells: Proc. Symp. Held in Honor of Keith R. Porter (USA, Colorado, Boulder, 30 April – 2 May, 1982), Ser. Modern Cell Biology, Vol. 2, Ed. J.R. McIntosh, USA, NY, New York, Alan R. Liss Publ., pp. 115-142.
- 4. N. Hirokawa**
Science, 1998, **279**(5350), 519. DOI: 10.1126/science.279.5350.519.
- 5. I.B. Alieva, I.A. Vorobjev**
Chromosoma, 1991, **100**(8), 532. DOI: 10.1007/BF00352204.
- 6. Р.Э. Узбеков, И.Б. Алиева**
Центросома. История изучения и новые открытия. От цитоплазматической гранулы до центрального комплекса внутриклеточной регуляции: Монография, под ред. Е.С. Надеждиной, РФ, Москва, Издательство Московского университета, 2013, 320 с.
- 7. D. Kitagawa, I. Vakonakis, N. Olieric, M. Hilbert, D. Keller, V. Olieric, M. Bortfeld, M.C. Erat, I. Flückiger, P. Gönczy, M.O. Steinmetz**
Cell, 2011, **144**(3), 364. DOI: 10.1016/j.cell.2011.01.008.
- 8. S. van Kreeveld Naone, M. Winey**
B Centrosomes in Development and Disease, Ed. E.A. Nigg, FRG, Hamburg, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, pp. 43–69. DOI: 10.1002/3527603808.ch4.
- 9. Р.Э. Узбеков, И.Б. Алиева**
Цитология, 2008, **50**(2), 91.
- 10. M. Gottardo, G. Callaini, M.G. Riparbelli**
J. Cell Sci., 2015, **128**(14), 2437. DOI: 10.1242/jcs.172627.
- 11. W. Flemming**
B Sitzungsber. Akad. Wissensch. Wien, 1975, **71**, pp. 81–147.
- 12. O. Hertwig**
Morphol. Jb., 1875, **1**(3), 347.
- 13. E. van Beneden**
Bull. Acad. R. Sci., Lett. Beaux-Arts Belg., 1876, **41**(1), 1160. (<http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/160189>).
- 14. R.E. Uzbekov**
Biochem. Moscow Suppl. Ser. A, 2007, **1**(3), 206. DOI: 10.1134/S1990747807030026.
- 15. R.E. Uzbekov, I.B. Alieva**
B Cytoskeleton: Cell Movement, Cytokinesis and Organelles Organization, Eds S. Lansing, T. Rousseau, USA, NY, New York, Nova Sci. Publ., 2010, pp. 127–138.
- 16. J. Azimzadeh**
Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci., 2014, **369**(1650), 20130453. DOI: 10.1098/rstb.2013.0453.
- 17. J. Azimzadeh, M. Bornens**
B Centrosomes in Development and Disease, Ed. E.A. Nigg, FRG, Hamburg, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004, pp. 93–122. DOI: 10.1002/3527603808.ch6.

English

The Evolution of Cell Division Mechanisms – a Long Way from a Random to the Regularity*

Irina B. Alieva

A.N. Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology
of Lomonosov Moscow State University
1-40, Leninskie Gory, GSP-1, Moscow, 119992, Russia
irina_alieva@belozersky.msu.ru

Rustem E. Uzbekov

Francois Rabelais University, Tours, France
Bd. Tonnelle 10, 37032, Tours, France
rustem.uzbekov@univ-tours.fr

Abstract

The paper presents in a popular-scientific style the results of modern investigations on the evolution of cell division mechanisms of organisms living now on our planet. The basis for the existence of life on our planet is the ability of organisms, inhabiting it, to grow and to reproduce themselves. Since the moment of the egg and spermatozoon fusion, the new organism is growing by the increase in the number of cells constituted it and their subsequent differentiation, which gives rise to tissues and organs. The cell number increases due to the periodic division of the maternal cell into two daughter cells, growth of daughter cells and entry into the next division. At the same time, the main objective is realized – the genetic material is evenly distributed among the daughter cells. How and when did the cells of ancient organisms “learn” to divide into two equal parts? What evolutionary way have the mechanisms, allowing cells to reproduce and transfer the hereditary information to next generation, come? The questions are answered in this article.

Keywords: mitosis, mitotic apparatus, mitotic spindle, centrosome, centriole, evolution of cell division.

*The work was financially supported by RFBR (project 17-14-20105).

Images & Tables

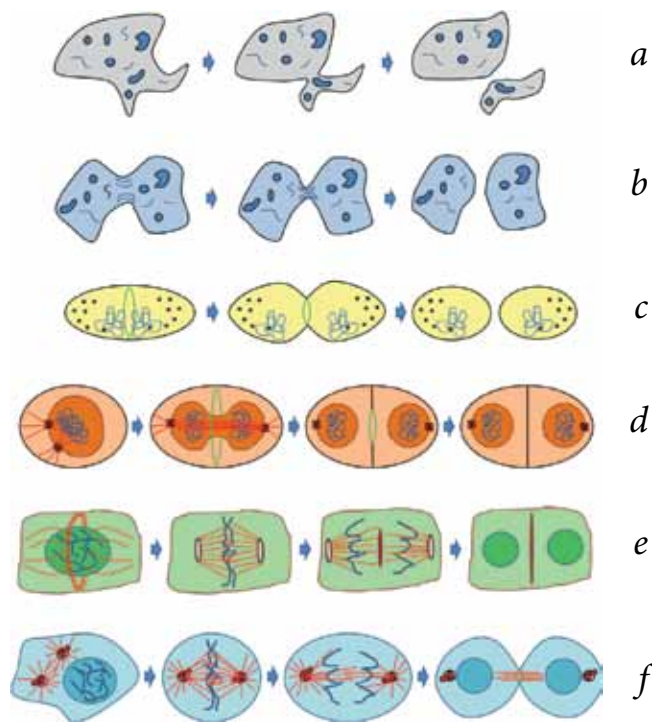


Fig. 1. The evolution of cell division mechanisms: a – irregular division of coacervates, b – quasiregular division of coacervates, c – regular division of prokaryotes, d – closed mitosis of yeast, e – open mitosis of plants, f – open mitosis of vertebrates.

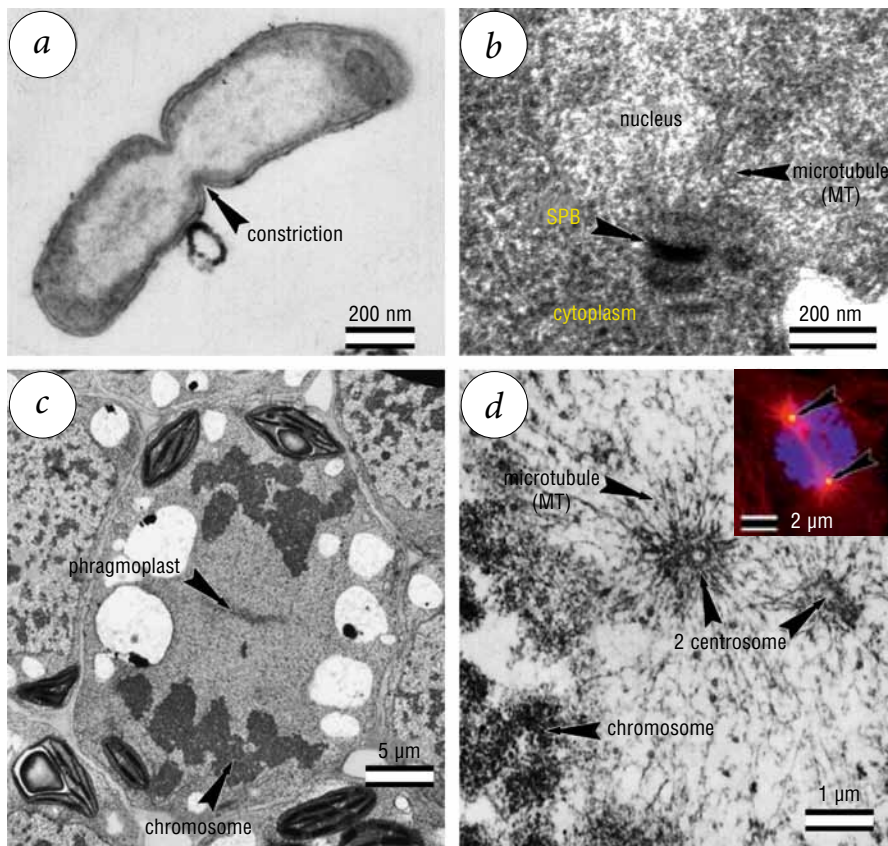


Fig. 2. Cell division in various organisms. a – The division of the *E. coli* bacterium occurs without the special structures formation due to the constriction that divides the cell in two. b – The spindle pole body (SPB) in the yeast cell with the maturation spindle’s microtubules (MTs) extending from it to the core at the closed mitosis. c – The division of the cytoplasm in the plant cell mitosis occurs through the formation of phragmoplast, which is a septum growing from the central axis of the cell to its periphery. d – The spindle poles forming on two centrosomes in a prophase cell of a pig embryo kidney biocytoculture. On the sidebar: specific labeling of the MTs of the mitotic spindle (highlighted in red), centrosomes (highlighted in yellow, shown by arrows) and chromosomes (highlighted in blue) in *xenopus* cell culture (prophase). a, b, d – Photos by R.E. Uzbekov, c – photo from the archive of K. Esau (<http://ccber.ucsb.edu/light-and-electron-microscope-images>).

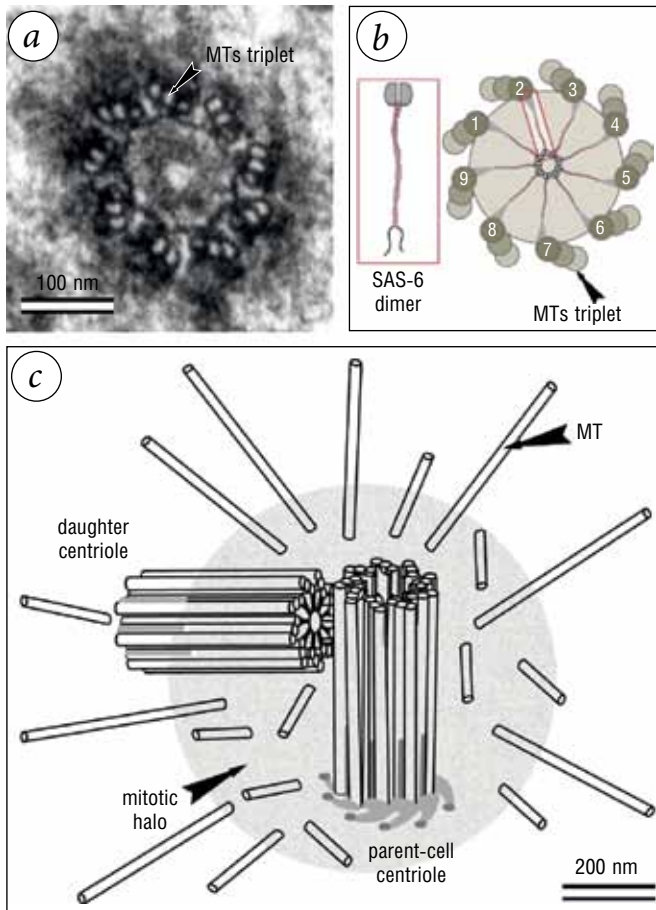


Fig. 3. Ultrastructure of centrosome. *a* – A cross-section of the centriole in a cell of a pig embryo kidney biocytoculture. Nine MTs triplets (a triplet is marked by an arrow), connected by a system of binds, form the wall of a centriole [6]. *b* – The ninth-order symmetry arises under the centrioles formation by the interaction of the SAS-6 protein dimers end sections, the angle between which is exactly 40 degrees. It is the combination of nine these dimers that gives a complete ring of 360 degrees [7]. The MTs triplet is marked with an arrow. *c* – Scheme of the centrosome structure in the mitosis prophase. Two mutually perpendicular centrioles form a diposome, surrounded by a mitotic halo from which the MTs stretch away.

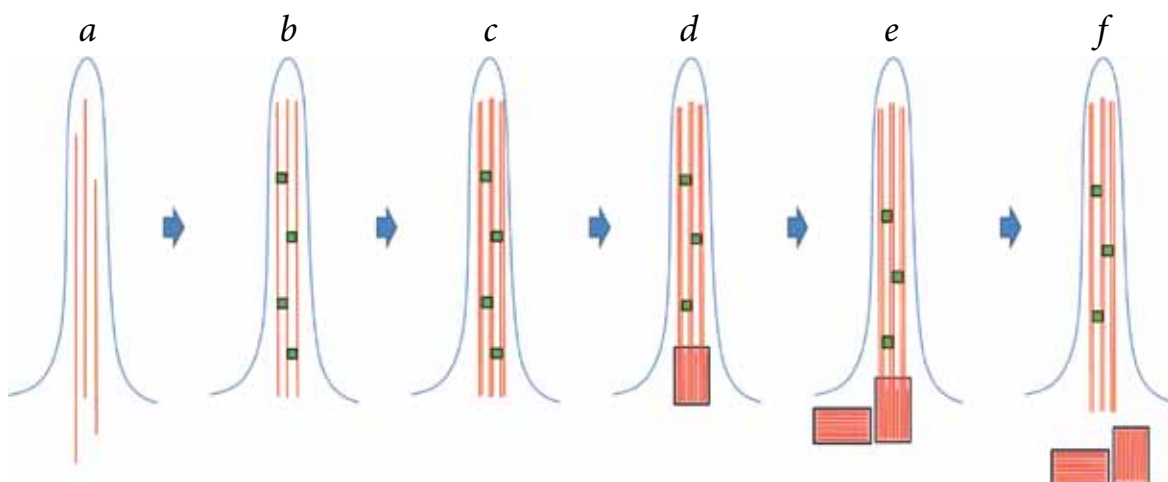


Fig. 4. The hypothetical scheme of origin and evolution of cilia and centrioles.

a – The cytoplasm elongated region formation by the growth of the plus-ends of the MTs, located near the cell edge. *b* – The lateral interaction of neighboring MTs and the appearance of the MTs ability to slide relative to each other by means of the protein-motors work. *c* – The MTs doublets formation from individual MTs lying close to each other. *d* – The SAS6 protein analogue appearance in the base of the future cilium. Formation of a structure having the ninth-order symmetry. The flagellum MTs' ends fixation by means of the MTs triplets formation at the basal end (parabasal body). Being stabilized in this way, the structure (bundles of triplets MT does not allow them to slide) gets the opportunity to move by means of the flagellum MTs doublet sliding relative to each other. *e* – Loss of the second flagellum (it is known that the eukaryotes ancestor had initially two flagella). Formation of a basal body composed of two centrioles. *f* – Generation of a mechanism for separating the centriole from the flagellum. Centrosome formation from two centrioles, capable of self-reproducing. The centrosome movement into the central part of the cell. The centrosome acquires functions of an organization center of interphase and mitotic MTs while maintaining the ability to form cilia and flagella.

References

1. **Yu.S. Chentsov**
Introduction to Cell Biology: University textbook, 4th Ed.
[Vvedenie v kletochnyuyu biologiyu: Uchebnik dlya vuzov],
RF, Moscow, Akademkniga Publ., 2004, 495 pp.
(in Russian).
2. **E. Nogales, M. Whittaker, R.A. Milligan, K.H. Downing**
Cell, 1999, **96**(1), 79. DOI: 10.1016/S0092-8674(00)80961-7.
3. **J.R. McIntosh**
In Spatial Organization of Eukaryotic Cells: Proc. Symp.
Held in Honor of Keith R. Porter (USA, Colorado, Boulder,
30 April – 2 May, 1982), Ser. Modern Cell Biology, Vol. 2,
Ed. J.R. McIntosh, USA, NY, New York, Alan R. Liss Publ.,
pp. 115-142.
4. **N. Hirokawa**
Science, 1998, **279**(5350), 519.
DOI: 10.1126/science.279.5350.519.
5. **I.B. Alieva, I.A. Vorobjev**
Chromosoma, 1991, **100**(8), 532. DOI: 10.1007/BF00352204.
6. **R.E. Uzbekov, I.B. Alieva**
Centrosome: History of Study and New Discoveries.
From Cytoplasmic Granule to the Center of Intracellular
Regulation: Monography [Tsentrosoma: Istoriya izucheniya
i novye otkrytiya. Ot tsitoplazmaticheskoy granuly
do tsentralnogo kompleksa vnutrikletchnoy regulyatsii],
Ed. E.S. Nadezhdina, RF, Moscow, Moscow University Press,
2013, 320 pp. (in Russian).
7. **D. Kitagawa, I. Vakonakis, N. Olieric, M. Hilbert, D. Keller,**
V. Olieric, M. Bortfeld, M.C. Erat, I. Flückiger, P. Gönczy,
M.O. Steinmetz
Cell, 2011, **144**(3), 364. DOI: 10.1016/j.cell.2011.01.008.
8. **S. van Kreeveld Naone, M. Winey**
In Centrosomes in Development and Disease,
Ed. E.A. Nigg, FRG, Hamburg, Wiley-VCH Verlag
GmbH & Co. KGaA, 2004, pp. 43–69.
DOI: 10.1002/3527603808.ch4.
9. **R.E. Uzbekov, I.B. Alieva**
Tsitologiya [Cytology], 2008, **50**(2), 91 (in Russian).
10. **M. Gottardo, G. Callaini, M.G. Riparbelli**
J. Cell Sci., 2015, **128**(14), 2437. DOI: 10.1242/jcs.172627.
11. **W. Flemming**
In Sitzungsber. Akad. Wissensch. Wien, 1975, **71**, pp. 81–147.
12. **O. Hertwig**
Morphol. Jb., 1875, **1**(3), 347.
13. **E. van Beneden**
Bull. Acad. R. Sci., Lett. Beaux-Arts Belg., 1876, **41**(1), 1160.
(<http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/160189>).
14. **R.E. Uzbekov**
Biochem. Moscow Suppl. Ser. A, 2007, **1**(3), 206.
DOI: 10.1134/S1990747807030026.
15. **R.E. Uzbekov, I.B. Alieva**
In Cytoskeleton: Cell Movement, Cytokinesis and Organelles
Organization, Eds S. Lansing, d T. Rousseau, USA, NY,
New York, Nova Sci. Publ., 2010, pp. 127–138.
16. **J. Azimzadeh**
Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci., 2014, **369**(1650),
20130453. DOI: 10.1098/rstb.2013.0453, 1.
17. **J. Azimzadeh, M. Bornens**
In Centrosomes in Development and Disease, Ed. E.A. Nigg,
FRG, Hamburg, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2004,
pp. 93–122. DOI: 10.1002/3527603808.ch6.

Мир, скованный льдом*

С.В. Попов

Антарктида – это бескрайние снега и льды, и лишь малую часть ее территории занимают скальные массивы. Одними из наиболее примечательных образований континента являются шельфовые ледники. Они окружают Антарктиду практически со всех сторон. Гидросфера Антарктиды коренным образом отличается от других континентов. Здесь нет (не доказано существование) разветвленной сети подледных рек, а имеются лишь 414 предположительно изолированных водоемов. Самым большим из них является озеро Восток. Его размеры составляют около 270×70 км при площади водного зеркала $15\,425$ км². Антарктида скрывает большие богатства: нефть, газ, каменный уголь, руды. Помимо этого, ее ледники содержат 24.69 млн км³ чистой пресной воды. Антарктида – это уникальный континент. Его изучение продолжается, и наша страна на протяжении вот уже шестидесяти лет принимает в этом самое активное участие.

Ключевые слова: Антарктида, подледный рельеф, ледниковый покров, подледниковые водоемы, подледниковое озеро Восток.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-15-20053).

«Ах, если бы вам когда-нибудь довелось увидеть своими глазами, как там чудесно...»

Р. Амундсен

Антарктида – это поистине другой мир. Это бескрайние снега, освещаемые зелено-голубыми с розовыми переливами полярными сияниями зимой и незаходящим желто-красным летним солнцем. Лишь 2.4% ее территории занимают скальные массивы [1], контрастно выделяющиеся приметными коричневатыми пятнами на фоне океана, льда и неба. Именно такой она запоминается всем, кто хоть однажды вступал на ее берега. Можно лишь догадываться, с каким восхищением и восторгом смотрели матросы шлюпов «Мирный» и «Восток», кораблей Первой русской антарктической экспедиции под командованием капитана 2 ранга Ф.Ф. Беллинсгаузена и лейтенанта М.П. Лазарева, на открывшийся вдруг их взору «...матерый лед чрезвычайной высоты, и в прекрасный тогда вечер, смотря с саленгу (т.е. со второй площадки мачты – С.П.), простирался оный так далеко, как могло только достигнуть зрение» [2]. Эти слова были написаны в то время, когда оба судна подошли к берегам Антарктиды. Сейчас мы знаем, что взору путешественников предстал современный шельфовый ледник Фимбулисен (рис. 1).

