

ПРИРОДА

1 2012

Вот уже 100 лет, как «Природа»
служит благородному делу
пропаганды научных знаний

А.М. Черепашук

«Природа» —

это всегда

настоящая

НАУКА

В.В. Малахов

«Природа»
была и есть
обновляемая

энциклопедия

для всех

В.А. Захаров

Популярный журнал от ученых ученым
очень нужен всегда: и 100 лет назад,

и — втройне — сегодня

А.П. Расницын

«Природа» задавала
и задает тон научно-
популярному жанру...

*Это особенно важно сейчас, когда пыльным цветом
расцветают воинствующее невежество и лженаука*

Ю.И. Чернов

Специальный выпуск
К 100-ЛЕТИЮ журнала «ПРИРОДА»

В НОМЕРЕ:

- 3** **О ПРИРОДЕ «ПРИРОДЫ»**
- 11** **Черепашук А.М., Чернин А.Д.**
Золотой век космологии
- 23** **Зеленый Л.М., Хартов В.В.,**
Митрофанов И.Г., Долгополов В.П.
Луна: исследование и освоение
(вчера, сегодня, завтра, послезавтра)
- 30** **Григорьев А.И.**
Вклад космической медицины
в здравоохранение
- 37** **Атауллаханов Ф.И., Грищук Е.Л.**
Клетка: координация
молекулярных процессов деления
- 45** **Бородин П.М., Башева Е.А.,**
Голенищев Ф.Н.
Взлет и падение Y-хромосомы
- 51** **Никитов С.А.**
Кристаллы нового поколения
(фотонные и другие «онные»)
- 61** **Шибяев В.П.**
Жидкие кристаллы – кентавры
природы
- 71** **Ярошевский А.А.**
Физико-химическая динамика
магматического процесса
- 78** **Величко А.А.**
Становление современной
ландшафтной оболочки Земли
- 88** **Анисимов В.Н.**
Борьба со старостью: надежда
на разум
- 96** **Урусов В.С.**
Роль русских ученых в открытии
дифракции рентгеновских лучей
кристаллами
- 100** **Заварзин Г.А.**
Микробиология как центральная
биологическая дисциплина
- 108** **ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ**
2011 ГОДА
- Липунов В.М., Чернин А.Д.**
По физике – С.Перлматтер,
Б.Шмидт и А.Райсс
- Аронин А.С.**
По химии – Д.Шехтман (112)
- Недоспасов С.А.**
По физиологии или медицине –
Ж.Хоффманн, Б.Бойтлер
и Р.Штайнман (114)
- 118** **О чем писала «Природа»**
- Боргман И.И.**
Последние успехи в физике
- Смондырев М.А.**
Future in the past (123)

Special issue
to 100th anniversary of «**PRIRODA**» journal

CONTENTS:

- 3** **ON NATURE OF «PRIRODA»**
- 11** **Cherepashchuk A.M., Chernin A.D.**
Golden Age of Cosmology
- 23** **Zelenyj L.M., Khartov V.V.,
Mitrofanov I.G., Dolgopolov V.P.**
**The Moon: Exploration
and Development**
(Yesterday, Today, Tomorrow, after Tomorrow)
- 30** **Grigoriev A.I.**
**Contribution of Cosmic Medicine
to Healthcare**
- 37** **Ataullakhanov F.I., Grishchuk E.L.**
**Cell: Coordination of Molecular
Processes of Division**
- 45** **Borodin P.M., Basheva E.A.,
Golenishchev F.N.**
Rise and Fall of Y-Chromosome
- 51** **Nikitov S.A.**
New Generation of Crystals
(Photonic and Other «ic» Crystals)
- 61** **Shibaev V.P.**
Liquid Crystals – Centaurs of Nature
- 71** **Yaroshevsky A.A.**
**Physico-Chemical Dynamics
of Magmatic Process**
- 78** **Velichko A.A.**
**Becoming of Contemporary
Landscape Cover of Earth**
- 88** **Anisimov V.N.**
**Battle against Ageing:
Hope for Reason**
- 96** **Urusov V.S.**
**Role of Russian Scientists
in Discovery of X-Ray Diffraction
by Crystals**
- 100** **Zavarzin G.A.**
**Microbiology as a Central
Biological Discipline**
- 108** **NOBEL PRIZE LAUREATES 2011**
Lipunov V.M., Chernin A.D.
**In Physics – S.Perlmutter,
B.Schmidt and A.Riess**
Aronin A.S.
In Chemistry – D.Shechtman (112)
Nedospasov S.A.
**In Physiology or Medicine –
J.Hoffmann, B.Beutler
and R.Steinman (114)**
- 118** **What «Priroda» Wrote About**
Borgman I.I.
Recent Advances in Physics
Smondyrev M.A.
Future in the Past (123)