Шельфовые ледники – это уникальные образования. Они окружают Антарктиду практически со

всех сторон. От материкового они отличаются тем, что находятся на плаву в виде достаточно ровной, постепенно утоняющейся к краю ледяной плиты. Но распространены они не только в Антарктиде. Они имеются также и в Арктике, но там их размеры значительно скромнее. Особенно стоит остров Гренландия. Толщина его шельфовых ледников составляет более сотни метров [6]. Но в Антарктиде все имеет циклопические размеры. Здесь располагаются три самых больших шельфовых ледника нашей планеты: Росса, Фильхнера–Ронне и Эймери (рис. 1). Их размеры поистине гигантские: площадь первого чуть меньше территории Франции, второго – немного больше территории Швеции, а последнего – сравнима с территорией Швейцарии. При этом их толщина превышает 200 м [7], что сравнимо с высотой главного здания МГУ на Воробьевых горах.



ПОПОВ
Сергей Викторович
АО «Полярная морская
геологоразведочная экспедиция»

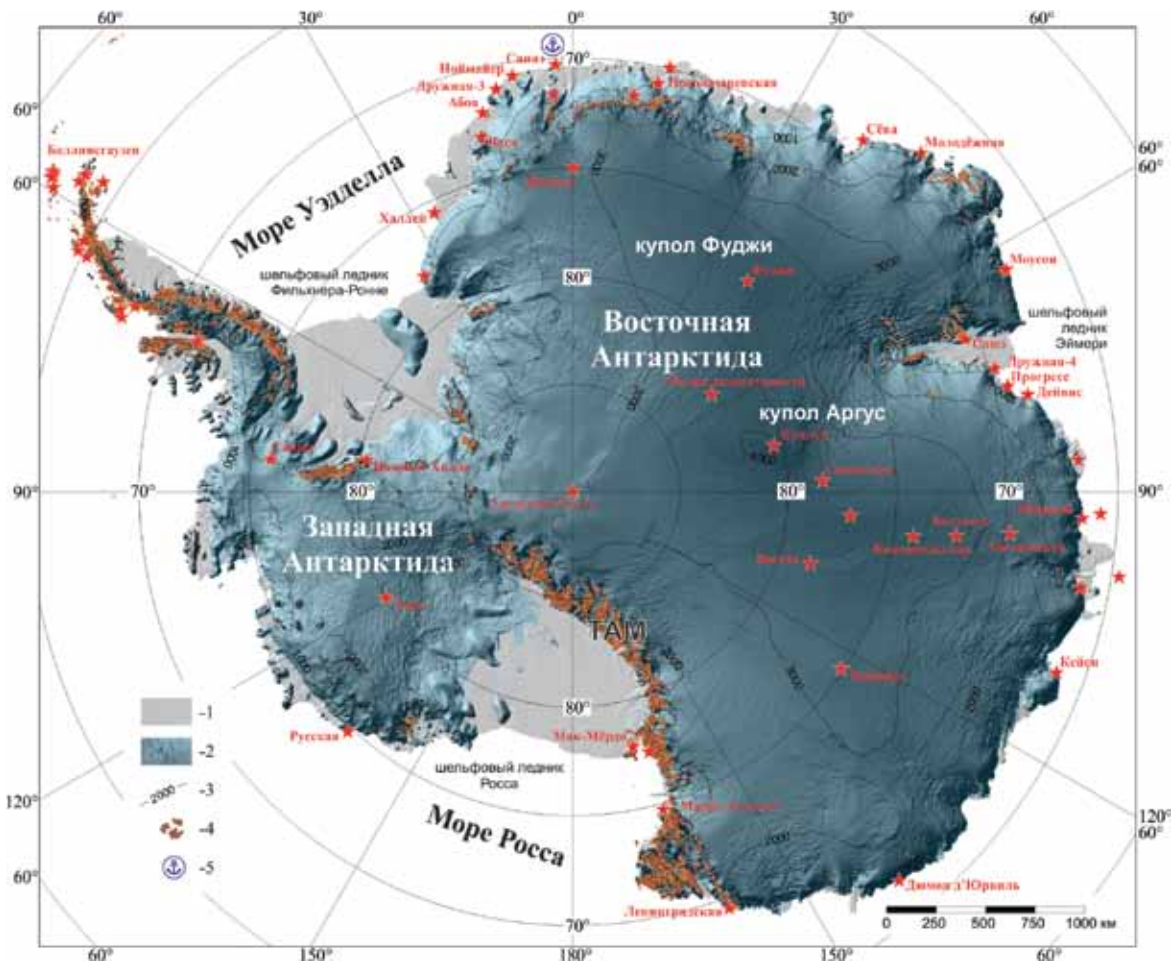


Рис. 1. Дневная поверхность Антарктиды: 1 – шельфовые ледники; 2 – материковые и выводные ледники; 3 – изогипсы высот дневной поверхности [3], сечение изолиний 1000 м; 4 – горные выходы на поверхность ледника [4]; 5 – место подхода Первой русской антарктической экспедиции к берегам Антарктиды [2, 5].

Размеры шельфовых ледников постоянно меняются. Это вызвано как их растеканием, так и разрушением в прифронтовой части, в результате которого образуются айсберги. С одним из них встретились участники Первой русской экспедиции. Их удивлению не было предела, когда шлюп «Мирный» подошел к «...ледяному острову вышиной от поверхности моря более 20 саженей (т.е. более 43 м – С.П.)» [5]. Еще больше поражает воображение айсберг, отколовшийся в октябре 1985 г. от шельфового ледника Фильхнера – Ронне. Изначально его размеры составляли около 200 × 100 км. Затем айсберг раскололся на три части примерно по 90 × 95 км каждый [1, 8]. Этому предшествовало формирование трещины колоссальных размеров Гранд Касмс (Grand Chasms). Незадолго

до откола айсбергов ее ширина составила 19 км! (рис. 2). Такие гигантские трещины можно встретить лишь в Антарктиде.

Шельфовые ледники занимают лишь 11,7% территории Антарктиды [7]. Оставшаяся область (исключая скальные массивы) сравнима по размерам с Канадой и Мексикой вместе взятыми. Она представляется, выражаясь словами Джека Лондона, «Белым Безмолвием» – миром нетающих белых снегов и голубого льда. Здесь нет птиц, а тишину нарушает лишь стон ветра и вой метели. Большая часть этой территории представляет собой равнину. В так называемом «поясе ветров», области практически неутраченного ветра (рис. 3), поверхность осложнена наддувами, застругами и рапаками самых причудливых форм. Они настолько плотные, что гусеницы многотонных тягачей практически не оставляют на них следа, а разрезать их можно только пилой.

Согласно последним данным средняя толщина антарктического ледника составляет 1937 м, при максимальных значениях около 4897 м [7]. Что же скрывает это многокилометровое голубое покрывало? Благодаря достижениям современной гео-

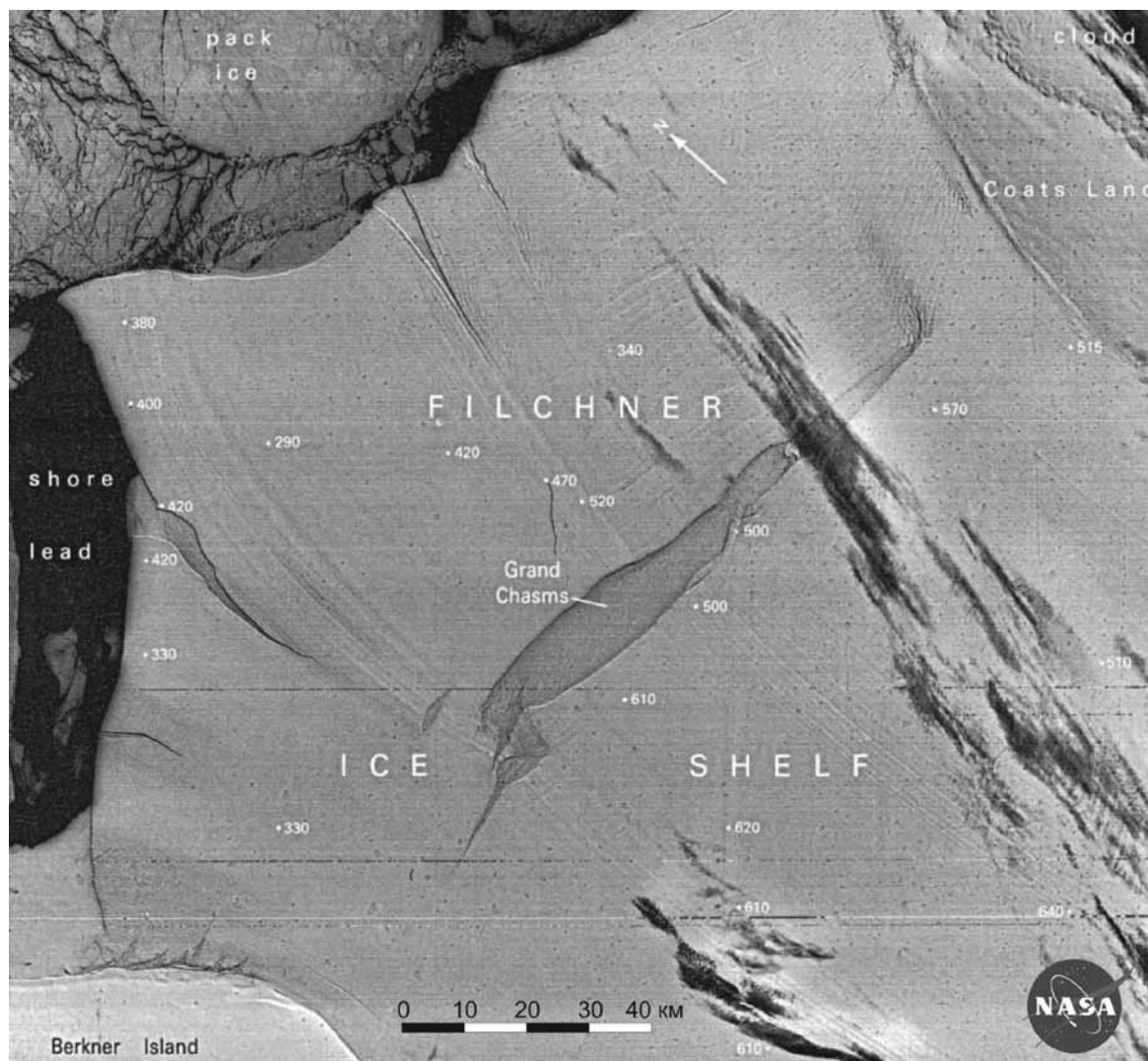


Рис. 2. Спутниковый снимок, выполненный 11 ноября 1973 г. в районе шельфового ледника Фильхнера–Ронне (заимствовано из работы [1] с изменениями).

физики мы можем достаточно обоснованно ответить на этот вопрос. С одной стороны, подледный рельеф Антарктиды (рис. 4) сохраняет основные черты всех других материков, но есть и заметные отличия. Именно они выделяют этот континент среди остальных. Вокруг каждого материка имеет-

ся шельф: выровненная область его подводной окраины, примыкающей к суше. Обычно он располагается на глубинах около 200 м ниже уровня моря [9], но в Антарктиде он глубже примерно вдвое [7] и вогнут



Рис. 3. Возвращение санно-гусеничного похода со станции Восток на станцию Мирный: а – полевой сезон 2003/04 гг.; б – полевой сезон 2005/06 г. Фотографии автора.

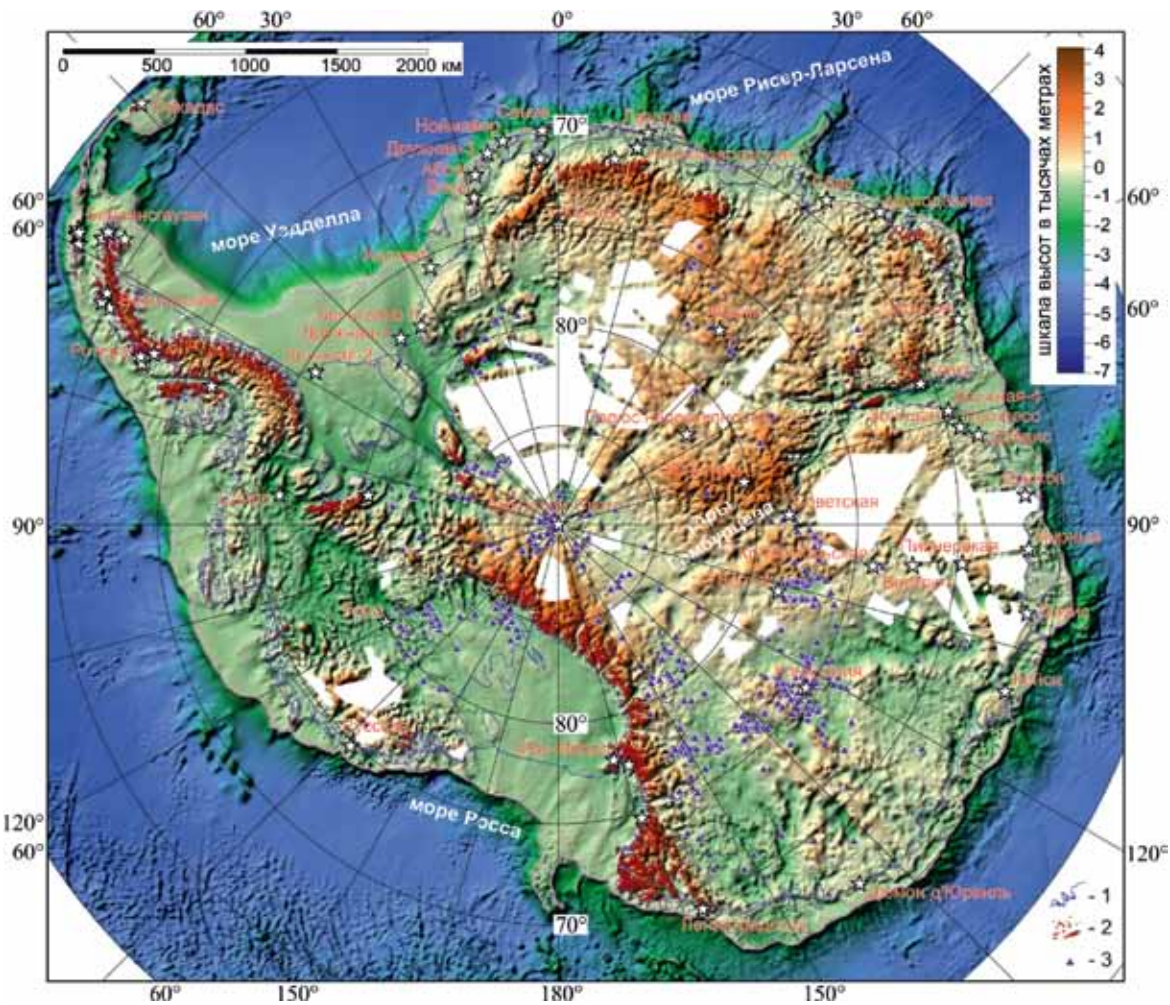


Рис. 4. Рельеф каменной поверхности Антарктиды [10]: 1 – береговая линия и границы шельфовых ледников [4]; 2 – горные выходы [4]; 3 – подледниковые водоёмы [11, 12].

к центру материка. Это произошло за счет дополнительной ледниковой нагрузки, которая, сместив баланс сил, деформировала литосферные плиты.

В Антарктиде имеется множество подледных депрессий. Они гораздо глубже, чем на других континентах. Это также связано с наличием дополнительной ледниковой нагрузки. Самым низким участком открытой суши нашей планеты является Мертвое море в Азии. Его берега располагаются на высоте -395 м [13]. Но придонная часть подледного трога Бентли в Антарктиде располагается на 2870 м ниже уровня моря [7]!

Если средняя высота поверхности суши составляет 875 м [14], то аналогичное значение для подледного рельефа Антарктиды всего лишь 83 м [7]. Но уберем леднико-

вую нагрузку. Тогда континент «расправит плечи» и произойдет его воздымание. Если воспользоваться общепринятой схемой изостатической компенсации Эри, то гляциоизостатическое погружение материка составляет примерно четверть толщины ледника. Таким образом, рельеф Антарктиды до начала оледенения (или после освобождения ото льда) мог быть примерно таким, как показано на рисунке 5а. Как следует из рисунка 5b, амплитуды гляциоизостатического погружения в среднем составляют около полукилометра. При этом расчеты показывают, что средняя высота поверхности Антарктиды без ледника составляет около 520 м, т.е. выше современной Австралии (320 м) и чуть ниже Южной Америки (600 м) [14].

Следующее отличие Антарктиды состоит в ее гидросфере. Она коренным образом отличается от других континентов. До конца прошлого века существование гидросферы, применительно к подледной среде Антарктиды, в научных кругах если не отрицалось, то, по крайней мере, широко не обсуждалось. Однако еще к середине 1960-х появились результа-

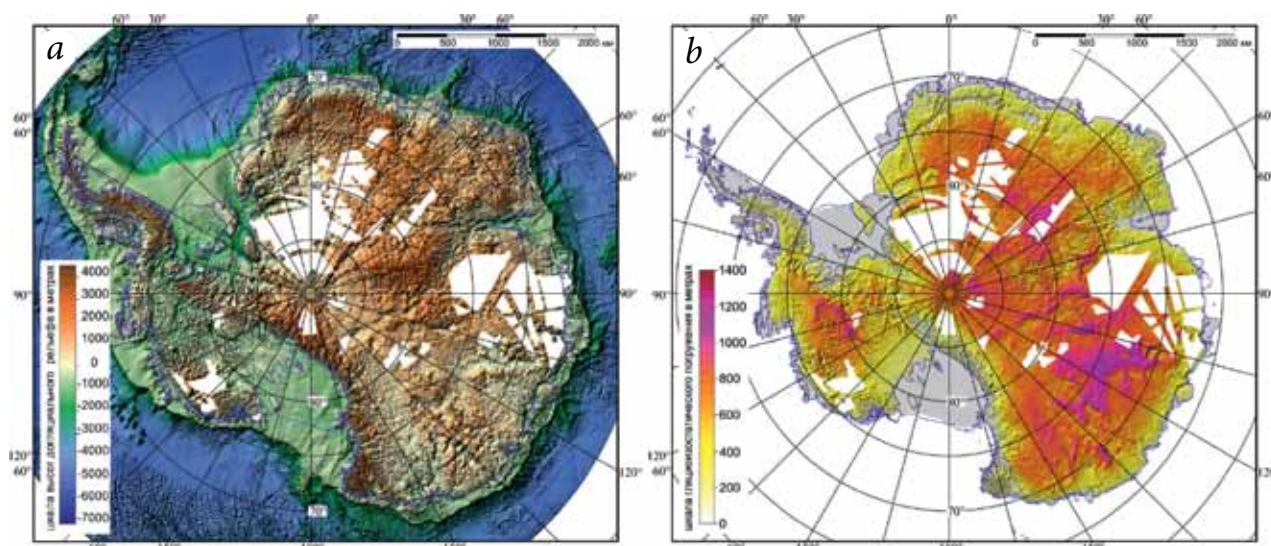


Рис. 5. Гипотетический догляциальный рельеф Антарктики (а) и предполагаемая величина гляциоизостатического погружения континента (б). Синим цветом показана современная береговая линия Антарктиды [4].

ты математического моделирования И.А. Зотикова. Они наглядно продемонстрировали возможность донного таяния из-за огромного давления ледника на каменное основание. При этом талая вода заполняет отрицательные формы подледной поверхности, что приводит к образованию подледниковых водоемов [15]. Менее чем через десятилетие появились первые свидетельства, подтверждающие эту гипотезу. В декабре 1967 г. в ходе англо-американских аэрогеофизических исследований в непосредственной близости от станции Советская был открыт первый подледниковый водоем [16]. Еще через десять лет было выявлено в общей сложности 17 подобных объектов [17, 18]. Но лишь после открытия в конце прошлого века подледникового озера Восток, самого большого подледникового водоема на нашей планете [19–21], подледная гидросфера Антарктиды привлекла к себе пристальное внимание.

На сегодняшний день зарегистрировано 414 относительно небольших (до нескольких десятков километров в длину) объектов подобного рода [11, 12], однако озеро Восток, расположенное к северу от одноименной российской станции, поражает воображение своими размерами. Оно попадает в двадцатку крупнейших озер нашей планеты и занимает промежуточное место между Онежским и Ладожским. Его средняя глубина составляет около 400 м, при максимальном измеренном значении в 1220 м. Общий объем воды в озере оценивается в 6100 км³ [21]. Положение выявленных подледниковых водоемов в Антарктиде показано на рисунке 4.

Несмотря на обилие подледниковых водоемов, наличие разветвленной гидросети, т.е. многочис-

ленных рек, текущих под антарктическим ледником, не доказано. В этом состоит еще одно отличие Антарктиды от других материков. На сегодняшний день нет ни одного документального подтверждения наличия подледниковых рек. Во всяком случае, на современном уровне наших знаний об Антарктиде корректнее говорить о предположительно изолированных подледниковых озерах, нежели о разветвленной речной сети.

Помимо того что Антарктида таит в себе много загадок, она является надеждой Человечества. Геолого-геофизические исследования, которые выполняются на регулярной основе уже более полувека, показали, что Антарктида богата полезными ископаемыми. Перспективные в плане разработки (на настоящий момент любая деятельность, связанная с минеральными ресурсами, в Антарктиде запрещена) запасы угля оцениваются в 150 млрд т, запасы железных руд только в горах Принс-Чарльз (восточная Антарктида) составляют 5–10 млрд т. На Антарктическом полуострове найдено медно-молибденовое месторождение с запасами руды около 140 млн т. Кроме того, в Антарктиде имеются запасы золота, платины, урана и алмазов [22]. Антарктида



Рис. 6. Схема возможного затопления Восточной Европы, Европейской части России и части Западной Сибири. Синим цветом показана современная береговая линия и воды Мирового океана [30], область затопления показана голубым цветом. Красным цветом показаны государственные границы. Данные высот поверхности Земли заимствованы из проекта ETOPO1 [31].

богата нефтью и газом. Согласно современным оценкам [23] их запасы сравнимы с запасами нефти таких стран, как Венесуэла, Саудовская Аравия и Россия вместе взятых [24].

Но не только своими недрами богата Антарктида. Известно, что запасы пресной воды на Земле составляют 10.66 млн км³. Однако лишь 1.2% из них приходится на озера и реки, т.е. на ресурсы, доступность которых не предполагает значительных затрат. Остальная часть – это подземные воды, заполняющие трещины и полости в земной коре до глубин около 2 км [25]. При этом количество пресной воды

неуклонно снижается. По данным ООН уже сейчас более 1.2 млрд людей живут в условиях ее постоянного дефицита, а еще около 2 млрд жителей страдают от ее регулярной нехватки. Через десять–пятнадцать лет их численность удвоится [26, 27]. С другой стороны, общий объем антарктических ледников оценивается в 26.92 млн км³ [7]. Это соответствует 24.69 млн км³ чистой пресной воды, что примерно вдвое превышает имеющиеся ее запасы (с учетом грунтовых) и в 190 раз больше объема пресноводных рек и озер! Таким образом, в антарктическом леднике сосредоточено более двух третей всего потенциала пресной воды нашей планеты. И именно она может обеспечить будущее человечества. Уже более полувека разрабатываются различные проекты транспортировки айсбергов из Антарктики в засушливые районы нашей планеты [28, 29].

Однако антарктический ледник таит в себе и опасность. Согласно современным оценкам его таяние приведет к повышению уровня Мирового океана на 58 м [7]. Уйдут под воду такие города, как Санкт-Петербург и Калининград, Архангельск и Мурманск, Владивосток и Таллинн, Лондон и Берлин, Токио и Пекин. Полностью исчезнет Голландия. Схема затопления Восточной Европы, европейской части России и большей части Западной Сибири показана на *рисунке 6*. Но это далеко не все беды. Сброс холодной воды в Мировой океан изменит морские течения, которые принимают самое активное участие в формировании климата нашей планеты. Вслед за освобождением Антарктиды от ледяной нагрузки начнется поднятие континента. Это приведет к тектоническим движениям, которые будут сопровождаться землетрясениями и извержениями вулканов по всей Земле.

Антарктида – это уникальный континент, аналогов которому нет на нашей планете. Его изуче-

ние продолжается, и наша страна на протяжении вот уже шестидесяти лет принимает в этом самое активное участие. Благодаря научно-техническому прогрессу в недалеком будущем геофизические исследования мира, скованного льдом, еще больше расширят наше представление о прошлом и настоящем мира, в котором мы живем. Ведь по меткому замечанию академика В.М. Котлякова «...*период географических открытий еще не завершен*».

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ: проекты №№ 03-05-64198, 07-05-00401, 07-05-00573, 10-05-91330ННИО и 14-05-00234.

Литература

1. C. Swithinbank
Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: Antarctica, United States Geological Survey Professional Paper 1386-B, USA, Washington, D.C., 1988, 290 pp.
2. А.Ф. Трешников
История открытия и исследования Антарктиды, Сер. «Открытие земли: Антарктида», Москва, Географиз, 1963, 431 с.
3. J.L. Bamber, J.L. Gomez-Dans, J.A. Griggs
Cryosph., 2009, 3(1), 101. DOI: 10.5194/tc-3-101-2009.
4. Scientific Committee on Antarctic Research Antarctic Digital Database (SCAR ADD), UK, Cambridge, British Antarctic Survey (<http://www.add.scar.org/>).
5. М.П. Лазарев. *Документы в 3 тт., Сер. Русские флотоводцы. Материалы для истории русского флота, т. 1*, под ред. А.А. Самарова, Москва: Военно-морское издательство Военно-морского министерства СССР, 1952, 524 с.
6. J.L. Bamber, J.A. Griggs, R.T.W.L. Hurkmans, J.A. Dowdeswell, S.P. Gogineni, I. Howat, J. Mouginot, J. Paden, S. Palmer, E. Rignot, D. Steinhage
Cryosph., 2013, 7(2), 499. DOI: 10.5194/tc-7-499-2013.
7. P. Fretwell, H.D. Pritchard, D.G. Vaughan, J.L. Bamber, N.E. Barrand, R. Bell, C. Bianchi, R.G. Bingham, D.D. Blankenship, G. Casassa, G. Catania, D. Callens, H. Conway, A.J. Cook, H.F.J. Corr, D. Damaske, V. Damm, F. Ferraccioli, R. Forsberg, S. Fujita, Y. Gim, P. Gogineni, J.A. Griggs, R.C.A. Hindmarsh, P. Holmlund, J.W. Holt, R.W. Jacobel, A. Jenkins, W. Jokat, T. Jordan, E.C. King, J. Kohler, W. Krabill, M. Riger-Kusk, K.A. Langley, G. Leitchenkov, C. Leuschen, B.P. Luyendyk, K. Matsuoka, J. Mouginot, F.O. Nitsche, Y. Nogi, O.A. Nost, S.V. Popov, E. Rignot, D.M. Rippin, A. Rivera, J. Roberts, N. Ross, M.J. Siegert, A.M. Smith, D. Steinhage, M. Studinger, B. Sun, B.K. Tinto, B.C. Welch, D. Wilson, D.A. Young, C. Xiangbin, A. Zirizzotti
Cryosph., 2013, 7(1), 375. DOI: 10.5194/tc-7-375-2013.
8. В.М. Котляков
Избранные сочинения в 6 книгах, Книга 1. Гляциология Антарктиды, Москва, Наука, 2000, 432 с.
9. J.K. Hall
Mar. Geophys. Res., 2006, 27(1), 1. DOI: 10.1007/s11001-006-8181-4.
10. С.В. Попов
В Сб. Геоморфология и картография: материалы XXXIII Пленума геоморфологической комиссии РАН, (Саратов, 17–20 сентября, 2013), Саратов, Изд. СГУ, 2013, с. 230–234.
11. С.В. Попов, Ю.Б. Черноглазов
Лед и снег, 2011, № 1(113), 13.
12. A. Wright, V.J. Siegert
В Antarctic Subglacial Aquatic Environments, Ser. Geophysical Monograph Series, V. 192, Eds M.J. Siegert, M.C. Kennicutt, USA, D.C., Washington, 2011, pp. 9–26. DOI: 10.1002/9781118670354.ch2.
13. *Малый атлас мира*, ред. Н.М. Терехов, Москва, ГУГК, 1981, 147 с.
14. Г.И. Рычагов
Общая геоморфология: Классический университетский учебник, Москва, Наука, 2006, 416 с.
15. И.А. Зотиков
Инф. Бюлл. САЭ, 1961, вып. 28, 16.
16. G. de Q. Robin, C.W.M. Swithinbank, B.M.E. Smith
В Proc. International Symposium on Antarctic Glaciological Exploration (ISAGE) (USA, NH, Hanover, 3–7 September, 1968), Pub. №86 IASH, Ed. A.J. Gow, Belgium, Gentbrugge, International Association of Scientific Hydrology Publ., 1970, pp. 97–102.
17. G.K.A. Oswald
J. Glaciol., 1975, 15(73), 75. DOI: 10.1017/S0022143000034286.
18. G.K.A. Oswald, G. de Q. Robin
Nature, 1973, 245(5423), 251. DOI: 10.1038/245251a0.
19. J.K. Ridley, W. Cudlip, W. Laxon
J. Glaciol., 1993, 39(133), 625. DOI: 10.1017/S002214300001652X.
20. A.P. Kapitsa, J.K. Ridley, G. de Q. Robin, M.J. Siegert, I.A. Zotikov
Nature, 1996, 381(6584), 684. DOI: 10.1038/381684a0.
21. С.В. Попов, В.Н. Масолов, В.В. Лукин
Лед и снег, 2011, № 1(113), 25.
22. Г.Э. Грикуров, Г.Л. Лейченко, Е.В. Михальский, А.В. Гольинский, В.Н. Масолов
Разведка и охрана недр, 2000, № 12, 59.
23. Г.Л. Лейченко, В.Л. Иванов
В 60 лет в Арктике, Антарктике и Мировом океане: Сборник научных трудов, под ред. В.Л. Иванова, Санкт-Петербург, ВНИИОкеангеологии, 2008, 329–338.
24. *BP Statistical Review of World Energy. June 2015*, UK, Pureprint Group Limited, 2015, 48 pp. (<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>).
25. *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century, International Hydrology Series*, Eds I.A. Shiklomanov, J.C. Rodda, UK, Cambridge, Cambridge University Press, 2000, 452 pp.
26. В.И. Данилов-Данильян
Век глобализации, 2008, № 1, 45.

27. P.H. Gleick
Science, 2003, **302**(5650), 1524. DOI: 10.1126/science.1089967.
 28. В.П. Максаковский
 Географическая картина мира: Пособие для вузов в 2 кн.,
 кн. I, Общая характеристика мира, Москва, «Дрофа»,
 2008, 495 с.
 29. Ю.П. Супруненко
 Химия и жизнь, 2006, № 6, 57.

30. P. Wessel, W.H.F. Smith
J. Geophys. Res., 1996, **101**, B4, 8741. DOI: 10.1029/96JB00104.
 31. C. Amante, B.W. Eakins
 ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data
 Sources and Analysis, National Geophysical Data Center, Marine
 Geology and Geophysics Division, USA, CO, Boulder, 2009,
 19 pp. (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/docs/ETOPO1.pdf>).

English

The Icebound World*

Sergey V. Popov

JSC "Polar Marine Geosurvey Expedition"
 24 Pobedy Str., St. Petersburg – Lomonosov, 198412, Russia
 spopov67@yandex.ru

Abstract

Antarctica is a world of endless snow and ice. Rock massifs occupy just a small part of its territory. The most remarkable formations of the continent are the ice shelves; they surround Antarctica almost all around. The Antarctic hydrosphere is completely different from the other continents' hydrospheres. Here there is no a ramified network of sub-ice rivers (at least, not proven its existence), and just 414 supposedly isolated reservoirs are known yet. Lake Vostok is the largest of them. Its dimensions are about 270 × 70 km and water surface area is about 15425 km². Antarctica hides great natural wealth: oil, gas, coal, ores. In addition, its glaciers contain 24.69 mln km³ of clean fresh water. Antarctica is a unique continent. Its exploration continues, and our country has already been taking an active part in these researches for sixty years.

Keywords: Antarctic, subglacial relief, ice sheet, subglacial water body, subglacial Lake Vostok.

*The work was financially supported by RFBR (project 17-15-20053).

Images & Tables

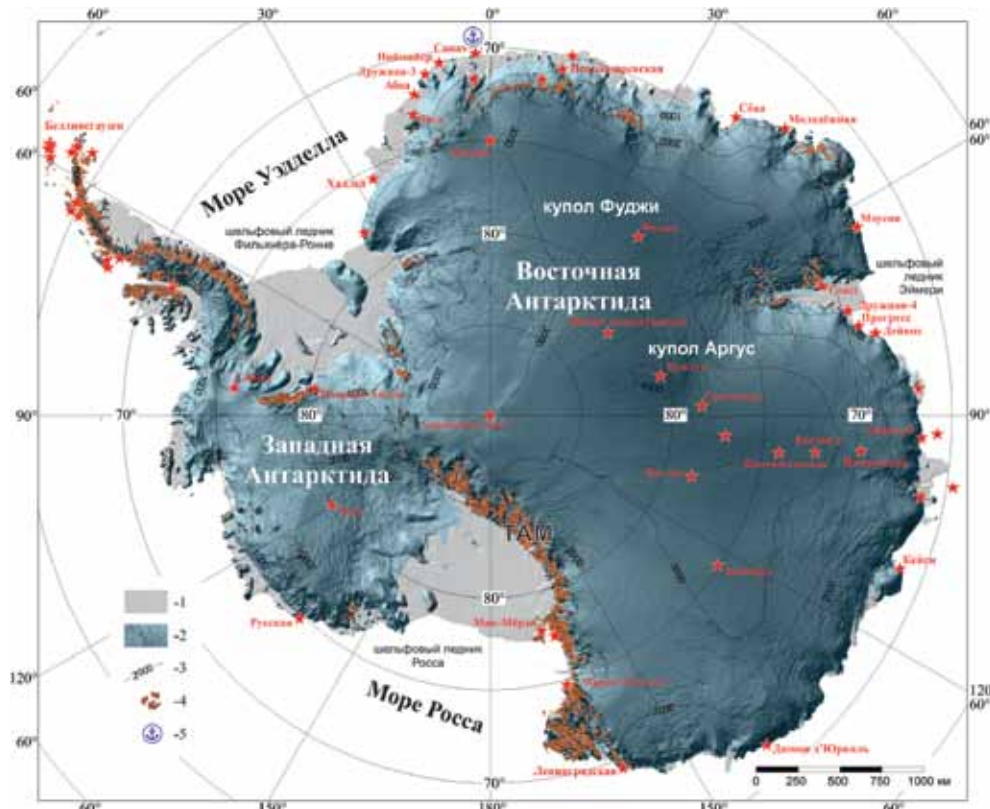


Fig. 1. The Antarctic surface: 1 – ice shelves; 2 – continental and outlets glaciers; 3 – isohypses of the ice surface [3], contour interval is 1000 m; 4 – rock outcrops [4]; 5 – the place where the First Russian Antarctic Expedition reached Antarctica [2, 5].

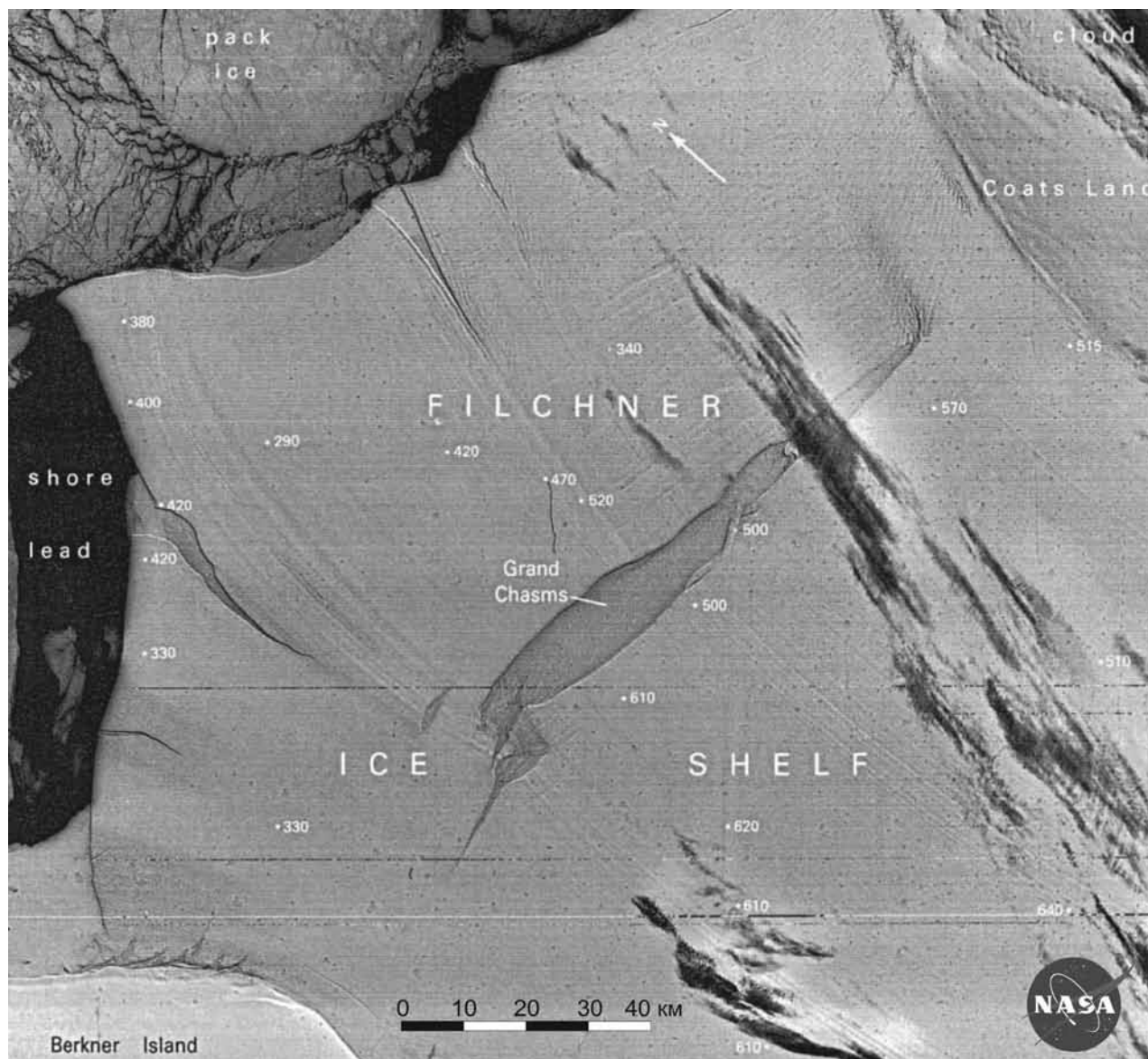


Fig. 2. Satellite image taken in November 11, 1973, in the area of Filchner-Ronne Ice Shelf ([1], with some changes).



Fig. 3. Return of the scientific traverse from Vostok to Mirny station: a – the 2003/04 summer field season; b – the 2005/06 summer field season. The author's picture.

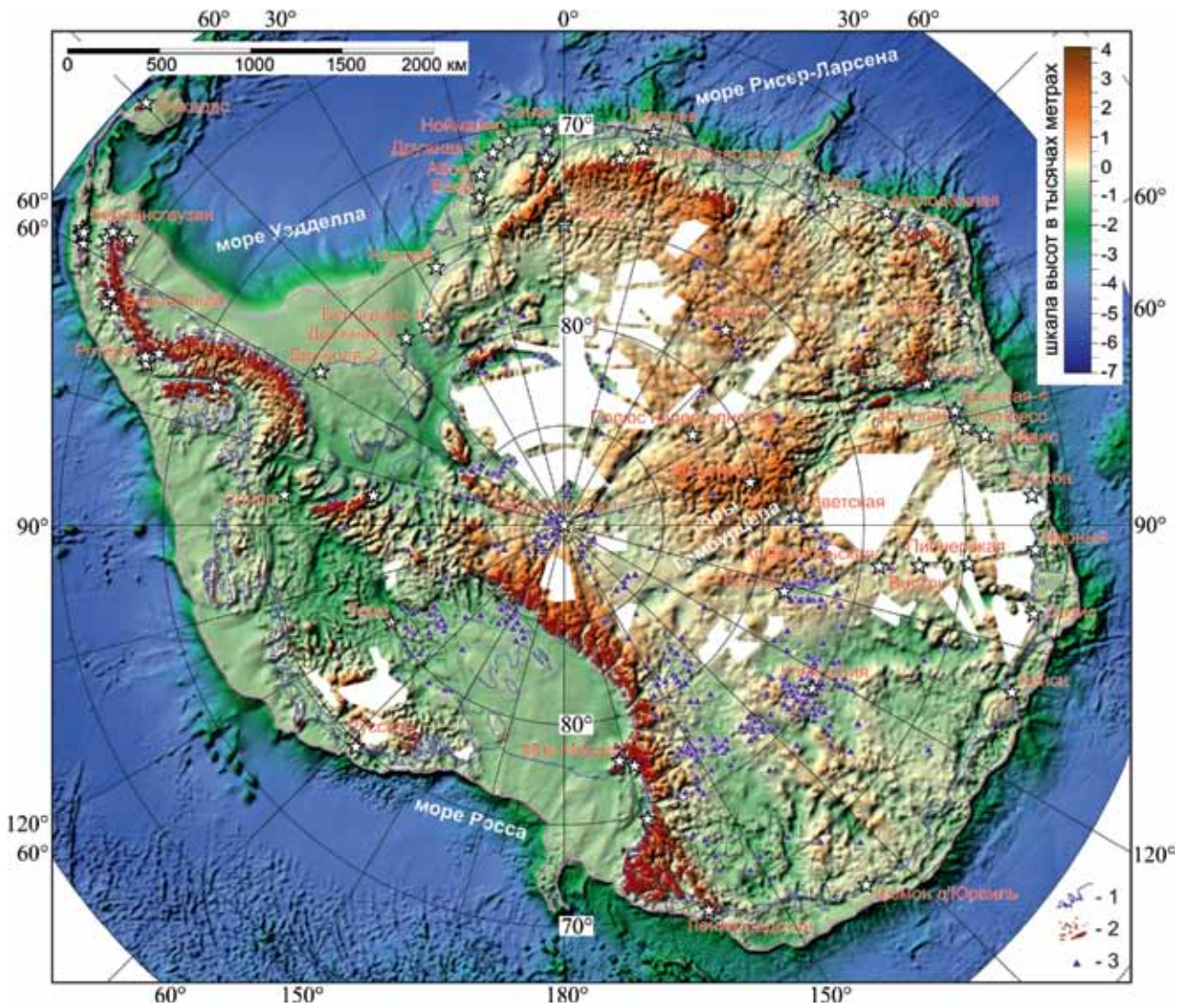


Fig. 4. Bedrock topography of Antarctica [10]: 1 – ice front and grounding line [4]; 2 – rock outcrops [4]; 3 – subglacial water bodies [11, 12].