О природе «Природы»

«П рирода» задумана столетие назад для междисциплинарного общения ученых и для самообразования всех интересующихся наукой. С первых лет жизни журнал опекали ученые с мировым именем. Называясь сотрудниками редакции, они сами не только писали и переводили для журнала, но и редактировали, а порой были и его меценатами¹. Они привлекали на страницы «Природы» своих коллег, причем не только отечественных, но и зарубежных (например, в 1927 г. опубликованы статьи А.Эйнштейна и М.Планка, в 1972 г. — В.Гейзенберга, в 1973 г. — Э.Майера, в 1982 г. — С.Хокинга и т.д.). Сейчас, когда подготовлено мультимедийное издание векового архива «Природы»², все выпуски журнала станут доступны нашим читателям, которые получат вместе с этим номером диск с записью архива. Теперь нет необходимости в очередной раз рассказывать и о давнем прошлом журнала, поскольку этому посвящены многочисленные публикации³. Ограничимся лишь кратким описанием последних десятилетий жизни «Природы», о которых еще не было речи.

Вернемся примерно на полвека назад. Тогда главным редактором был известный физик, лауреат Нобелевской премии Н.Г.Басов. Из всей большой редколлегии он выделил себе в помощь трех замов: Д.А.Франк-Каменецкий возглавил отдел физики (его потом сменил В.М.Галицкий), Ю.М.Пущаровский долгие годы отвечал за науки о Земле, а академик Б.Л.Астауров курировал биологию (потом его дело продолжил А.К.Скворцов). В те



На улице Осипенко (адрес редакции в 1965—1975 гг.). Слева направо: Д.И.Скляр, М.А.Корец, Л.М.Боярская, П.Г.Абелин, И.Е.Рояк. 1970 г.

Публикация подготовлена
О.О.Астаховой и О.И.Шутовой



В.М.Полынин. 1976 г.

годы был еще один зам — внутренний цензор журнала А.С.Федоров («Природу», как и все прочие периодические издания, проверял Главлит).

И главный редактор, и его заместители — ученые, серьезно занимавшиеся наукой, возглавлявшие институты и лаборатории, — всегда были рядом с «Природой»: выбирали темы и интересных авторов, рецензировали статьи и даже читали корректуру номера перед его отправкой в печать. Сейчас редко кто из членов редколлегии так озабочен делами журнала, что вполне объяснимо нынешним положением дел в отечественной науке.

¹ Слово — Станиславу Лему. Пятнадцать писем о «Природе» (2007. №1. С.3—13).

² Полный архив «Природы» создан руками сотрудников и друзей журнала при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-05-07078).

³ См., например: *Успенская НВ*. А.П.Чехов и В.А.Вагнер. Из предыстории «Природы» (1982. №1. С.92—97); *Успенская НВ*. «Природа» и время (1992. №1. С.3—10).



В Мароновском переулке. Слева направо: внизу — Д.И.Скляр, Г.В.Короткевич, Н.В.Успенская, С.С.Неретина, Л.Д.Майорова, М.Ю.Зубрева, А.В.Баронкина; в середине — И.Н.Арутюнян, В.М.Полынин, Н.Д.Морозова, А.А.Баграмова, О.О.Астахова, Г.И.Панкова, Л.М.Шитикова, Л.М.Боярская, В.В.Пирожков; вверху — В.А.Гончаров, П.Г.Абелин, А.И.Антипов. 1976 г.

Но еще 15—20 лет многие из них (Н.Н.Воронцов, А.К.Скворцов, С.П.Капица, А.А.Комар, С.С.Герштейн, А.В.Яблоков, А.Л.Бызов, С.Э.Шноль, Г.А.Заварзин и др.) регулярно заглядывали в редакцию, чтобы за вечерним чаем поговорить на научные и околонаучные темы. И в такой домашней, почти семейной обстановке рождались следующие выпуски журнала.