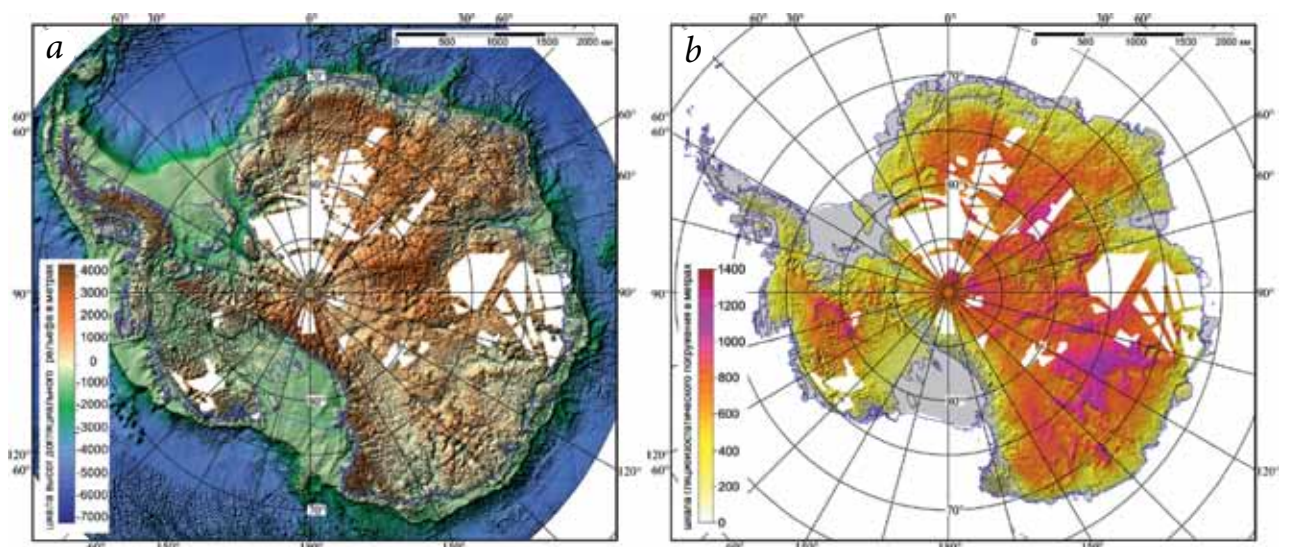


Fig. 5. Hypothetical pre-glacial relief of Antarctica (a) and the supposed value of the continent glacioisostatic deflection (b). Blue line shows the modern coastline (the ice-front) of Antarctica [4].



Fig. 6. Scheme of flood-prone territories of Eastern Europe, the European part of Russia and a part of Western Siberia. Present-day ice front is depicted by blue line [30], the flooding area is shown in cyan. State borders are shown in red. The topographic data are taken from the ETOPO1 scientific project [31].

References

1. C. Swithinbank
Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: Antarctica, United States Geological Survey Professional Paper 1386-B, USA, Washington, D.C., 1988, 290 pp.
2. A.F. Treshnikov
The History of Discovery and Exploration of Antarctica, Ser. "The Discovery of Land: Antarctica" [Istoriya otkrytiya i issledovaniya Antarktidi], RF, Moscow, Geografiz, 1963, 431 pp. (in Russian).
3. J.L. Bamber, J.L. Gomez-Dans, J.A. Griggs
Cryosph., 2009, 3(1), 101. DOI: 10.5194/tc-3-101-2009.
4. Scientific Committee on Antarctic Research Antarctic Digital Database (SCAR ADD), UK, Cambridge, British Antarctic Survey (<http://www.add.scar.org/>).
5. M.P. Lazarev. *Dokumenty in 3 Vols, Ser. Russian Naval Commanders. Materials for the Russian Fleet History [M.P. Lazarev. Dokumenty v 3 tt., Ser. Russkie flotovodtsy. Materialy dlya istorii russkogo flota]*, Ed. A.A. Samarov, RF, Moscow: Naval Publishing House of the Naval Ministry of the USSR, 1952, 524 pp.
6. J.L. Bamber, J.A. Griggs, R.T.W.L. Hurkmans, J.A. Dowdeswell, S.P. Gogineni, I. Howat, J. Mouginot, J. Paden, S. Palmer, E. Rignot, D. Steinhage
Cryosph., 2013, 7(2), 499. DOI: 10.5194/tc-7-499-2013.
7. P. Fretwell, H.D. Pritchard, D.G. Vaughan, J.L. Bamber, N.E. Barrand, R. Bell, C. Bianchi, R.G. Bingham, D.D. Blankenship, G. Casassa, G. Catania, D. Callens, H. Conway, A.J. Cook, H.F.J. Corr, D. Damaske, V. Damm, F. Ferraccioli, R. Forsberg, S. Fujita, Y. Gim, P. Gogineni, J.A. Griggs, R.C.A. Hindmarsh, P. Holmlund, J.W. Holt, R.W. Jacobel, A. Jenkins, W. Jokar, T. Jordan, E.C. King, J. Kohler, W. Krabill, M. Riger-Kusk, K.A. Langley, G. Leitchenkov, C. Leuschen, B.P. Luyendyk, K. Matsuoka, J. Mouginot, F.O. Nitsche, Y. Nogi, O.A. Nost, S.V. Popov, E. Rignot, D.M. Rippin, A. Rivera, J. Roberts, N. Ross, M.J. Siegert, A.M. Smith, D. Steinhage, M. Studinger, B. Sun, B.K. Tinto, B.C. Welch, D. Wilson, D.A. Young, C. Xiangbin, A. Zirizzotti
Cryosph., 2013, 7(1), 375. DOI: 10.5194/tc-7-375-2013.
8. V.M. Kotlyakov
Selected Works in 6 Vols, Vol. 1. Glaciology of Antarctica [Izbrannye sochineniya v 6 knigah. Kniga 1. Glyatsiologiya Antarktidi], RF, Moscow, Nauka, 2000, 432 pp. (in Russian).
9. J.K. Hall
Mar. Geophys. Res., 2006, 27(1), 1. DOI: 10.1007/s11001-006-8181-4.

10. **S.V. Popov**
In Proc. *Geomorphology and Cartography: Materials of the XXXIII Plenum of the Geomorphological Commission of the RAS [Geomorfologiya i kartografiya: materialy XXXIII Plenuma geomorfologicheskoy komissii RAN]*, (RF, Saratov, 17–20 September, 2013), RF, Saratov, Saratov State University Publ., 2013, pp. 230–234 (in Russian).
11. **S.V. Popov, Yu.B. Chernoglazov**
Ice and Snow [Led i sneg], 2011, №1(113), 13 (in Russian).
12. **A. Wright, V.J. Siegert**
In *Antarctic Subglacial Aquatic Environments, Ser. Geophysical Monograph Series*, V. 192, Eds M.J. Siegert, M.C. Kennicutt, USA, D.C., Washington, 2011, pp. 9–26.
DOI: 10.1002/9781118670354.ch2.
13. *The Small Atlas of the World [Malyy atlas mira]*, Ed. N.M. Terekhov, RF, Moscow, GUGK Publ., 1981, 147 pp. (in Russian).
14. **G.I. Rychagov**
General Geomorphology: Classical University Textbook [Obshchaya geomorfologiya], RF, Moscow, Nauka, 2006, 416 pp. (in Russian).
15. **I.A. Zotikov**
SAE Reports [Inf. Bull. SAE], 1961, 28, 16 (in Russian).
16. **G. de Q. Robin, C.W.M. Swithinbank, B.M.E. Smith**
In Proc. *International Symposium on Antarctic Glaciological Exploration (ISAGE) (USA, NH, Hanover, 3–7 September, 1968)*, Pub. №86 IASH, Ed. A.J. Gow, Belgium, Gentbrugge, International Association of Scientific Hydrology Publ., 1970, pp. 97–102.
17. **G.K.A. Oswald**
J. Glaciol., 1975, 15(73), 75. DOI: 10.1017/S0022143000034286.
18. **G.K.A. Oswald, G. de Q. Robin**
Nature, 1973, 245(5423), 251. DOI: 10.1038/245251a0.
19. **J.K. Ridley, W. Cudlip, W. Laxon**
J. Glaciol., 1993, 39(133), 625.
DOI: 10.1017/S002214300001652X.
20. **A.P. Kapitsa, J.K. Ridley, G. de Q. Robin, M.J. Siegert, I.A. Zotikov**
Nature, 1996, 381(6584), 684. DOI:10.1038/381684a0.
21. **S.V. Popov, V.N. Masolov, V.V. Lukin**
Ice and Snow [Led i sneg], 2011, №1(113), 25 (in Russian).
22. **G.E. Griukov, G.L. Leitchenkov, E.V. Michalsky, A.V. Golynsky, V.N. Masolov**
Prospect and Protection of Mineral Resources J. [Razvedka i ochrana nedr], 2000, №12, 59 (in Russian).
23. **G.L. Leichenkov, V.L. Ivanov**
In *60 years in the Arctic, Antarctica and the World Ocean: Collection of scientific papers [60 let v Arktike, Antarktike i Mirovom Okeane: Sbornik nauchnyh trudov]*, Ed. V.L. Ivanov, RF, St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya, 2008, pp. 329–338 (in Russian).
24. *BP Statistical Review of World Energy. June 2015*, UK, Pureprint Group Limited, 2015, 48 pp. (<https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/statistical-review-2015/bp-statistical-review-of-world-energy-2015-full-report.pdf>).
25. *World Water Resources at the Beginning of the Twenty-First Century, International Hydrology Series*, Eds I.A. Shiklomanov, J.C. Rodda, UK, Cambridge, Cambridge University Press, 2000, 452 pp.
26. **V.I. Danilov-Danilyan**
Age of Globalization: J. Global Studies, 2008, №1, 45 (in Russian).
27. **P.H. Gleick**
Science, 2003, 302(5650), 1524. DOI: 10.1126/science.1089967.
28. **V.P. Maksakovskiy**
Geographical image of the world: A manual for universities in 2 Vols, Vol. I, General characteristics of the world [Geograficheskaya kartina mira: Posobie dlya vuzov v 2 kn., kniga I: Obshchaya harakteristika mira], Moscow, Drofa Publ., 2008, 495 pp. (in Russian).
29. **Yu.P. Suprunenko**
Chemistry and Life [Chimiya i Zhizn], 2006, №6, 57 (in Russian).
30. **P. Wessel, W.H.F. Smith**
J. Geophys. Res., 1996, 101, B4, 8741. DOI: 10.1029/96JB00104.
31. **C. Amante, B.W. Eakins**
ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis, National Geophysical Data Center, Marine Geology and Geophysics Division, USA, CO, Boulder, 2009, 19 pp. (<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/relief/ETOPO1/docs/ETOPO1.pdf>).

Познание реальности или ее конструирование?*

В.Ф. Петренко, А.П. Супрун

В статье ставится проблема онтологии бытия. Рассматриваются различные взгляды на реальность: от трактовки епископа Беркли, утверждавшего, что «существовать – значит быть наблюдаемым», до дискуссии Н. Бора и А. Эйнштейна о независимости или зависимости физической реальности от наблюдателя, а также попытки решения этого вопроса в современной квантовой физике. Следом за Р. Пенроузом и И. фон Нейманом утверждается, что редукция волновой функции требует участия сознания наблюдателя, а методологические проблемы физики требуют для своего решения взаимодействия с психологией. Соотнести методологические принципы квантовой физики и теории коллективного бессознательного пытались в свое время физик, лауреат нобелевской премии В. Паули и психолог К. Юнг. В данной статье с позиции психосемантики сознания и бессознательного обсуждаются проблемы познания реальности.

Ключевые слова: реальность, квантовая физика, время, пространство, редукция волновой функции, сознание, бессознательное.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-16-20010).

«Esse est percipi»

(Существовать – значит быть воспринятым)

Дж. Беркли

Развитие современной физики впервые позволило задавать природе экспериментально строгие вопросы методологического характера и получать надежные логические следствия, недостижимые в других отраслях знания. И если раньше можно было формально разделять физическую и психическую реальность, придерживаясь «принципа параллелизма», то теперь эта возможность катастрофически исчезает. Игнорировать эти логические следствия теперь не может ни одна дисциплина, в том числе и психология, если она действительно строит непротиворечивую научную теорию сознания и психической реальности, а не что-то эфемерно мифологическое, полностью изолированное от других наук.

В обыденном сознании проблемы существования «объективной действительности» не возникает. Достаточно открыть глаза, и мы увидим мир «таким, какой он есть». Можно, закрыв глаза, пощупать объекты, понюхать их, лизнуть, и, несмотря на разные модальности органов, скоординировано воспринять наблюдаемый объект для разных органов чувств, с разной точностью определив его лока-

лизацию, примерные размеры, твердость, тяжесть и т.п. Но, уходя от «наивного реализма», еще Д. Локк в XVII в. [1] выделил первичные, т.е. независимые от наблюдателя качества, и вторичные, обусловленные спецификой наших органов чувств. Например, цвет объекта хотя и определен для человеческого зрения длиной электромагнитной волны, но в ней самой нет такой психологической характеристики, как цвет. Аналогично, в физической реальности нет ни запахов, ни вкуса объектов, хотя они и связаны со спецификой наших органов чувств, которые помогают биологическому организму выжить в среде обитания. Наличие таких «вторичных качеств» и подвигло епископа Д. Беркли [2] использовать их в качестве доказательства «бытия божьего», ибо именно Бог наблюдает все



ПЕТРЕНКО

Виктор Федорович
член-корреспондент РАН,
профессор,
Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова



СУПРУН

Анатолий Петрович
Институт системного анализа
ФИЦ «Информатика
и управление» РАН

многообразии и многоцветности мира, когда человек спит. Иначе, по мысли Беркли, множество вторичных качеств исчезало бы с отсутствием наблюдателя. В дальнейшем круг первичных качеств все более сужался. Например, согласно современной физике тяжесть не является свойством самого объекта, а зависит от гравитационного взаимодействия двух тел; невесомость космонавта на околоземной орбите представляет собой его свободное падение. Т. Гоббс [3] выделял в качестве первичных качеств только пространственно-временные: протяженность и движение. Так или иначе, но у Р. Декарта [4] остались лишь два базовых первичных качества: пространственная и временная координаты объекта, а И. Кант [5] объявил и этот последний бастион объективности – пространство и время – не объективными качествами, а категориями (интуициями) сознания. Для крупнейшего теологического и философского авторитета своего, да и нынешнего времени, епископа Беркли все физические качества являются вторичными и, пользуясь современной психоаналитической терминологией, выступают проекциями божественного сознания. Беркли принадлежит крылатое высказывание: «Существовать – значит быть воспринимаемым», вводящее в качестве необходимого компонента божественного наблюдателя. Материалистическая философия делает акцент на существовании объективной реальности независимо от присутствия/отсутствия наблюдателя [6–8]. Хотя в современной философии оппозиция материализм/идеализм постепенно становится анахронизмом и уже трудно обнаружить однозначно материалистическую позицию, в психологической науке большинство ученых не сомневаются в существовании объективной действительности («того, что есть на самом деле», как сформулировал известный психолог В.М. Аллах-

вердов [9] в дискуссии с одним из авторов данной статьи [10]).

В качестве аргумента спора об онтологии реальности можно обратиться к квантовой физике, дающей возможность четко сформулировать и операционально проверить те или иные гипотезы об участии субъекта в построении физической реальности. Так, своеобразный возврат к Дж. Беркли можно увидеть во взглядах известного физика Р. Пенроуза [11] и отечественного физика М.Б. Менского [12], утверждающих, что в феномене редукции волновой функции необходимо присутствует сознание.

По мнению лидера отечественной философии В.С. Степина, общие принципы познания естественных и гуманитарных наук едины [13], и современная физика привлекает внимание философов, психологов прежде всего тем, что в ней наиболее остро поставлены вопросы о том, чем же является та самая реальность, в которой мы существуем? При этом каждый этап становления квантовой физики вновь и вновь возвращает историков философии физики к началу прошлого века, когда проходили споры и жаркие «битвы за реальность» между сторонниками классического и квантового понимания мира. «Оказалось, что предложить интерпретацию – гораздо более сложная задача, чем просто вывести уравнения», – заявил П. Дирак пятьдесят лет спустя после Сольвеевского конгресса 1927 г. [14, с. 52], на котором был сформулирован своеобразный «символ веры» – так называемая копенгагенская интерпретация квантовой механики, о которой пойдет речь ниже.

Создание квантового компьютера и эксперименты по квантовой телепортации вновь привлекли внимание к старым нерешенным проблемам начала прошлого века. С 1990 г. в Соединенных Штатах постоянно проводятся конференции, посвященные логическим и техническим особенностям физических экспериментов, затрагивающим основы нашего миропонимания. Организаторы одной из них (1990 г.) подчеркивают, что «квантовая механика возникла и развивалась в русле позитивистской концепции не как наука об описании реальности, а как описание результатов наблюдений, поскольку Бор фактически зафиксировал этот статус квантовой теории» [15], хотя далеко не все физики были согласны с этим. Нерешенные проблемы, поставленные на Сольвеевском конгрессе 1927 г., до сих пор актуальны и не позволяют рассматривать его только в историческом плане. Для нас представляют интерес основные позиции физиков в этом затянувшемся споре в плане анализа возможных вариантов выхода из кризиса. Существуют ли иные интер-

претации реальности, не затронутые оппонентами, и какие психологические установки ограничивают нам выбор этих возможностей?

Идеологами двух различных подходов к реальности являются Н. Бор и А. Эйнштейн. Хотя номинально победа в этом противостоянии осталась за Бором, предложившим так называемую копенгагенскую трактовку квантовой механики, основанную на принципе дополнительности, но и тогда и сейчас многие считают ее скорее компромиссной мерой, чем окончательным решением проблемы. Об этом, в частности, свидетельствует социологический опрос, проведенный в июле 1999 г. во время конференции по квантовой физике в Кембриджском университете, который выявил отношение нового поколения ученых к вопросу об интерпретации квантовой механики. Из девяноста опрошенных всего четверо проголосовали за копенгагенскую интерпретацию, тридцать – высказались за версию многомировой теории Эверетта [16, 17], а пятьдесят – поставили галочку в клетке: «Ни одна из перечисленных / Еще не решил» [18].

Все большее число исследователей считает, что истину следует искать на более глубоком уровне, чем сама квантовая механика. Нобелевский лауреат М. Гелл-Манн вообще считает, что Нильс Бор попросту «промыл мозги» целому поколению физиков, заставив их поверить, что проблема решена» [19]. «Теория, ответом которой являются слова «может быть», – говорит лауреат Нобелевской премии физик-теоретик Г. Хоофт, – должна восприниматься как неточная» [20]. Он верит, что Вселенная детерминирована, и занят поисками фундаментальной теории, которая объяснила бы все странные, противоречащие интуиции особенности квантовой механики. Есть и другое мнение: «Не ошибусь, если скажу, что квантовую механику не понимает никто», – заявил Р. Фейнман [21], американский физик, получивший Нобелевскую премию в 1965 г. – через десять лет после смерти А. Эйнштейна, когда за копенгагенской интерпретацией закрепилась репутация ортодоксальной теории, и большинство физиков просто следовали совету Фейнмана: «Если можете, перестаньте мучить себя вопросом, как такое может быть? Этого не знает никто» [21].

Мировоззрение Эйнштейна зиждилось на его непоколебимой вере в реальность, существующую «вне» и «независимо» от нас. Реальность, которую представлял себе А. Эйнштейн, должна быть локальной и управляться законами, согласующимися с принципом причинности. Готов ли был он хоть чем-нибудь из этого пожертвовать? Многие считали, что А. Эйнштейн просто не мог изменить свою позицию, так как всю жизнь занимался исследо-

ванием объективного мира физических процессов, происходящих независимо от нас в пространстве и времени и подчиняющихся строгим законам. Не надо удивляться, говорил Гейзенберг, что А. Эйнштейн не считал возможным принять теорию, утверждающую, что на атомном уровне «этот объективный мир пространства и времени просто не существует» [22, 24, с. 80–81]. Отметим, что «цена вопроса» – вещь довольно любопытная в том плане, что позволяет проследить, до какой черты в своих логических рассуждениях могли доходить сторонники Эйнштейна и Бора при обсуждении проблем реальности и где была та граница, которую они избегали переступить, несмотря на все призывы Бора к созданию по-настоящему «безумной теории». Базовыми категориями наших представлений о мире являются: сознание, пространство и время. Они лежат в основании всех научных концепций, и именно они в настоящее время привели к наиболее серьезным противоречиям в современной физике. Посмотрим, как эти понятия рассматривались и оценивались оппонентами спора о реальности: чем можно было пожертвовать, а что следовало сохранить любой ценой.

Первое, что квантовая механика поставила под сомнение, – это *непрерывность* движения в пространстве и времени. Сама по себе непрерывность – понятие странное и противоречивое, приводящее к континууму и другим странностям в математике. Впервые, по видимому, внимание на это обратил античный философ Зенон в своих знаменитых апориях «Дихотомия», «Летящая стрела», «Геркулес и черепаха» и др. Так что пожертвовать непрерывностью отчасти было бы даже полезно, но тогда допускались бы скорости, превышающие скорость света, а это было уже чуждо не только для Эйнштейна. В свое время Э. Шредингер предпринял героические усилия, созда-

вая «волновую механику», чтобы сохранить непрерывность. Его уравнения действительно описывали все, что мы могли знать о квантовой системе в виде так называемой пси-функции. Однако она сообщала нам не сам исход опыта, а только вероятности возможных результатов. Реальный исход измерения определялся не самой теорией, а фактором *наблюдения*, в результате которого происходила «редукция» волновой пси-функции от множества возможных значений к единственному. Но волны, описываемые уравнением Шредингера, принадлежали не физическому трехмерному, а абстрактному многомерному пространству, и не могли быть реальными физическими волнами, с помощью которых Шредингер надеялся избавиться от квантовых скачков.

Согласно М. Борну уравнение Шредингера описывает волны вероятности. «Исходя из нашего понимания квантовой механики, не существует величины, которая в соответствии с принципом причинности определяет результат отдельного столкновения», – пишет М. Борн [23] и признается: «Я сам склонен *отказаться от детерминизма в квантовом мире*» [23], хотя «движение частиц определяется вероятностными законами, *распространение самой вероятности подчиняется принципу причинности*» (курсив наш) [14, с. 39]. Тогда возникает вопрос: почему бы не признать именно этот детерминированный «мир вероятностей» первичной реальностью? Но, как мы видим, легче было отказаться от детерминизма, чем от физического «мира частиц». Ситуацию осложняло то, что вероятность была мерой *возможности*, которая является категорией *будущего*, а «истинная» реальность, согласно общему предубеждению, должна существовать в *настоящем*. С «возможностью» вообще было много проблем: раз ее можно было «измерять» вероятностью, то она должна существовать

как-то и в *настоящем*. В математике вероятность признали только после того, как А.Н. Колмогоров предложил определять ее как абстрактную меру в вероятностном пространстве. Кроме того, в модели Колмогорова вводятся понятие «событий» и алгебра операций над ними, которой изоморфна алгебра множеств. Но в квантовой логике иная алгебра событий, она подчиняется иной аксиоматике (такие алгебры изучались И.М. Гельфандом), а «квантовая вероятность» строится отлично от классической.

Отметим, что с точки зрения психофизиологии *содержание нашего сознания принадлежит прошлому* уже вследствие задержек, связанных с переработкой нервных сигналов. Поэтому то, что для «физической» реальности является *настоящим*, для нашего сознания является *будущим*. Следует отметить, что первым, кто открыто выступил против причинности как главного постулата классической физики, был Гейзенберг: «В строгой формулировке принципа причинности (если мы точно знаем настоящее, мы можем предсказать будущее) уже кроется недостаток: это не утверждение, которое можно вывести, а только предположение. Мы не можем знать настоящее во всех деталях» [25, с. 83]. Как мы видим, причинность здесь увязывается с тем, что настоящее реальности не может быть *осмыслено во всей своей полноте* в нашем сознании, а не с тем, что *настоящее в физическом представлении* вообще лишено смысла, поскольку представлено точкой (мгновением), в котором отсутствует какое-либо содержание, поскольку отсутствуют процессы, в которых оно только и может быть выражено в пространстве–времени. Таким образом, причинность также становится разменной монетой в вопросах «объектной» интерпретации физической реальности.

Чтобы понять логические предпосылки позитивизма, вернемся к началу становления квантовой теории. В 1927 г. Гейзенберг показал, что если Δp и Δx – «неточности» или «неопределенности» импульса (p) и координаты (x), то Δp , помноженное на Δx , всегда больше или равно некоторой константы \hbar (постоянная Планка). Эта формула является выражением принципа неопределенности или «неточности знания при одновременном измерении» координаты и импульса. Гейзенберг обнаружил еще одно «соотношение неопределенности», в которое входит другая пара так называемых сопряженных координат: энергия и время. Если ΔE и Δt – неопределенности, с точностью до которых могут быть измерены энергия системы E и время t , за которое происходит измерение, то $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ [25, с. 172–198]. Бор увидел в этих соотношениях подтверждение своих идей о корпускулярно-волновом дуализ-

ме, выражающемся в формулах Планка $E = \hbar\nu$ и де Бройля $p = \hbar/\lambda$, поскольку энергия и импульс – это понятия, которые обычно ассоциируются с частицами, а частота (ν) и длина волны (λ) – характеристики волн. Каждое из этих уравнений содержит одну величину, характеризующую частицу, и одну характеристику волны. Бор пытался понять, что стоит за объединением частиц и волн в одном уравнении, ведь частицы и волны – абсолютно разные физические сущности. Это навело его на мысль, что принцип неопределенности показывает, до какой степени два дополняющих друг друга, но взаимоисключающих классических понятия (либо частица и волна, либо импульс и координата) могут, не приводя к противоречиям, использоваться в квантовом мире одновременно.

Соотношения неопределенности также подразумевают, что необходимо сделать выбор, какое из описаний использовать: то, которое Бор называл «причинным», основанном на законах сохранения энергии и импульса (E и p), или пространственно-временное описание (p и x). Эти два взаимоисключающих, но дополняющих друг друга описания позволяют объяснить результаты всех возможных экспериментов. В итоге Бор приходит к выводу, что до тех пор, пока не выполнено наблюдение (или «измерение»), микроскопический физический объект, например электрон, не существует вообще нигде. Между двумя измерениями он «существует» только в смысле абстрактных возможностей волновой функции. Только когда выполнено наблюдение или измерение, «коллапс волновой функции» приводит к тому, что одно из «возможных» состояний электрона становится «актуальным», а вероятность реализации остальных возможных состояний обращается в нуль.

Отметим, что более правильным было бы утверждение, что до наблюдения объект не присутствует в нашем сознании, ведь физики настаивают на объективном существовании реальности именно за пределами сознания, а потому не следует смешивать реальность досознательную и ее репрезентацию в сознании. Реальность настоящего и ее репрезентация в объектной пространственно-временной форме – это все-таки не одно и то же. И вместо того, чтобы осмыслить эти отношения между сознанием и реальностью досознательной, Бор заявил: «Квантового мира нет. Есть только абстрактное квантово-механическое описание» [26, с. 305]. Удивительно, что физики, моделируя реальность, забывают, что фактически они моделируют только ее модель, представленную в сознании. Эволюция не гарантировала нам, что эта модель полноценна, поскольку механизмы репрезентации реальности в со-

знании вырабатывались прежде всего для успешности биологического выживания *Homo sapiens*, а потому отображали мир «классических объектов» (мамонтов, например), а не мир элементарных частиц.

В соответствии с копенгагенской интерпретацией частицы не обладают независимой реальностью: когда над ними не ведется наблюдение, свойств у них нет. Позднее эту точку зрения изложил американский физик Д.А. Уилер: «Ни одно элементарное явление не является явлением реальным, пока оно не становится явлением наблюдаемым», а П. Иордан довел до логического конца копенгагенское отрицание независимой от наблюдателя реальности: «Мы сами производим результат наблюдения» [27, с. 161]. Однако во всех этих высказываниях можно найти немало противоречий. С одной стороны, утверждается отсутствие квантового мира, а с другой – принимается наличие его описания (т.е. описания того, чего нет). Во-вторых, как показал фон Нейман, если раньше, руководствуясь принципом параллелизма, можно было не «заморачиваться» такими понятиями, как сознание, субъект, свобода воли и пр., то в квантовой механике при акте измерения наблюдатель и наблюдаемый объект сливаются в такие тесные «объятия», что невозможно определить, где начинается один и кончается другой [28]. Но, с другой стороны, вся материя состоит из атомов и, значит, подчиняется законам квантовой механики. Поэтому как может наблюдатель или измерительный прибор (если они понимаются как физические объекты) оказаться в привилегированном положении? Предположение копенгагенской интерпретации об априорном существовании классического макромира измерительных устройств и квантового микромира частиц кажется порочным и парадоксальным: электрона нет, но он появляется в акте наблюдения (но,

собственно, чьего?). Естественно, что А. Эйнштейн не мог принять такую трактовку: «Разве Луна существует только тогда, когда мы на нее смотрим?» – вопрошал он А. Пайса [29, с. 42].

Шредингер был не согласен с таким подходом, но в его уравнение, описывающее квантовую реальность как суперпозицию разных возможностей, каждой из которых ставится в соответствие определенная вероятность, акт измерения не входит. В математическом аппарате квантовой механики наблюдателя просто нет. Теория ничего не говорит о коллапсе волновой функции – неожиданном, скачкообразном изменении состояния квантовой системы в процессе измерения, когда та или иная возможность становится «классической» реальностью. Следует отметить, что для актуального существования самой Вселенной копенгагенская интерпретация требует существования наблюдателя *вне Вселенной*, который наблюдал бы это событие подобно Богу, поскольку иначе она *никогда не могла бы появиться* и навсегда осталась бы в состоянии суперпозиции многих возможностей.

Отметим, что, если бы утверждалось, что «мы сами производим объективную реальность как одну из форм репрезентации объективной реальности, то парадоксов не возникало бы вовсе. В этом случае можно говорить не о «скачкообразном изменении состояния квантовой системы в процессе измерения», а о редукции представления «квантовой реальности» в процессе «наблюдения» из досознательной формы в пространственно-временную объектную форму, которую мы и отождествляем с сознанием. Фактически наше сознание – это язык, на котором нам представляется содержание реальности. Никто не может утверждать, что это язык единственный и, тем более, максимально адекватный для полноценного описания реальности. Сколько языков – столько и форм

сознания, и у каждой формы, вероятно, есть свои сильные и слабые стороны. В этом смысле человеческое сознание не уникально, и если кто-то отрицает наличие сознания у животных, то стоит уточнить – «человеческого сознания», поскольку без какой-то формы репрезентации реальности они (животные) просто не смогли бы выжить. В этом смысле разные формы этой репрезентации и есть разные формы сознания. О том, как могли бы воспринимать мир живые существа с иной анатомией и физиологией, писал, например, в своих последних работах выдающийся математик А. Пуанкаре.

Итак, пытаясь справиться с методологическими парадоксами, Бор вводит в физику «квантовый постулат», который *не позволяет при исследовании атомного объекта явно отделить наблюдателя от наблюдаемого явления*. Согласно Бору взаимодействие между тем, что измеряется, и измерительным устройством означает, что «как исследуемому явлению, так и средству наблюдения невозможно приписать самостоятельную понимаемую в обычном смысле физическую реальность» [30]. Но тогда не только «наблюдаемое», но и «наблюдатель» теряет свою реальность, что фактически получило отражение в парадоксе «кота Шредингера», находящегося в состоянии суперпозиции «мертвый – живой». Обычно этот парадокс рассматривается с позиции внешнего наблюдателя, хотя его сознание не находится в состоянии суперпозиции. Согласно интерпретации Бора в состоянии суперпозиции должно быть как раз состояние сознания кота, поскольку именно оно находится в «квантовой перепутанности» с установкой его убийства. Фактически именно этот аспект неявно камуфлируется в парадоксе понятиями «живой» и «мертвый». Экспериментатор в принципе мог бы рискнуть и заменить кота в ящике, чтобы на себе проверить отсутствие суперпозиции своего сознания. Строго говоря, наше окружение, по существу, и есть такой ящик, поскольку все мы «ходим под Богом», и наше существование всегда есть следствие многих причин, с которыми мы тесно «перепутаны». Однако наше сознание всегда «классично».

На предложение Шредингера подумать над новой концепцией, которая пересматривает такие понятия, как пространство, время и причинность, Бор ответил, что не видит необходимости в «новой концепции» квантовой теории, поскольку *старые эмпирические понятия представляются неразрывно связанными с «основами человеческих способностей к визуализации»* [27, с. 266–267]. Таким образом, «классическая реальность», о которой говорит Бор, не существует в отсутствии этих способностей наблюдателя. Но это *реальность, представленная*

в сознании, а отнюдь не реальность «объективного физического мира», за которую боролись его оппоненты. Причем отметим, что наблюдаемый «квантовый объект» и сам наблюдатель не могут быть отнесены одновременно к материальным физическим объектам, поскольку, как отмечалось выше, это не приводит к коллапсу волновой функции (они так и останутся в состоянии суперпозиции). Тем не менее они согласно Бору *взаимодействуют* по каким-то, видимо, *нефизическим* законам? Мы видим, что Бор пожертвовал квантовой реальностью физического объекта, признав его абстракцией, *зависимой от субъекта, который только и способен «проявить» его в обычной «классической» реальности пространства–времени.* Позже ситуация обострилась еще больше.

В 1935 г. А. Эйнштейн вместе с Б. Подольским и Н. Розеном написал статью «Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?» [31], содержащую мысленный эксперимент, который впоследствии был назван парадоксом Эйнштейна–Подольского–Розена (ЭПР) (квантовая телепортация). Предполагая причиной неопределенности то, что измерение одной величины вносит принципиально неустранимые возмущения в состояние и производит искажение значения другой величины, он предложил гипотетический способ, в котором соотношение неопределенностей можно было бы обойти. Вот его суть: если две одинаковые частицы А и В образовались в результате распада третьей частицы С, то в этом случае их суммарный импульс должен быть равен исходному импульсу третьей частицы. Это дает возможность измерить импульс одной частицы (А) и по закону сохранения импульса рассчитать импульс второй частицы (В). Теперь, измерив координату второй частицы, можно получить для этой частицы значения двух неизмеримых одновременно величин, что по законам квантовой механики невозможно (см. выше). Следовательно, можно заключить что соотношение неопределенностей не является абсолютным, а законы квантовой механики являются неполными, либо признать эффект *мгновенного воздействия* первой частицы на вторую¹ в противоречии с принципом причинности, либо отказаться от принципа локальности. Последнее означает, что «перепутанные» пары (А) и (В) всегда связаны друг с другом нефизическим образом вне зависимости от того, где во Вселенной они находятся.

В 1964 г. Д.С. Белл опубликовал свои знаменитые неравенства [32], которые позволяли экспериментально проверить: 1) существует ли независимая

от наблюдателя реальность, например частица, обладающая строго определенными спином еще до того, как это свойство измерено, и 2) сохраняется ли при этом локальность? Последнее означает отсутствие воздействия, которое распространяется быстрее света, а значит, то, что происходит здесь, не может мгновенно подействовать на то, что происходит где-то в другом месте. Когда А. Аспект впервые опубликовал результаты экспериментальной проверки этих неравенств [33], оказалось, что одно из этих предположений должно нарушаться. Белл был готов пожертвовать локальностью: «Хочется реалистически смотреть на мир, рассуждать о мире, считать его реальным, даже если он не наблюдаем», – говорил он [34, с. 50]. Бор, как и многие, воспринял бы результаты Аспекта как поддержку копенгагенской интерпретации. Белл умер в октябре 1990-х от инсульта в возрасте шестидесяти двух лет и до конца верил, что «квантовая теория – только временная уловка», которую в конечном счете заменит лучшая теория. Тем не менее он признавал, что эксперимент указывает на то, что «взгляд Эйнштейна на мир оказался несостоятельным» [34, с. 47]. «Если отбросить предположение о том, что существующее в разных местах пространства обладает независимым, реальным существованием, – писал Эйнштейн М. Бому в 1948 г., – я просто не могу себе представить, что должна описывать физика» [35, с. 162]. Любопытно то, что, идя на такие жертвы, ставя под сомнение пространственную непрерывность, локальность, причинность, независимость реальности от субъекта и др., никто из них так четко и не сформулировал, а *ради чего* они шли на все эти жертвы? Что, собственно, они хотели спасти в этой уже искореженной до неузнаваемости реальности? По-прежнему никто не ставил под сомнение то,

¹ Даже если они разделены космическими расстояниями.

что, описывая репрезентацию реальности в сознании, они описывают непосредственно реальность, а не редуцированное ее представление. Вопрос теперь ставился в плоскости того, насколько полно мы описываем то, что представлено в сознании и насколько язык как вторая сигнальная система вообще подходит для такого описания, забывая, что первая сигнальная система (наши ощущения) – тоже язык описания.

«Основная трудность в том, что физика представляет собой своего рода метафизику, – писал Эйнштейн Шредингеру, – физика описывает реальность, которую мы познаем только с помощью физического описания» [36, с. 304]. Физика есть ни больше ни меньше как «описание реальности», но это описание, указывал Эйнштейн, «может быть полным либо неполным». Вспомним, что в письме к Шредингеру Бор также отмечал, что эмпирические понятия представляются неразрывно связанными с «основами человеческих способностей к визуализации». Таким образом, все они сходятся на том, что физические теории есть знаковые модели того, что представлено в нашем сознании посредством «человеческих способностей к визуализации». Но это представление также является некоторой моделью реальности, причем «отягченной» этими самыми «человеческими способностями», поскольку биологическая эволюция первоначально отработывала явно не квантовую, а упрощенную классическую «визуализацию», ориентированную на выживание нашего вида. А. Пуанкаре в последних работах обращал на это особое внимание и показывал, что пространство, его размерность и метрика существенно определяются не столько физическими принципами, сколько нашей психофизиологией [37]. Фактически само пространство и время есть способ объектной локализованной визуализации реальности, а не фундаментальное ее представление за пределами нашего

сознания. Как представлена реальность за пределами сознания (в бессознательном, как говорят психологи), еще нужно изучать. Во всяком случае, нейробиологические исследования показывают, что «объектная сборка» первичных свойств реализуется в филогенетически более поздних отделах коры больших полушарий, в так называемых вторичных и третичных зонах [38]. Вполне возможно, что описание реальности в бессознательном на языке гильбертова представления (что, по сути, реализуется в квантовой механике) является более адекватным, чем ее «визуализированное» объектное пространственно-временное представление в сознании. Этот квантовый мир бессознательного в силу присущей ему связности (проявляющейся, например, в ЭПР-феноменах), потенциально содержит в себе бесконечное множество возможных структур-гештальтов. Отсюда – творческий характер бессознательного, где виртуально содержатся и интерферируют потенциально возможные творческие формы. С этим, вероятно, и связаны феномены созерцания и медитации. Не является ли классическое объектное пространственно-временное представление реальности лишь одним из возможных и ограниченных его представлений, свойственных именно нашему сознанию?