В конце 60-х годов, когда начиналось возрождение генетики, пострадавшей от лысенковщины, Б.Л.Астауров, продолжатель традиций Н.К.Кольцова, делал очень многое, чтобы вернуть любимой науке былую славу. Трибуной для этого он

выбрал «Природу», а помощником — В.М.Полынина, которого хорошо знал как талантливого журналиста, прошедшего научную школу на семинарах В.В.Сахарова. В 1967 г. Полынин (настоящая фамилия Блантер, он был сыном известного композитора Матвея Блантера) стал ответственным секретарем «Природы». С того времени и до конца жизни Владимир Матвеевич все свою творческую энергию и талант отдавал журналу. Достаточно сказать, что он, уже будучи автором двух замечательных книг («Папа, мама и я» — первый в нашей стране популярный рассказ о поруганной генетике, «Пророк в своем отечестве» — о Кольцове), работая в редакции, не написал ни строчки.

Как известно, в хорошо работающем коллективе всегда есть лидер, или, гово-



Худреды за изготовлением макета. 1972 г.

ря языком Л.Н.Гумилева¹, пассионарий. Таким для нас и стал Полынин; при нем начался «золотой век» «Природы» (тираж 85 тыс. говорит сам за себя — ни до, ни после такого не было). Работать с ним было порой трудно, но всегда интересно. Многие его нововведения сделали журнал живее. У статей появились «лицо» и персоналия авторов — теперь мы говорим, что у нас так принято. Была создана постоянная рубрика «Нобелевская премия», весьма авангардная для тех времен: в нашей стране, пожалуй, только «Природа» подробно разъясняла, кто и за что получил премию. Мы продолжаем это делать до сих пор, хотя теперь это уже и не так ценно. Полынин многому научил своих сотрудников, в том числе и работе с архивами. С его подачи и при его поддержке появились интересные биографические подборки: например, октябрьский номер 1987 г. был полностью посвящен Н.И.Вавилову. В новой истории «Природы» есть еще один малоизвестный факт: сотрудничество с журналом «Nature»². Информация о важнейших публикациях в этом журнале оперативно появлялась в «Природе» с 1912 г., а в 1987 г. одноименные издания стали побратимами: начался обмен журналами и материалами для публикаций. Продолжалось это до 2004 г.

Редакторами в «Природе» всегда были не журналисты, а выпускники естественных факультетов (правда, фамилии редакторов стали публиковать на последней странице журнала только с 1989 г.). Сегодня хочется вспомнить людей, многих из которых уже нет, но труд их увековечен в старых номерах журнала. В отделе физики работали еще при Полынине наши старейшие — З.Л.Понизовский и М.А.Корец³, отдел наук о Земле возглавляла Н.Б.Семихатова⁴, которой помогала М.Ю.Зубрева, в отделе биологии трудились В.Д.Крупин и Е.А.Геевская, в отделе истории, философии и информации — И.Б.Шишкин, И.Л.Парамонова и О.О.Астахова. Книгами и редакционной почтой занималась Н.В.Успенская, литературным редактором была Г.В.Короткевич, в художественном отделе работали Д.И.Скляр и Л.М.Боярская во главе с П.Г.Абелиным. Со временем перестановка сил неизбежно менялась: росли старые кадры, некоторые из них уходили, но их сменяли новые — молодые, энергичные сотрудники. С их появлением на страницах журнала возникали живые интервью с интересными людьми на актуальные темы⁵. Преемственность, сохранение традиций журнала и память о делавших его людях позволили «Природе» дожить до 100 лет, не потеряв свое лицо.

Юбилей «Природы» — это праздник не только наш, но и наших читателей и, конечно же, авторов, без которых не было бы журнала. Среди них есть и такие, кто начинал писать для «Природы» совсем молодым и оставался верен ей многие годы. Приводя выдержки из их обращений, предоставим первое слово О.М.Ивановой-Казас, классику отечественной эмбриологии, первая публикация которой вышла в нашем журнале в 1936 г.

¹ К слову, рецензия Ю.М.Бородея на книгу Л.Н.Гумилева «Этногенез и биосфера Земли» (Природа. 1981. №4. С.124—126) вызвала бурную реакцию в Академии, и в результате за «идеологический промах» заместитель главного редактора В.А.Гончаров был уволен, а члены редколлегии А.К.Скворцов, А.Л.Бызов и А.В.Яблоков получили выговоры.