То, что является нашему сознанию, приходит из бессознательного (поскольку именно оно является логической оппозицией сознанию). Непроницаемость границы этих подсистем со стороны сознания, по-видимому, свидетельствует о принципиально различных формах представления реальности в них и наличии определенной иерархии [39]. Снова возникает вопрос: не являются ли эволюционно сформированные алгоритмы трансляции этих представлений в сознание из досознательных подсистем тем самым механизмом редукции квантовой реальности в классическую? Ведь то, что представлено в сознании, это не сама реальность, а редуцированная этими механизмами досознательная модель. Однонаправленные механизмы этой трансляции и принципиально различные формы досознательных и сознательных представлений не позволяют нам, с одной стороны, преодолеть границу сознания, а с другой – понять с помощью «классического» сознания то, что находится за его границами. Не является ли, по существу, квантовая реальность досознательной формой ее представления, которую неожиданно получили физики в своих теориях? В этом случае следовало бы развести чисто физические проблемы этих теорий и психологические факторы, связанные с трансляцией досознательных представлений в сознательную объектную пространственно-временную форму. Именно она

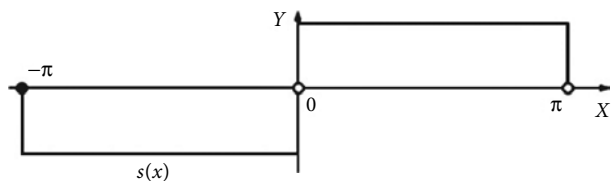


Рис. 1. Прямоугольный импульс.

является причиной основного парадокса современной физики, так называемого корпускулярно-волнового дуализма. Парадоксы квантовой механики явно указывают на неадекватность приписывания реальности объектной пространственно-временной формы. Однако, если считать, что нашему бессознательному непосредственно представлены состояния реальности (естественно, ограниченные нашей «системой референции»), а сознанию транслируются эти состояния в «удобной» объектной пространственно-временной форме, то многие парадоксы исчезают [40, 41]. В бессознательном представлении реальности описывается в гильбертовом пространстве в виде состояний, которые транслируются в сознание в редуцированной пространственно-временной объектной форме. Остановимся на этом подробнее.

Наши ощущения, по сути, являются сигналами (это первая сигнальная система по И.П. Павлову). В общем случае сигналы описываются функциональной зависимостью определенного информационного параметра сигнала от независимой переменной (аргумента) – $s(x)$, $y(t)$ и т.п. Такая форма представления сигналов называется динамической (сигнал в реальной динамике его поведения по аргументам). Кроме привычного динамического представления сигналов и функций в виде зависимости их значений от определенных аргументов при анализе и обработке данных, широко используется математическое описание сигналов по аргументам, обратным аргументам динамического представления. Так, например, для времени обратным аргументом является частота. Возможность такого описания определяется тем, что любой сколь угодно сложный по своей форме сигнал, не имеющий разрывов второго рода (бесконечных значений на интервале своего задания), можно представить в виде суммы более простых сигналов и, в частности, в виде суммы простейших гармонических колебаний, что выполняется посредством преобразования Фурье. Главное условие однозначности и математической идентичности отображения сигналов – ортогональность разложения, чему удовлетворяют целый ряд функций, например Уолша, Бесселя, Хаара, полиномы Чебышева, Лаггера, Лежандра и др.

Формально разложение сигнала на гармонические составляющие описывается функциями зна-

чений амплитуд и начальных фаз колебаний по непрерывному или дискретному аргументу – частоте изменения функций на определенных интервалах аргументов их динамического представления. Совокупность амплитуд гармонических колебаний разложения называют амплитудным спектром сигнала, а совокупность начальных фаз – фазовым спектром. Оба спектра вместе образуют полный частотный спектр сигнала, который однозначно и полностью представляет пространственно-временную форму сигнала, но уже в пространстве Гильберта. Поясним это на упрощенном примере представления прямоугольного импульса в виде ступеньки (рис. 1).

На рисунке 2 представлены последовательно результаты описания данного импульса с помощью одной, двух, трех и четырех гармоник Фурье-разложения. Видно, что последовательное прибавление следующих более высокочастотных гармоник дает все более точное описание нашего сигнала. Для полного описания потребуется бесконечное число гармоник. Заметим, что такое представление сигнала возможно только тогда, когда время уже «закончилось» и нам предоставлена вся временная ось от $-\infty$ до $+\infty$.

Если мы «закрепим» за каждой гармоникой свою ось, вдоль которой будем откладывать величину ее амплитуды в данном разложении, то мы получим разложение нашего сигнала в бесконечномерном пространстве Гильберта в виде вектора с координатами, соответствующими этим амплитудам. Причем это не привычное для нас «физическое» пространство и в нем отсутствует время.

Следует отметить, что гармоника в принципе не представима в динамическом пространстве-времени, поскольку любой ограниченный во времени гармонический процесс гармоникой не является, а представляется бесконечной суммой гармо-

ник. Это легко понять, если представить его как произведение двух функций: гармонической и ступенчатой (рис. 3), разложение которой рассмотрено выше. Представленный в нижней части спектр такого сигнала (обрезанной синусоиды) содержит не одну, а бесконечно много частот.

Фактически пространство Гильберта описывает состояние, которое в пространстве-времени реализуется как процесс. Реальность предстает в нашем сознании в объектной, пространственно-временной форме и разворачивается как процесс в форме ощущений, восприятий, внимания, памяти, мышления и т.д. Переход из бессознательного в сознание связывается с изменением *способа представления реальности*. Эти способы, с одной стороны, должны быть эквивалентными относительно представляемого содержания, а с другой – быть взаимодополнительными в том смысле, что способ представления реальности в области бессознательно принципиально не может быть совместим со способом его представления в сознании. Мы действительно можем найти и проанализировать два типа таких представлений – это представление, в котором содержание представлено симультанно в пространстве состояний как целое (см., например, работу Л.С. Выготского «Мышление и речь» о процессе перевода мысли в речь [42]), и пространственно-временную «редукцию» мысли в одно из возможных речевых выражений. Условно последнее представление можно назвать объектным, поскольку оно дает локализованное пространственно-временное выражение состояния реальности, а второе – субъектным, поскольку отображает целостное невременное состояние субъекта. Отношение сознания и бессознательно поэтически гениально выразил в стихотворении «Художник» А. Блок [43, т. 3., с. 145–146]:

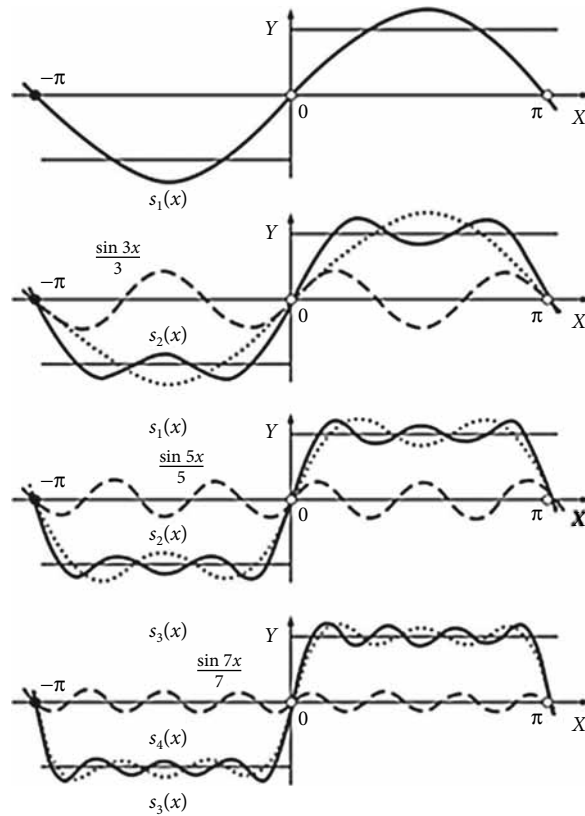


Рис. 2. Представление прямоугольного импульса в виде суммы гармоник.

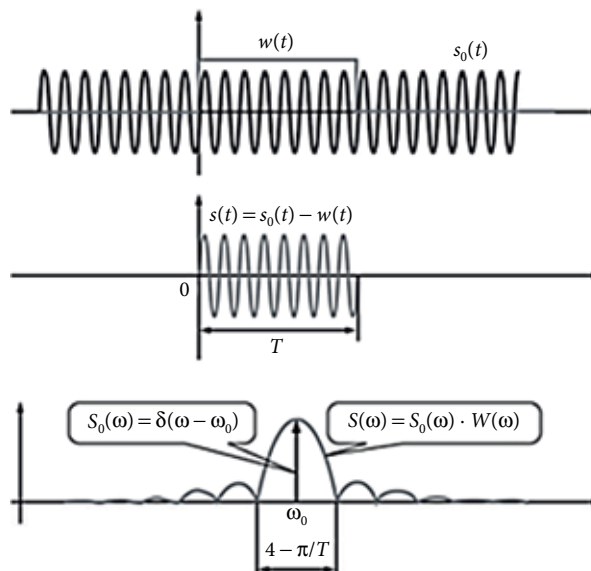


Рис. 3. Фурье-разложение отрезка синусоиды.

*В жаркое лето и в зиму метельную,
В дни ваших свадеб, торжеств, похорон,
Жду, чтоб спугнул мою скуку смертельную
Легкий, доселе не слышанный звон.*

*Вот он – возник. И с холодным вниманием
Жду, чтоб понять, закрепить и убить.
И перед зорким моим ожиданием
Тянет он еле приметную нить.*

.....

*Длятся часы, мировое несущие.
Ширятся звуки, движенья и свет.
Прошлое страстно глядится в грядущее.
Нет настоящего. Жалкого – нет.*

*И, наконец, у предела зачатия
Новой души, неизведанных сил, –
Душу сражает, как громом, проклятие:
Творческий разум осилил – убил.*

*И замыкаю я в клетку холодную
Легкую, добрую птицу свободную,
Птицу, летевишую смерть унести,
Птицу, летевишую душу спасти.*

Проблема отношения бессознательного и сознания в творчестве предстает как отношение свободы, целостного состояния незаданности и многомерности для бессознательного и четкая выверенность значений слов в рамках категориальных структур (клетки) применительно к сознанию. Но не будем умалять роль сознания в явлении творчества миру. Процесс «недоосознания», («недоокольцевания» птицы-творчества) выразил другой гений русской поэзии О. Мандельштам:

*«Но я забыл, что я хочу сказать,
И мысль бесплотная в чертог теней вернется».*

Отсутствие непрерывного времени в пространстве Гильберта не исключает возможности индексации состояний и выстраивании их в некоторую последовательность. В частности, в работе «Гипотеза квантов», как указывает Пуанкаре, утверждение о дискретности множества возможных состояний любой изолированной физической системы применимо и к Вселенной, «следовательно, Вселенная должна скачком переходить из одного состояния в другое, но в промежутках между скачками она остается неизменной, и различные моменты, в течение которых она сохраняет свое состояние, нельзя было бы уже отличить друг от друга; мы приходим, таким образом, к прерывному течению времени, к атомам времени» [37]. Отметим, что время в пространстве состояний «эволюционное», дискретное, в отличие от физического «непрерывного». Первое

устанавливает порядок смены состояний (и содержания реализующихся процессов), а второе – их динамическое представление. У А. Пуанкаре эти понятия не разведены, что порождает физические «кванты времени» и другие парадоксальные вещи. Обычно кванты времени соотносят с планковским масштабом 7.6231×10^{-44} с, хотя сохранение состояния физической системы может быть достаточно продолжительным даже по человеческим меркам. Отметим, что время в уравнениях Шредингера является величиной мнимой, в отличие от ньютоновского действительного времени, и в обычном представлении (на плоскости Аргана) ортогонально классическому.

О том, что наше предположение не противоречит основным законам квантовой механики, свидетельствует следующий факт. В спектральном описании квантовых явлений классическое «текущее» время не имеет смысла, поскольку там весь процесс представлен в виде *состояния*, как единое целое (в нашем представлении должен быть развернут во всем пространстве и времени, так как гармонии не имеют пространственных и временных ограничений). Наше время как изменчивость, видимо, порождается тем, что мы «просматриваем» это представление через временное (или эквивалентное ему – спектральное) окно, т.е. причина – в *оборванном, не доведенном до конца спектральном преобразовании*. Фактически наше восприятие проводит покадровое «оконное» считывание квантового «настоящего», затем «сшивает» кадры в классический «линейный» видеоряд, который постоянно корректируется. Квантовомеханическое соотношение неопределенности $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ в такой интерпретации можно сразу же получить из хорошо известного в спектральной теории соотношения: произведение ширины спектра импульса Δv (спектрального окна) на его длительность Δt есть число

постоянное. Так как энергия в квантовой механике пропорциональна частоте ($E = \hbar\nu$), то отсюда сразу следует искомое соотношение.

Отметим, что парадокс кота Шредингера имеет своеобразное продолжение – «парадокс друга Вигнера», в котором процесс редукции волновой функции рассматривается под другим углом зрения. Предположим, что некто (или конкретно Ю. Вигнер) открывает ящик с котом и, проводя наблюдение, фиксирует, что кот жив. Но означает ли это, что кот будет жив и для его друга, еще не видевшего кота? Если это так, то мы приходим к выводу о том, что в отличие от сознания бессознательное (или какая-то часть его) «индивидуальности» не имеет и через какие-то фильтры, сформированные в процессе эволюции вида, транслирует содержание состояний из гильбертова представления в динамическую пространственно-временную форму «индивидуальных сознаний» (друзей Вигнера), в которых по некоторым правилам строится их объектная визуализация – своеобразная ментальная карта – редуцированный образ реальности. Отметим, что предположение о существовании такого родового, общего для всех бессознательного, выдвигал еще в прошлом веке известный психолог Карл Юнг (определенную роль в этом сыграл и физик В. Паули) [44, 45].

Фактически сейчас мы рассмотрели системный подход к определению реальности, в котором индивидуальное сознание является подсистемой общего бессознательного. В связи с этим возникает вопрос, а возможна ли в принципе реализация квантовой механики на языке теории систем. В этом контексте стоит упомянуть идею, которая была предложена Л. Кране в кон-

тексте фоново-независимых подходов к квантовой гравитации¹. Он предложил не пытаться вставить всю Вселенную в одну квантовую систему по примеру С. Хокинга, Д. Хэртла и других. Вместо этого он предположил, что квантовая механика является не статистическим описанием системы, а записью информации, которую одна подсистема Вселенной может иметь возле другой посредством их взаимодействия, и что имеется квантово-механическое описание, связанное с каждым способом разделения Вселенной на две части. При этом квантовые состояния существуют не в одной или другой части, а *на границе между ними*. Ли Смолин, один из отцов-основателей теории петлевой квантовой гравитации, пишет: «Радикальное предположение Л. Кране с тех пор выросло в класс подходов к квантовой теории, которые называются относительными квантовыми теориями, поскольку они основаны на идее, что квантовая механика описывает взаимоотношения между системами Вселенной. Эта идея была развита К. Ровелли, который показал, что она превосходно согласуется с тем, как мы обычно делаем квантовую теорию. В контексте квантовой гравитации это приводит к новому подходу к квантовой космологии, созданному Ф. Макропоулоу и ее сотрудниками. Ф. Макропоулоу подчеркнула, что описание обмена информацией между различными подсистемами является тем же, что и описание причинной структуры, которая ограничивает, какие системы могут влиять друг на друга. Таким образом, она обнаружила, что Вселенная может описываться как квантовый компьютер с динамически генерируемой логикой. Идея, что Вселенная является разновидностью квантового компьютера, также продвигалась С. Ллойдом из Массачусетского технологического института. С двух сторон, их соответствующих дисциплин Ф. Макропоулоу и С. Ллойд возглавили движение, которое использует идеи теории квантовой информации для изменения концепции Вселенной, приводя к пониманию того, как элементарные частицы могут возникать из квантового пространства-времени» [46]. Как мы видим, системный подход к физической реальности является вполне успешным, хотя установка авторов на сохранение так называемой внешней реальности «по ту сторону ощущений» не позволяет им уйти от рассматриваемых парадоксов.

Таким образом, если не вводить лишних сущностей (согласно максиме Оккамы) в виде «внешне-

¹ К сожалению, данный подход не рассматривает сознание, а пытается построить реальность «по ту сторону сознания», без субъекта и самого сознания, что фактически никак не решает проблему интерпретации реальности, как она была поставлена Эйнштейном и Бором. Фактически в нем только проверяется адекватность иного формального языка описания результатов квантовых экспериментов.

го», независимого от субъекта мира «по ту сторону ощущений», а оставаться в рамках подсистем, связанных с сознанием, то субъектный подход к реальности, не нарушая *принципа объективности*, снимает целый ряд противоречий в физической картине мира и позволяет под иным углом взглянуть на пространство, время и сознание, их структуру и функции. Акцент исследований сознания теперь переносится с неverifiedируемых «трансцендентных» законов «отражения» объектной реальности на вполне верифицируемые способы *трансляции* и формы представления информации из одной подсистемы в другую. Хотя в бесконечности они все равно сходятся (там за горизонтом, на бесконечности, вообще многое сходится), но в любой момент времени они все же различны. Поскольку Универсум теперь мыслится как «актуальная бесконечность», а индивидуальное сознание как «среда свободного становления» (по выражению Г. Вейля), то отношение между ними в какой-то мере напоминают отношения между *классической* математикой, рассматривающей актуальные бесконечные множества, и *интуиционистской*, отвергающей понятие свершившейся или «актуальной бесконечности» и признающей только становление. Правда, становление бесконечное. Индивидуальность, ограниченная конкретным эго, является подсистемой этого пространства состояний, и выбор конкретной возможности сразу приводит к их «редукции» для всех индивидов, являющихся подсистемами данной субъектности. Этот подход позволяет выйти за пределы объектного описания реальности, оставаясь в рамках объективности.

Мы видим, что системный подход к сознанию позволяет естественным путем ввести целостное описание состояния субъекта (независимое от классического времени) и порождаемые ими процессы. Оба эти представления эквивалентны в конечном счете относительно содержания, но различаются по способу представления: состояния описываются в пространстве Гильберта, а процессы представлены в обычном пространстве–времени. Пространственно-временное представление реализуется в первой сигнальной системе в виде психических процессов, а их «свертка» – в виде объектов (коррелятов существенных для индивида свойств), представленных на ментальной карте. Отметим, что «текущее» время на ментальной карте отсутствует, хотя его можно ввести в виде параметра, как это и происходит в физических теориях. Кроме того, определение объекта на ментальной карте реализуется фактически таким же способом из многих возможностей, что и в квантовой физике [47, 48].

Заключение

Согласно постнеклассическим представлениям философии (В.С. Степин, В.А. Лекторский, И.Т. Касавин, Л.А. Микешина) и культурно-исторической теории Л.С. Выготского (А.Н. Леонтьев, А.Р. Лурия, А.Г. Асмолов, В.Ф. Петренко) в психологии в ходе развития науки и эволюции общественного менталитета происходит изменение базовых философских и методологических понятий, таких как «реальность», «пространство» и «время», «детерминизм» и «причинность», «сознание» и «бессознательное», образующих категориальные рамки нашего миропонимания. Возникают методологические пересечения между миропониманием и трактовкой реальности в физике (Н. Бор, В. Гейзенберг, А. Эйнштейн, А. Пуанкаре, В. Паули) и психологии коллективного бессознательного (К. Юнг, В. Паули). В работах Р. Пенроуза и М. Менского обосновывается участие сознания исследователя в редукции волновой функции, показывающее включенность субъекта в построение модели познаваемой реальности. В психологии этот «субъектный подход» развивают представители школы С.Л. Рубинштейна (К.А. Абульханова-Славская, А.В. Брушлинский). Принципиальным для трактовки «реальности» является эмпирическое подтверждение феномена ЭПР, показывающего нелокальность бытия и взаимосвязь его элементов в единой целостной системе отношений. Все это позволило Р. Пенроузу высказать мнение: «Коль скоро квантовая сцепленность не разрушается, мы, строго говоря, не можем полагать отдельным и независимым ни один объект во Вселенной <...> Никто не может по настоящему объяснить, не выходя за рамки стандартной теории... почему нам вовсе не обязательно представлять Вселенную в виде единого целого, этого невероятно сложного спутанного клубка, не имеющего ничего общего с тем классическим по виду миром, который мы в реаль-

ности наблюдаем» [11, с. 464]. Этот своеобразный вариант Всеединства бытия позволяет предположить, что феномены синхронии, предвидения и телепатии имеют основание в физике квантового мира. В психологии этот феномен ЭПР родственен феномену «синхронии» К. Юнга.

В нашей работе мы трактуем сознание как построение модели – категоризацию образа мира, представленного на уровне бессознательного как целостное недискретное психическое (эмоционально-чувственное) состояние, описываемое на языке гильбертовых пространств. Гильбертово пространство в силу бесконечности гармоник, его образующих не описывается на языке категорий пространства и времени (как и волновая функция Шредингера) и содержит безграничный потенциал возможных форм категоризации. Переход к осознанию, определяемый в психологии процессом категоризации (аналог редукции волновой функции в физике) связан с редукцией к одной из форм интерпретации, к одной предметной модели мира в категориях пространства и времени. Восприятие мира

основывается на двух взаимодействующих, но различных формах семантической репрезентации, двух различных «языков» отображения мира, в который погружены живые существа. Язык бессознательного – язык эмоционально-чувственного состояния – переживания, обеспечивает взаимосвязь и единство со всем бытийным миром и является основой для интуитивного мировосприятия и творчества. Язык сознания, опосредованный системой вербальных значений и нормативно заданных перцептивных эталонов, имеет конвенциональный характер, над которым надстраиваются рефлексивные структуры, обеспечивающие проверку логикой. Язык или, точнее, языки сознания имеют уровневую структуру, заданную иерархией и переходом от «мягких» языков искусства, берущих свое начало в бессознательном, до «жестких» (однозначных) языков формально-логических исчислений. И психика человека выступает как открытая система на уровне бессознательного, способная ловить и создавать новые смыслы и как строго формальный «вычислитель», применительно к сознанию на высоких уровнях его реализации. Но великим достоинством человеческой психики является то, что она функционирует в единстве сознания и бессознательного, порождая новые модели мира и новые произведения искусства, что одно без другого не могло бы существовать.

Исследования проводились при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 14-06-00212 и 15-06-01389).

Литература

1. **Г.А. Зинченко**
Филос. науки, 1985, № 4, 98.
2. **П.Л. Блонский**
Проблема реальности у Беркли, Москва, Книжный дом «Либроком», 2009, 160 с.
3. **Ю.П. Михаленко**
Историко-философский ежегодник, 1986, № 1986, 104.
4. **Р. Декарт**
Сочинения в двух томах, т. 1, Москва, Мысль, 1989, 656 с.
5. **И. Кант**
Критика чистого разума, Сер. Гиганты мысли, Москва, Эксмо, 2007, 1120 с.
6. **А.М. Коршунов, В.В. Мантатов**
Диалектика социального познания, Москва, Политиздат, 1988, 384 с.
7. **В.И. Ленин**
Материализм и эмпириокритицизм, Москва, Политиздат, 1969, 579 с.
8. **А.Г. Спиркин**
Основы философии: Уч. пособие для вузов, Москва, Политиздат, 1988, 592 с.
9. **В.М. Аллахвердов**
Психология. Ж. ВШЭ, 2005, 2(1), 44.
10. **В.Ф. Петренко**
Психология. Ж. ВШЭ, 2005, 2(1), 93.
11. **Р. Пенроуз**
Тени разума: в поисках науки о сознании, Москва-Ижевск, Институт компьютерных исследований, 2005, 688 с.
12. **М.Б. Менский**
УФН, 2005, 175(4), 413. DOI: 10.3367/UFNr.0175.200504c.0413.
13. **В.С. Степин**
Теоретическое знание: Структура, историческая эволюция, Москва, Прогресс-Традиция, 2000, 744 с.
14. **A. Pais**
The Genius of Science: A Portrait Gallery of Twentieth Century Physicists, USA, NY, New York, Oxford University Press, 2000, 356 pp.
15. **Д. Гринштейн, А.Г. Зайонц**
Квантовый вызов: Современные исследования оснований квантовой механики, Москва, Интеллект, 2008, 400 с.
16. **H. Everett, III**
Rev. Mod. Phys., 1957, 29(3), 454.
DOI: 10.1103/RevModPhys.29.454.
17. **H. Everett, III**
В The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics, Eds B.S. DeWitt, N. Graham, USA, NJ, Princeton, Princeton University Press, 1973, pp. 1-140.
18. **M. Tegmark, J. Wheeler**
Scientific American, 2001, February, 54.
19. **M. Gell-Mann**
В The Nature of the Physical Universe: 1976 Nobel Conference, Eds D. Huff, O. Prevette, USA, NY, New York, John Wiley and Sons Inc., 1979, 160 pp.
20. **M. Buchanan**
New Scientist, 2007, 196(2628), 36.
DOI: 10.1016/S0262-4079(07)62791-2.

collective unconscious. This article discusses the problems of consciousness and unconscious within the framework of psychosemantics methodology.

Keywords: substantiality, quantum physics, time, space, reduction of the wave function, consciousness, unconscious.

*The work was financially supported by RFBR (project 17-16-20010).

Images & Tables

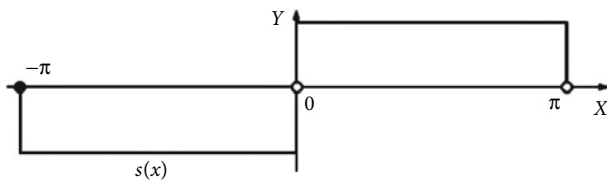


Fig. 1. Rectangular pulse.

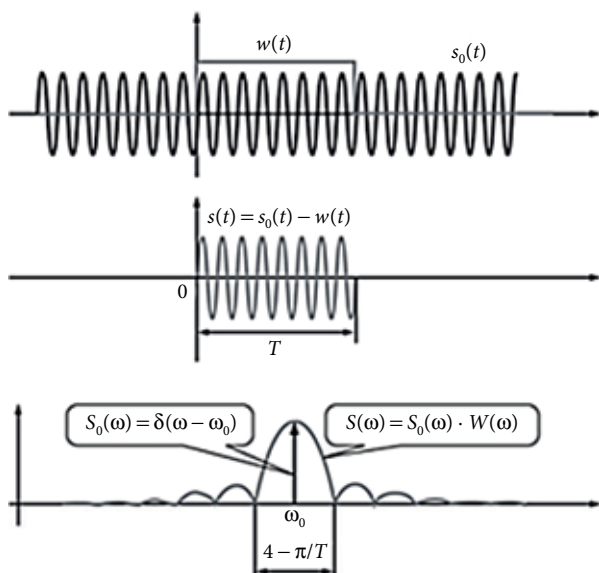


Fig. 3. The Fourier expansion of a sine curve segment.

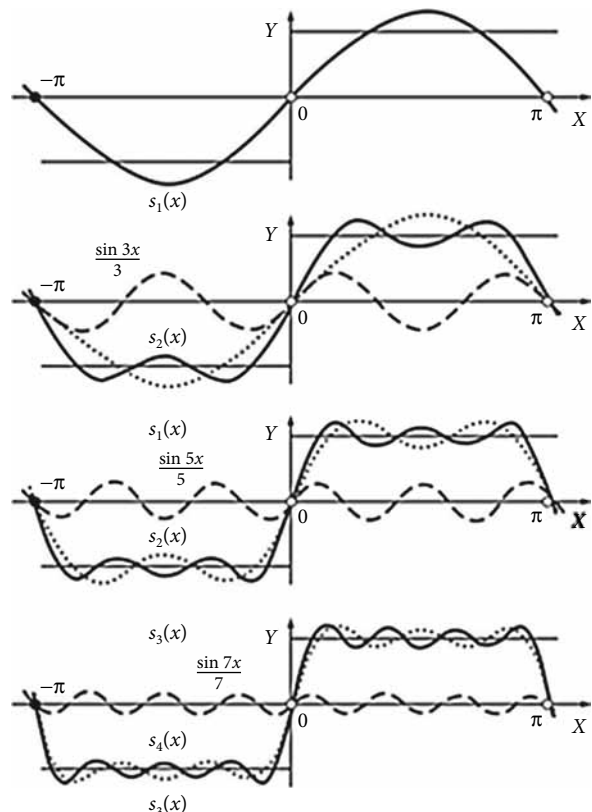


Fig. 2. Representation of a rectangular pulse as a sum of harmonics.

References

1. **G.A. Ztnchenko**
Rus. J. Philos. Sci. [Filosofskie nauki], 1985, № 4, 98 (in Russian).
2. **P.P. Blonskiy**
The Problem of Substantiality in Berkeley's Works [Problema realnosti u Berkli], RF, Moscow, Knizhnyy dom "Librokom", 2009, 160 pp. (in Russian).
3. **Yu.P. Mikhaleiko**
History of Philosophy Yearbook [Istoriko-Filosofskiy Ezhegodnik], 1986, № 1986, 104 (in Russian).
4. **R. Descartes**
Coll. Works in 2 Vols, V. 1, RF, Moscow, Mysl, 1989, 656 pp. (in Russian).
5. **I. Kant**
Kritik der reinen Vernunft, zweite, hin und wieder verbesserte Auflage, Russian Empire, Riga, J.F. Hartknoch Verl., 1781.
6. **A.M. Korshunov, V.V. Mantatov**
Dialectic of Social Cognition [Dialektika socialnogo poznaniya], RF, Moscow, Politizdat, 1988, 384 pp. (in Russian).
7. **V.I. Lenin**
Materialism and Empiriocriticism [Materializm i empiriokrititsizm], Moscow, Politizdat, 1969, 579 pp. (in Russian).
8. **A.G. Spirkin**
Fundamentals of Philosophy: A Textbook for Universities [Osnovy filosofii: Uchebnoe posobie dlya vuzov], Moscow, Politizdat, 1988, 592 pp. (in Russian).
9. **V.M. Allakhverdiv**
Psychology. J. HSE, 2005, 2(1), 44 (in Russian).
10. **V.F. Petrenko**
Psychology. J. HSE, 2005, 2(1), 93 (in Russian).
11. **R. Penrose**
Shadows of the Mind: A Search for the Missing Science of Consciousness, UK, Oxford, Oxford University Press, 1994, 457 pp.
12. **M.B. Menskii**
Phys. Usp., 2005, 48(4), 389.
DOI: 10.1070/PU2005v048n04ABEH002075.
13. **V.S. Stepin**
Theoretical Knowledge: Structure, Historical Evolution [Teoreticheskoe znanie: Struktura, istoricheskaya evolyutsiya], Moscow, Progress-Traditsiya Publ., 2000, 744 pp.
14. **A. Pais**
The Genius of Science: A Portrait Gallery of Twentieth Century Physicists, USA, NY, New York, Oxford University Press, 2000, 356 pp.

15. **G. Greenstein, A.G. Zajonc**
The Quantum Challenge: Modern Research on the Foundation of the Quantum Mechanics, USA, MA, Sudbury, Jones and Bartlett Publishers, Inc., 2006, 300 pp.
16. **H. Everett, III**
Rev. Mod. Phys., 1957, **29**(3), 454.
DOI: 10.1103/RevModPhys.29.454.
17. **H. Everett, III**
In *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*, Eds B.S. DeWitt, N. Graham, USA, NJ, Princeton, Princeton University Press, 1973, pp. 1-140.
18. **M. Tegmark, J. Wheeler**
Scientific American, 2001, February, 54.
19. **M. Gell-Mann**
In *The Nature of the Physical Universe: 1976 Nobel Conference*, Eds D. Huff, O. Prevette, USA, NY, New York, John Wiley and Sons Inc., 1979, 160 pp.
20. **M. Buchanan**
New Scientist, 2007, **196**(2628), 36.
DOI: 10.1016/S0262-4079(07)62791-2.
21. **R. Feynman**
The Physical Character Law, UK, London, BBC Publ., 1965, 129 pp.
22. **W. Heisenberg**
Physics and Beyond: Encounters and Conversations, Ser. *World Perspectives*, **42**, USA, NY, New York, Harper & Row Publ., 1971, 247 pp.
23. **A. Pais**
Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World, USA, NY, New York, Clarendon, Oxford and Oxford UP, 1986, 680 pp.
24. **W. Heisenberg**
In *Quantum Theory and Measurements: Princeton Series in Physics*, Eds J.A. Wheeler, W.H. Zurek, USA, NJ, Princeton, Princeton University Press, 1983, pp. 62–84.
25. **W. Heisenberg**
Zeitschrift für Physik, 1927, **43**(3–4), 172.
DOI: 10.1007/BF01397280.
26. **A. Petersen**
Bulletin of the Atomic Scientists, 1963, **19**(7), 8.
DOI: 10.1080/00963402.1963.11454520.
27. **M. Jammer**
The Philosophy of Quantum Mechanics: The Interpretations of Quantum Mechanics in Historical Perspective, USA, NY, New York, John Wiley & Sons, 1974, 536 pp.
28. **J. von Neumann**
Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik, Deutschland, Berlin, Julius Springer Verl., 1932, 262 S.
29. **J. Bernstein**
Quantum Profile, USA, NJ, Princeton, Princeton University Press, 1991, 192 pp.
30. **N. Bohr**
The Philosophical Writings of Niels Bohr in 4 Vols, Vol. 1: Atomic theory and the description of nature, USA, Conn., Woodbridge, Ox Bow Press, 1987, 119 pp.
31. **A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen**
Phys. Rev., 1935, **47**(10), 777. DOI: 10.1103/PhysRev.47.777.
32. **J.S. Bell**
Physics, 1964, **1**(3), 195.
33. **A. Aspect, P. Grangier, G. Roger**
Phys. Rev. Lett., 1982, **49**(2), 91.
DOI: 10.1103/PhysRevLett.49.91.
34. *The Ghost in the Atom: A Discussion of the Mysteries of Quantum Physics*, Eds P.C.W. Davies, J.R. Brown, UK, Cambridge, Cambridge University Press, 1986, 157 pp.
35. **M. Born**
The Bom – Einstein Letters 1916–1955: Friendship, Politics and Physics Uncertain Times, USA, NY, New York, Macmillan, 2005, 235 pp.
36. **W. Moore**
Schrödinger. Life and Thought, USA, NY, New York, Cambridge University Press, 1989, 513 pp.
37. **J.H. Poincaré**
Sel. Works in 3 Vols, Ser. Classics of Science, Vol. 3: Mathematics. Theoretical Physics. Analysis of Mathematical and Natural Sciences Works of Henri Poincare [Izbrannyye Trudy v 3 tt., Ser. «Klassiki nauki», t. 3], Eds N.N. Bogolubov, V.I. Arnold, I.B. Pogrebysskiy, Moscow, Nauka, 1974, 772 pp. (in Russian).
38. **A.R. Luria**
The Working Brain: an Introduction to Neuropsychology, USA, NY, New York, Penguin Books Ltd, 1973, 398 pp.
39. **V.F. Petrenko**
Voprosy Filosofii [Philosophy Issues J.], 2011, № 6, 75 (in Russian).
40. **S.P. Suprun, A.P. Suprun**
Computers: Classical, Quantum and Others, Ser. Algorithms for Construction of Reality in Physics, Vol. 1, Bentham eBooks, 123 pp. (<http://www.eurekaselect.com/97384/volume/1>).
DOI: 10.2174/97816080534901120101.
41. **V.F. Petrenko, A.P. Suprun**
Psychology in Russia: State of the Art, 2011, **4**, 74.
42. **V.S. Vygotskiy**
Coll. Works in 6 Vols, Vol. 2: General Psychology Problems, Ed. V.V. Davydov, RF, Moscow, Pedagogika Publ., 1982, 504 pp. (in Russian).
43. **A.A. Blok**
Coll. Works in 8 Vols, Ed. V.N. Orlov, RF, Moscow, Leningrad, Gosliizdat, 1960–1963, 6392 pp. (in Russian).
44. **C.G. Jung**
Psychology of the Unconscious [Psikhologiya besoznatel'nogo], Ser. *History of Psychology in Monuments*, Moscow, Kanon Publ., 1994, 317 pp. (in Russian).
45. **C.G. Jung**
Consciousness and Unconscious [Soznanie i besoznatelnoe], Ser. *Classics of Foreign Psychology*, St. Petersburg, University Book Publ., 1997, 536 pp. (in Russian).
46. **L. Smolin**
The trouble with physics: the rise of string theory, the fall of a science, and what comes next, USA, NY, New York, Mariner Books Publ., 2007, 393 pp.
47. **A.P. Suprun, N.G. Yanova, K.A. Nosov**
Metapsychology: Relativistic psychology. Quantum psychology. Psychology of Creativity [Metapsikhologiya: Relyativistskaya psikhologiya. Kvantovaya psikhologiya. Psikhologiya kreativnosti], Moscow, Lenand Publ., 2010, 512 pp. (in Russian).
48. **V.F. Petrenko, E.A. Korotchenko, A.P. Suprun**
Psychology. J. HSE, 2010, **7**(2), 26 (in Russian).

Интерметаллидные никелевые сплавы для авиационных газотурбинных двигателей*

Э.Г. Аргинбаева, О.А. Базылева, О.Г. Оспенникова, Е.Ю. Летникова (Туренко), А.В. Шестаков

Авиационный двигатель – сложнейший механизм, работа которого вызывает неподдельный интерес. Одним из основных инструментов модернизации изделий машиностроительной промышленности является материаловедение, особую роль оно играет в авиационном моторостроении. Именно авиация традиционно аккумулирует самые передовые разработки. В статье рассмотрены интерметаллидные сплавы на основе никеля – современная альтернатива серийным жаропрочным никелевым сплавам. Применение интерметаллидных сплавов позволит не только повысить рабочие температуры газотурбинных двигателей и их весовую отдачу, но и сэкономить дорогостоящие тугоплавкие элементы.

Ключевые слова: интерметаллид, термическая обработка, жаропрочность, фаза, мисфит, газотурбинный двигатель.

*Проект выполнен при финансовой поддержке РФФИ (проект № 17-18-20092).

Авиация – одно из самых интересных направлений исследований и разработок современности. Человек, проявляющий внимание к этой области познаний, в первую очередь задается вопросами: как, что и почему? что заставляет самолет подняться ввысь? как происходит процесс создания авиационного чуда?

В представленной статье отвечать на перечисленные вопросы мы не будем. Затронем один из ключевых моментов – авиационные двигатели – вершину инженерного искусства. Осуществление даже самых смелых и революционных задумок при модернизации и разработке двигателей невозможно без представления о сплавах. Это тот са-

мый «пластилин», позволяющий «вылепить» образ и конструкцию нового «изделия», как называют двигатель его разработчики.

Узлы двигателя, как метеорологическая карта, отражает области высокого и низкого фронта, циклон и антициклон – все это разница в температуре и давлении потоков сгоревшего топлива (рис. 1). Рабочий газ на входе в турбину, как правило, имеет очень высокие температуры – на уровне 1400–1600 °С, в зависимости от назначения изделия. Несомненно, к материалам деталей турбин предъявляются особые требования: температура материала около 1200 °С, способность выдерживать нагрузку при температурах работы (жаропрочность), стойкость к окислению в условиях обдува продуктами сгорания топлива и др. [1–3].

В настоящее время основными материалами, применяемыми для деталей турбины, являются сплавы на основе никеля. В начале прошлого века

**АРГИНБАЕВА****Эльвира Гайсаевна**

Всероссийский
научно-исследовательский
институт авиационных
материалов

**БАЗЫЛЕВА****Ольга Анатольевна**

Всероссийский
научно-исследовательский
институт авиационных
материалов

**ОСПЕННИКОВА****Ольга Геннадиевна**

Всероссийский
научно-исследовательский
институт авиационных
материалов

**ЛЕТНИКОВА (ТУРЕНКО)****Елена Юрьевна**

Всероссийский
научно-исследовательский
институт авиационных
материалов

**ШЕСТАКОВ****Александр Викторович**

Всероссийский
научно-исследовательский
институт авиационных
материалов

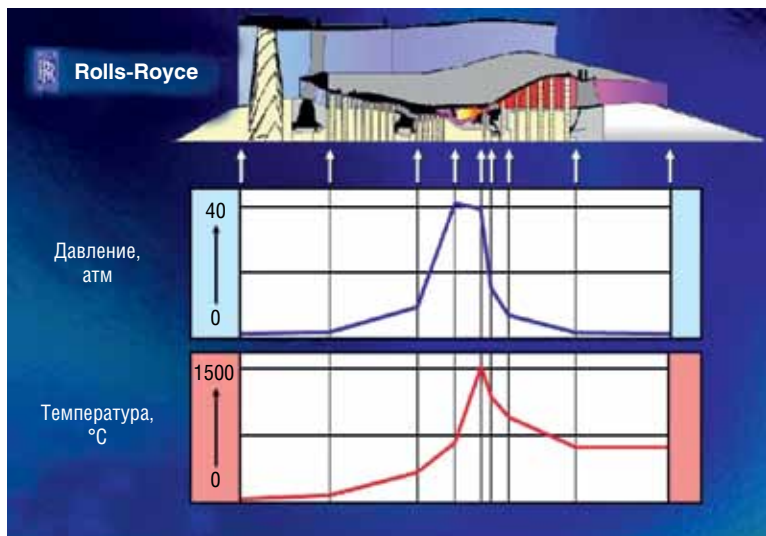


Рис. 1. Схема распределения давления и температуры в газотурбинном двигателе.

была обнаружена способность образования высокотемпературной упрочняющей фазы интерметаллида никеля Ni_3Al – химического соединения двух металлов. Известно, что по физическим характеристикам (температуре плавления, плотности, пластичности) интерметаллиды занимают промежуточное положение между металлами и керамикой.