² Подробнее см.: Природа — Nature (1989. №6. С.61—64).

³ О М.А.Корце см.: Горелик Г.Е. «Моя антисоветская деятельность...» (1991. №11. С.93—104); Ранонок Ю.Н. М.А.Корец и Л.Д.Ландау в кольце харьковских спецслужб (2008. №1. С.54—60).

⁴ Взгляд в прошлое (2010. №5. С.88—98).

⁵ См., например: Арутюнян И.Н. Загадки солнечных нейтрино (1983. №8. С.59—76); Морозова Н.Д. Горячие точки космологии (1989. №7. С.3—18); Майорова Л.Д. Какая академия нам нужна. Интервью с Б.С.Соколовым (1990. №10. С.3—7).



Редакторы биологического отдела на конференции. 1994 г.



Разбираем вышедший номер.

Оказывается, «Природа» — почти моя ровесница, она старше меня всего лишь на год! Я знаю, что журнал не раз бывал в критической ситуации, но в течение века продолжал выходить непрерывно. Считаю «Природу» очень нужным и интересным журналом, из которого можно узнать о достижениях науки. Это дает возможность познакомиться с ними тем, кто работает в других областях естествознания. Этим «Природа» выгодно отличается от других журналов.

О.М.Иванова-Казас,
доктор биологических наук

Академик М.А.Мензбир еще в 20-х годах прошлого столетия на одном из биологических форумов высказал такую мысль: настоящий ученый — не тот, кто публикует один за другим фундаментальные научные труды, а тот, кто выкраивает время и силы изложить их в популярной форме, доступной для широкого круга читателей.

В России с XIX в. интенсивно развивалась, быть может, одна из самых эффективных систем популяризации научных знаний. Это прежде всего такие журналы, как «Вокруг света», «Наука и жизнь», «Знание — сила», «Юный натуралист», «Химия и жизнь» и т.д. Возглавляет этот перечень академическая «Природа». Она задавала и задает тон научно-популярному жанру, демонстрирует принципы достоверности и корректности наших знаний о природе и обществе. Это особенно важно сейчас, когда пыльным цветом расцветают воинствующее невежество и лженаука, когда недостаточная образованность части населения используется в сугубо корыстных целях, искажаются принципы физиологии и основ медицины, сохранения здоровья, среды обитания человека, законов демографии и т.д.

«Природа» — источник сведений обо всех явлениях природы: от строения материи и зарождения Вселенной до макроструктуры нашей планеты и уровней организации жизни, биологического разнообразия и общества. В наше время роль журнала такого профиля трудно переоценить и для развития самой фундаментальной науки. Кроме того, благополучное существование системы научно-популярных журналов — показатель уровня интеллекта общества.

академик Ю.И.Чернов
Институт проблем экологии и эволюции им.А.Н.Северцова РАН

Из всех наших популярных журналов только «Природа» входит в список ВАК. Прочитав что-либо в ней, всегда можешь быть уверен, что это и есть точка зрения настоящих специалистов, а не вольная, мягко говоря, интерпретация журналистов. Я думаю, что в будущем значение журналов, подобных «Природе», будет только возрастать, поскольку даже самим ученым интересно и важно знать о тех совершенно фантастических открытиях, которые постоянно происходят в разных областях мировой науки.

Мне кажется, что журнал необходимо постепенно переводить в цифровой формат — только так он сможет выжить в конкурентной среде будущего. В таком случае значительно расширится круг читателей, публикации «Природы» будут видны поисковыми интернет-системами и станут цитироваться. Ведь в настоящее время интеллектуальная молодежь порой даже не подозревает о существовании такого журнала! Доступ к «Природе», включая весь его архив за 100 лет, должен быть бесплатным (небольшую плату могут вносить авторы за счет грантов — так сейчас поступают наиболее прогрессивные сетевые научные издания). Свет знаний должен свободно проливаться на всех, только тогда он будет побеждать в вечной борьбе с мраком невежества и обскурантизма. И этот свет должен нести наш любимый журнал — такова его природа!