Как любое живое существо имеет в своей основе скелет, так металл характеризуется кристаллической решеткой. Твердый раствор никеля (γ -фаза) и интерметаллид Ni_3Al (γ' -фаза) имеют кристаллические решетки одного типа (рис. 2). Именно эта особенность позволяет материалововедам-разработчикам вот уже более 70 лет проводить исследования по совершенствованию технических характеристик сплавов на основе никеля.

Самыми высокотемпературными сплавами в семействе никелевых являются интерметаллидные сплавы, содержащие до 90% Ni_3Al . Благодаря тому,

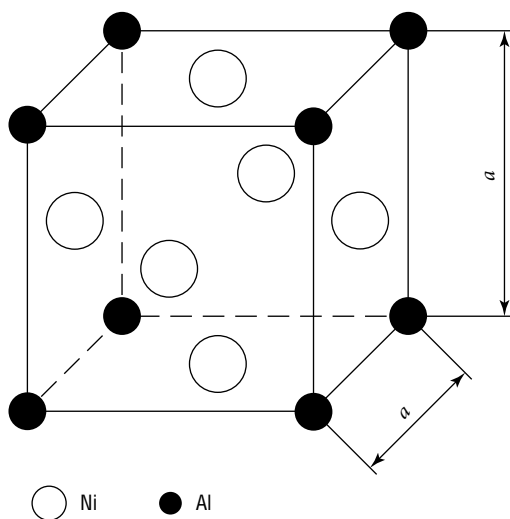


Рис. 2. Кристаллическая гранецентрированная кубическая решетка.

что интерметаллид Ni_3Al имеет температуру образования $1395\text{ }^\circ\text{C}$, интервал рабочих температур данных материалов – $900\div 1200\text{ }^\circ\text{C}$. Вследствие того, что кристаллическая решетка интерметаллида никеля имеет особое упорядочение, соединение сохраняет свою структуру до температурных забросов в $1300\text{ }^\circ\text{C}$ [3, 4].

Кристаллические решетки как твердого раствора никеля, так и интерметаллида Ni_3Al , имеют свой размер – параметр, и способны «принимать» другие химические элементы. Каждый элемент оказывает влияние на кристаллическую решетку, происходит некоторое искажение, которое принято обозначать как мисфит – размерное несоответствие между параметрами кристаллических решеток двух фаз ($a_{\gamma'}$, a_{γ}) [5–7]. На основе особенностей взаимодействия химических элементов на атомарном уровне были разработаны принципы создания жаропрочных никелевых сплавов, в том числе и интерметаллидных. Принципы выражены в виде уравнений, которые позволяют провести расчет сбалансированного химического состава сплава на требуемые характеристики жаропрочности и прочности, и, в первую очередь, на стабильность фазового и структурного состава разрабатываемого сплава, что в дальнейшем и будет определять ресурс его работы [8, 9].

Повышение показателей жаропрочности литейных жаропрочных интерметаллидных сплавов достигается с помощью формирования структуры – как макро-, так и микро-. Поликристаллическая, направленно закристаллизованная столбчатая и монокристаллическая – вот три основных типа структуры литейных конструкционных сплавов. При переходе от поликристаллической структуры с равноосными зернами к направленно закристаллизованной столбчатой структуре с вытянутыми зернами и далее к монокристаллической структуре

с одним зерном растут показатели прочности сплавов. Крупнозернистость – характерная особенность структуры жаропрочных материалов. Чем крупнее зерно, тем меньше протяженность межзеренных границ, слабее зернограничное скольжение и диффузионная активность в металле. Монокристаллы интерметаллидного сплава серии ВКНА демонстрируют жаропрочность практически в 2.5 раза выше, чем отливка того же сплава с поликристаллической структурой [10]. Независимо от технологии отливки полуфабрикатов интерметаллидных сплавов структура сплавов представляет собой дендриты, состоящие из ячеек γ' - и γ -фаз, и межосные области – γ' -фаза, отороченная γ -фазой. Как правило, размеры ячеек в осях дендритов в 2–3 раза меньше, чем в межосье.

Разработка химического состава сплава происходит неразрывно от технологии изготовления полуфабрикатов. Сплавы с поликристаллической (равноосной) структурой имеют высокое содержание углерода и содержат карбидообразующие элементы – цирконий, гафний, титан, хром и другие, образующие соединения типа MeC , Me_6C , упрочняющие границы зерен. Сплавы, отливаемые с направленно закристаллизованной структурой, отличаются меньшим содержанием углерода, однако также нуждаются в укреплении границ зерен. К монокристаллическим сплавам предъявляются повышенные требования по чистоте примесей и газов, чтобы исключить возможность образования дополнительных зерен и межзеренных границ, на которых активно происходят диффузионные процессы при высоких (выше 1100 °С) температурах. Следует отметить, что разработчики сплавов тесно сотрудничают с технологами, так как свойства сплавов напрямую зависят от температурно-временных параметров технологического процесса получения полуфабрикатов деталей.

«Целевая аудитория» жаропрочных интерметаллидных сплавов – детали авиационных газотурбинных двигателей. Одними из самых ответственных деталей турбин являются сопловые и рабочие лопатки. Сопловые лопатки работают в условиях повышенных температур, механическая нагрузка на них при этом относительно невелика. В настоящее время в авиационном двигателестроении в качестве материала сопловых лопаток применяют сплавы с поликристаллической (равноосной) структурой (рис. 3). На смену серийным жаропрочным никелевым сплавам типа ЖС6У, ЖС6Ф разработаны интерметаллидные сплавы марок ВКНА-1ВР, ВКНА-4, ВКНА-4УР с рабочими температурами на 50–100 °С выше, чем у никелевых. Замена никелевого жаропрочного литейного сплава ЖС6У на интерметаллидный сплав ВКНА-1ВР позволяет сэкономить расход кобальта, вольфрама и хрома соответственно 90–105, 95–110 и 30–45 кг на одну тонну сплава. При этом может быть снижен вес деталей на 10% и повышена жаропрочность при 1200 °С в 1.5–2.15 раза. Поскольку интерметаллидные сплавы не требуют проведения упрочняющей термической обработки, то при замене никелевого жаропрочного сплава ЖС6У на интерметаллидный снизится трудоемкость и энергоемкость изготовления деталей.

Рабочие лопатки, вращаясь, служат для превращения энергии горячего газа в работу силовых устройств двигателя. При этом лопатки подвергаются воздействию вибраций, механических напряжений, циклических температурных смен. Например, действие напряжений от центробежных нагрузок на полувысоте лопатки в 13–90 раз превышает силу тяжести. Для таких деталей необходимы более жаропрочные сплавы. Из серии интерметаллидных никелевых можно выделить сплавы марок ВКНА-25, ВИН2. Это ренийсодержащие сплавы,

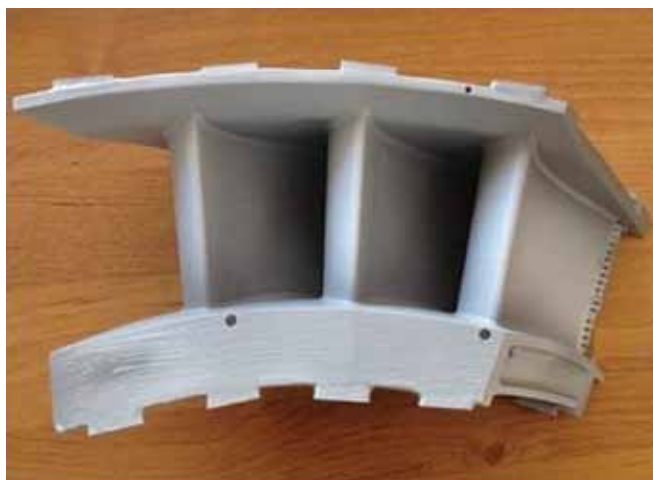


Рис. 3. Блок сопловых лопаток из сплава ВКНА-4 [11].



Рис. 4. Отливки рабочих лопаток из интерметаллидного сплава ВКНА-25.

способные длительно выдерживать нагрузки в составе авиационных изделий. Рений как тяжелый и тугоплавкий элемент замедляет диффузионные процессы, в конструкционных жаропрочных никелевых и интерметаллидных сплавах при высоких температурах является эффективным средством повышения жизнеспособности рабочих лопаток газотурбинных двигателей. В настоящее время полуфабрикаты рабочих лопаток отливают методом направленной кристаллизации. Осуществление метода с использованием затравок позволяет получить монокристаллические лопатки (рис. 4). Представьте, всего один кристалл на деталь сложной конфигурации, имеющую к тому же внутренние охлаждающие каналы.

Исследования, проведенные при разработке и паспортизации интерметаллидных сплавов серии ВКНА, показали, что термическая обработка не оказывает положительного влияния на структуру сплавов, так как структура после литья стабильна, дополнительное упрочнение не требуется. Однако увеличение количества тугоплавких элементов в химическом составе, расширение линейки жаропрочных интерметаллидных сплавов и номенклатуры,

изготавливаемых из них деталей, возвращает исследователей на тропу изучения влияния термической обработки уже на структурные показатели сплавов. Подобные работы позволяют глубже понять поведение сплавов в процессе дополнительного легирования, изготовления полуфабрикатов [7, 12–15].

Остановимся на исследовании влияния параметров термической обработки на интерметаллидный сплав марки ВКНА-25. Сплав содержит около 1.5 масс.% рения, что, конечно, оказывает влияние на показатели сплава. В первую очередь, рений является элементом, оказывающим наибольшее влияние на кристаллическую решетку γ -фазы. Выражается это повышением модуля упругости, увеличением жаропрочности и изменением значения мисфита γ/γ' . К примеру, у сплава ВКНА-1В с монокристаллической структурой кристаллографической ориентации [111] мисфит имеет значение 0.2% – вдвое меньше, чем у монокристаллов [111] сплава ВКНА-25 – 0.5%.

В рамках проекта РФФИ № 16-38-00260-мол_а мы провели исследования, в ходе которых, монокристаллы сплава ВКНА-25 подвергли термической обработке по следующим параметрам:

Температура $T = 1250$ °С, время выдержки $\tau = 5$ ч.

Температура $T = 1270$ °С, время выдержки $\tau = 5$ ч.

Температура $T = 1290$ °С, время выдержки $\tau = 5$ ч.

Исследования сплава ВКНА-25 заключались в определении параме-

Таблица 1. Структурные показатели интерметаллидного сплава ВКНА-25

Состояние сплава	Параметры сплава			Объемное содержание, %	
	$a_{\gamma}, \text{Å}$	$a_{\gamma'}, \text{Å}$	γ/γ' -мисфит, %	γ -фаза	γ' -фаза
Литое	3.575	3.593	0.50	11.0	89.0
Термическая обработка № 1	3.575	3.598	0.64	11.0	89.0
Термическая обработка № 2	3.575	3.599	0.66	9.9	90.1
Термическая обработка № 3	3.575	3.6	0.69	7.0	93.0

тров кристаллических решеток γ' - и γ -фаз, объемного содержания фаз и мисфит γ/γ' и испытания на жаропрочность с определением времени до разрушения (табл. 1 и 2).

Сравнительное исследование структурных показателей образцов сплава после термической обработки показало, что наблюдается увеличение параметра кристаллической решетки γ -фазы при сохранении значения параметра кристаллической решетки γ' -фазы, что приводит к повышению значения мисфита. Кроме того, происходит характерный для никелевых сплавов распад γ -фазы и увеличение объемного содержания γ' -фазы. Как правило, подобные изменения должны привести к росту жаропрочности. Данные, приведенные в таблице 2, это подтверждают.

Однако после термической обработки № 1 велик разброс в результатах испытаний. С повышением температуры термической обработки стабильность значений времени до разрушения растёт. Таким образом, термическая обработка при $T = 1290\text{ }^\circ\text{C}$ обеспечивает повышение значений и стабильность жаропрочности, что будет способствовать увеличению ресурса эксплуатации детали из сплава ВКНА-25.

Комплекс уникальных характеристик интерметаллидных сплавов: высокая рабочая температура, низкая, относительно жаропрочных никелевых сплавов плотность, технологичность и термическая

Таблица 2. Результаты испытаний интерметаллидного сплава ВКНА-25 на длительную прочность при температуре 1100 °С и нагрузке 100 МПа

Состояние сплава	Время до разрушения, ч
Литое	156; 185
Термическая обработка № 1	71; 148; 264
Термическая обработка № 2	237; 197; 121
Термическая обработка № 3	236; 256; 235

стабильность, – расширяют применение данного подкласса материалов. Помимо лопаток интерметаллидные никелевые сплавы рекомендованы для изготовления таких деталей, как створки и проставки сопла, элементы камеры сгорания [4]. Чтобы опробовать сплавы для перечисленных деталей было проведено множество исследований, доказавших широкую номенклатурную способность интерметаллидных сплавов. Так, например, сплав марки ВКНА-1В с поли- и монокристаллической структурой применяется в виде элементов камеры сгорания, сплав марки ВКНА-4УР опробован в виде деталей реактивного сопла, а ВКНА-25 – для рабочих лопаток малогабаритного двигателя.

Изготовление рабочих лопаток, как и всех авиационных деталей, – кропотливый многопоточный процесс, в котором задействованы тысячи специалистов. Ведь при разработке сплава и токарки, изготавливающие образцы, могут способствовать изменению химического состава, комментируя обрабатываемость материала. Несмотря на то, что сейчас время искусственного интеллекта, именно человеческий фактор лежит в основе многих достижений и побед современности, и авиация, авиационное материаловедение здесь не исключение.

Исследования проводились при поддержке РФФИ (проект № 16-38-00260-мол_а).

Литература

1. Е.Н. Каблов *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 1, 3. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, Б.С. Ломберг *Автоматическая сварка*, 2013, № 10, 23.
3. Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, О.А. Базылева *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана, Сер. «Машиностроение»*, 2011, № SP2, 13.
4. О.А. Базылева, Э.Г. Аргинбаева, Е.Ю. Туренко *Авиационные материалы и технологии*, 2013, № 3(28), 26.
5. Е.Н. Каблов, Е.Р. Голубовский *Жаропрочность никелевых сплавов*, Москва, Машиностроение, 1998, 464 с.
6. Е.Н. Каблов, О.Г. Оспенникова, Н.В. Петрушин *Авиационные материалы и технологии*, 2015, № 1(34), 34.
7. О.А. Базылева, Э.Г. Аргинбаева, А.В. Шестаков, Е.В. Колядов *Труды ВИАМ*, 2015, № 12. (<http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/893.pdf>). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-1-1.
8. Е.Н. Каблов, В.П. Бунтушкин, Г.И. Морозова, О.А. Базылева *Материаловедение*, 1998, № 7, 13. (<https://viam.ru/public/files/1998/1998-202531.pdf>).
9. Г.И. Морозова *МиТОМ*, 2012, № 12, 52.
10. Ю.А. Бондаренко, О.А. Базылева, А.Б. Ечин, В.А. Сурова, А.Р. Нарский *Литейное производство*, 2012, № 6, 12.
11. О.А. Базылева, Е.Ю. Туренко, Л.И. Рассохина, О.Н. Битюцкая, А.В. Шитиков, Б.С. Лапеев *Литейное производство*, 2014, № 10, 7.

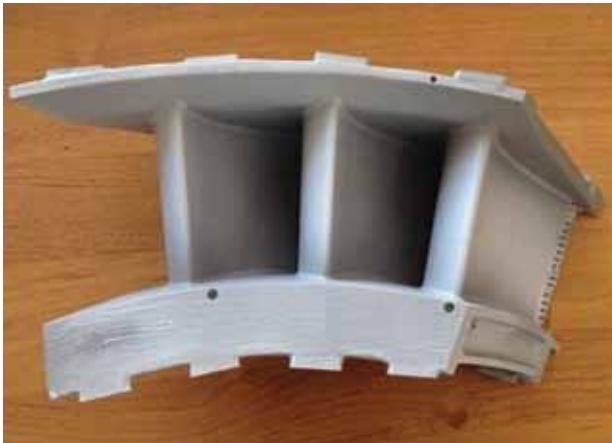


Fig. 3. Block of nozzle blades made of VKNA-4 alloy [11].



Fig. 4. Casting of working blades made of intermetallic alloy VKNA-25.

Table 1. Structural parameters of the intermetallic alloy VKNA-25

State of alloy	Parameters of the alloy			Volume content, %, of	
	$a_{\gamma}, \text{Å}$	$a_{\gamma'}, \text{Å}$	γ/γ' -misfit, %	the γ -phase	the γ' -phase
Cast	3.575	3.593	0.50	11.0	89.0
Heat treatment N 1	3.575	3.598	0.64	11.0	89.0
Heat treatment N 2	3.575	3.599	0.66	9.9	90.1
Heat treatment N 3	3.575	3.6	0.69	7.0	93.0

Table 2. The VKNA-25 intermetallic alloy long-term strength test results at a temperature of 1100 °C and a load of 100 MPa

The state of the alloy	Time-to-rupture, h
Cast	156; 185
Heat treatment N 1	71; 148; 264
Heat treatment N 2	237; 197; 121
Heat treatment N 3	236; 256; 235

References

1. E.N. Kablov
Aviat. Mat. Technol. [Aviatsionnye materialy i tehnologii], 2015, № 1(34), 3 (in Russian).
DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. E.N. Kablov, O.G. Ospennikova, B.S. Lomberg
TPW], 2013, № 10/11, 23.
3. E.N. Kablov, O.G. Ospennikova, O.A. Bazyleva
Her. BMSTU. Ser. Mech. Engineering [Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie], 2011, № SP2, 13 (in Russian).
4. O.A. Bazyleva, E.G. Arginbaeva, E.Yu. Turenko
Aviat. Mat. Technol. [Aviatsionnye materialy i tehnologii], 2013, № 3(28), 26 (in Russian).
5. E.N. Kablov, E.R. Golubovsky
Heat resistance of nickel alloys [Zharoprochnost nikelovykh splavov], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1998, 464 pp. (in Russian).
6. E.N. Kablov, O.G. Ospennikova, N.V. Petrushin
Aviat. Mat. Technol. [Aviatsionnye materialy i tehnologii], 2015, № 1(34), 34 (in Russian).
7. O.A. Bazyleva, E.G. Arginbaeva, A.V. Shestakov, E.V. Koljadov
Proc. VIAM [Trudy VIAM], 2015, № 12. (<http://viam-works.ru/plugins/content/journal/uploads/articles/pdf/893.pdf>) (in Russian). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-12-1-1.
8. E.N. Kablov, V.P. Buntushkin, G.I. Morozova, O.A. Bazyleva
Materialovedenie [Russ. J. Mater. Sci.], 1998, № 7, 13. (<https://viam.ru/public/files/1998/1998-202531.pdf>) (in Russian).
9. G.I. Morozova
MiTOM [Metallurgiya i teplovaya obrabotka metallov], 2012, № 12, 52 (in Russian).

10. **Bondarenko Y.A., Bazyleva O.A., Yechin A.B., Surova V.A., Narsky A.R.**
Liteinoye Proizvodstvo [Foundry. Technol. & Equip.], 2012, № 6, 12 (in Russian).
11. **O.A. Bazyleva, E.Yu. Turenko, L.I. Rassokhina, O.N. Bityutskaya, A.V. Shitikov, B.S. Lapeev**
Liteinoye Proizvodstvo [Foundry. Technol. & Equip.], 2014, № 10, 7 (in Russian).
12. **O.A. Bazyleva, E.G. Arginbaeva, R.M. Nazarkin, D.G. Nefedov**
Metallurgia Mashinostroyeniya [Metall. Machin. Build.], 2015, № 3, 17 (in Russian).
13. **O.A. Bazyleva, E.G. Arginbaeva, E.Yu. Turenko, V.G. Kolodochkina**
RFBR J. [Vestnik RFFI], 2015, № 1(85), 27 (in Russian).
14. **O.A. Bazyleva, M.V. Unchikova, E.Yu. Turenko, V.V. Bagetov, A.V. Shestakov**
Proc. VIAM [Trudy VIAM], 2016, № 10.
(http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1017) (in Russian).
DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-4-4.
15. **E.G. Arginbaeva, O.A. Bazyleva, O.B. Timofeeva, R.M. Nazarkin**
Her. BMSTU. Ser. Mech. Engineering [Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Mashinostroenie], 2016, № 3(108), 53 (in Russian). DOI: 10.18698/0236-3941-2016-3-55-68.

**«ВЕСТНИК РОССИЙСКОГО ФОНДА
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ»**
№ 4 (96) октябрь–декабрь 2017 года
(Приложение к «Информационному бюллетеню РФФИ» № 25)

Подписано в печать 08.12.2017. Тираж 300 экз.

Оригинал-макет ООО «Эко-Вектор»
191186, Санкт-Петербург, Аптекарский пер., д. 3, литера А, помещение 1Н
Тел.: (812) 648-83-66, e-mail: info@eco-vector.com

Печать ООО «РЕАРТ»
125413, г. Москва,
ул. Солнечногорская, д. 22, корп. 2