В.М.Ковальзон,
доктор биологических наук
Институт проблем экологии и эволюции им.А.Н.Северцова РАН

Я очень люблю читать «Природу». Когда ее читаешь, на душу сходит мир, покой и уважение к человечеству. Начинаешь понимать, что человечеству можно многое простить — за то, что оно придумало науку, способную распутывать самые трудные загадки природы и доказывать, что все устроено не так, как мы думали раньше. Еще за то я люблю «Природу», что она показывает, откуда берутся знания, как люди находят решения загадок природы и как их поиск иногда оказывается гораздо интереснее самих решений.

Я очень люблю писать в «Природу». По поводу почти каждой завершенной работы пишу статью в любимый журнал — до или параллельно с написанием научной. И хотя это считается дурным тоном, я регулярно так делаю и всем советую — тогда у вас и научные статьи станут лучше. В «Природу»

должно писать максимально просто, ясно и интересно. Сначала нужна завязка — блуждание в тумане, непонимание и конфликты между школами мысли (не путать с академическими интригами), затем — поиск средств решения, проблеск гипотезы, получение данных (казалось бы, кульминация), но они с ней не вяжутся, поэтому — новые данные... и, наконец, развязка — новая гипотеза. Так бы надо писать и научные статьи. Как мы их пишем (чем унылее, тем «научней»), писать не надо, более того — даже и делать не надо такую научную работу, про которую нельзя написать статью в «Природу».

Я люблю тех, кто делает «Природу». За их деликатность с авторами, за интуицию на интересных людей и темы, за аллергию на великие открытия «британских ученых» и наших признанных и непризнанных гениев. И так этот журнал делается уже 100 лет, и так делают его сейчас. Удачи ему.

П.М.Бородин,

доктор биологических наук
Институт цитологии и генетики СО РАН

Когда пишешь научную статью, всегда остаются «несвоевременные мысли». Порой «на кончике пера» (теперь, надо понимать, клавиши мыши) повисают удачные фразы, которые, тем не менее, не укладываются в прокрустово ложе современного научного текста. По определению, неизвестно кем и когда данному, он должен быть выхолощен до полного стилистического абсурда. Невольно позавидуешь стилию Ломоносова или Дарвина, которые писали языком не только научным, но и литературным, причем в журналы, где под одной обложкой печатались и физики, и химики, и астрономы, и геологи, и биологи, и археологи — в общем, естествоиспытатели всех мастей. Такой единой научной прессы у нас ныне и не осталось, разве что «Природа». На страницах сего журнала и мысли всегда просторно.

А.Ю.Журавлев,

доктор биологических наук
Университет Сарагосы (Испания), журнал «National Geographic»

Популярный журнал от ученых ученым очень нужен всегда: и 100 лет назад, когда ученых было не так много, но каждый был по теперешним меркам почти энциклопедистом, и — тройне — сегодня, когда... — что сейчас, всем известно, повторять не буду.

Не чувствуя призвания популяризатора, я редко пользовался гостеприимством «Природы» (хотя за одну публикацию в июльском номере 1990 г. таю гордость — статья до сих пор вызывает некоторый интерес). Однако сам черпал и черпаю из этого источника полной мерой, особенно сейчас, когда журнал появился на сайте РАН в открытом доступе. Радуют не только профессионально важная информация и новости из смежных наук, изложенные ответственно и доступно, но и лица коллег, с кем порой давно не виделся или знаком только по публикациям. Интересны фотографии и описание мест, по которым когда-то бродил или вижу впервые, растений и животных, с одними из них сам когда-то имел дело, про другие — слышал, а третьи — открытие. Это мир дорогой и нужный — пусть он будет всегда!

А.П.Расницын,

доктор биологических наук
Палеонтологический институт РАН

Привязанность к журналу закрепилась у нас благодаря знакомству с его ответственным секретарем В.М.Польным, который бывал на биофаке у руководителя нашей лаборатории физиологии и генетики поведения Л.В.Крушинского. Присутствие при их беседах и обаяние личности «главы» журнала рождали к нему интерес. И еще — в редколлегии «Природы» много лет работал выдающийся ученый Б.Л.Астауров (близкий друг Крушинского), влияние которого на биологов 1960-х годов трудно переоценить. Этот скромный человек с негромким голосом был одной из ключевых фигур восстановления отечественной биологии в тот период. Очевидно, что и «Природа» влияла на формирование биологического мышления у многих наших сверстников. К тому времени относятся и наши первые попытки стать авторами «Природы». Это не стало систематическим, но неизменно для нас полезным благодаря общению с редакторами биологического отдела, их искреннему интересу и важным замечаниям. Сегодня журнал не утратил актуальности. Большое достижение, что он постоянно устраивает встречи с наиболее интересными из своих авторов, что доступ к нему облегчен благодаря выходу в Интернет.

Коллеги! Пишите статьи в «Природу»!

З.А.Зорина, И.И.Полетаева,

доктора биологических наук
МГУ им.М.В.Ломоносова

Что такое наука, я узнал из «Природы», которую начал читать еще школьником. Студентом обязательно просматривал новые выпуски, а став аспирантом, сразу начал выписывать журнал (благо, это было ненакладно).

В 70–80-х годах заниматься наукой было престижно. Высок был престиж и «Природы» — честь напечататься в ней выпадала немногим, а уж для молодого ученого это было событием. После первой статьи в «Природе» я получил и неожиданную поддержку, и новых друзей, и новых врагов; последствия этой публикации ощущаю до сих пор.

Кризис российской науки отразился и на «Природе». Статьи в российских изданиях, в том числе и в научно-популярных, стали рассматриваться как второсортные, гораздо важнее теперь опубликоваться в высокорейтинговом журнале за рубежом. Но ведь «Природу» читают не только научные работники: пару лет назад я наткнулся в ЖЖ на бурное обсуждение своей статьи, которое по накалу страстей не уступало интернет-дискуссиям об известных политиках или людях шоу-бизнеса.

«Природа» может и должна быть востребована, ведь она остается изданием, где читатель получает науку «из первых рук». Этим «Природа» всегда отличалась и отличается от других научно-популярных журналов. Увы, большинство СМИ не способны отличить науку от псевдонауки. «Природа» — это всегда настоящая наука.

член-корреспондент РАН **В.В.Малахов**
МГУ им.М.В.Ломоносова

Какие бы катаклизмы ни происходили в жизни людей и стран, наши знания о мире продолжают развиваться, расти, преумножаться. Развитие науки парадоксально: по мере углубления научных знаний о природе происходит специализация и размежевание научных дисциплин, в каждой из которых вырабатывается особый, порой весьма изощренный язык, непонятный непосвященным. В такой ситуации особое значение приобретают научно-популярные издания — своего рода мостики и между учеными разных специальностей, и между наукой и «внеаучным» миром.

В России к числу важнейших таких посредников относится «Природа». Вот уже целый век она активно занимается просвещением людей, приобщением их к достижениям естествознания, воспитанием научного мировоззрения. Дело это, однако, непростое — не каждый ученый легко и непринужденно может переключиться с сугубо научного стиля изложения своих материалов на понятный публике язык. «Природа» как раз и помогает решить эту проблему, находя специалистов, готовых к такому переключению, и помогая тем, у кого это получается не сразу.

М.В.Калякин,
доктор биологических наук
Зоологический музей МГУ им.М.В.Ломоносова

«Природа» — журнал интересный: открыв его где-нибудь по профилю, читаешь рядом, а затем от корки до корки — и не можешь оторваться. И все вроде бы понятно, а если и не понял, так в конце есть литература и можешь заняться своим «ликбезом».

В журнале много материалов о замечательных ученых, их находках и заблуждениях, отчаянной борьбе за свои убеждения с признанными теориями, авторитетами и чиновниками. И как-то, сначала между строк, а потом во весь рост, встают научные проблемы, открытия, новые перспективные направления. Вспомню хотя бы о том, что мне ближе всего, — о молодом А.Е.Ферсмани, который на страницах «Природы» впервые поставил задачу создать науку о химии Земли на базе минералогии. Никому и в голову не приходило, что минералы можно использовать для воссоздания геологических процессов, изучения природных химических реакций, условий формирования полезных ископаемых. Кто мог тогда понять перспективность этого направления, кроме В.И.Вернадского? Журнал «Природа» это понял.

Б.Е.Боруцкий,
доктор геолого-минералогических наук
Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН

«Природа» была и есть обновляемая энциклопедия для всех. Со студенческой скамьи я развивал и обогащал себя, читая любимый журнал. Специальные статьи требовали некоторого напряжения и будоражили воображение. Краткие резюме из отечественных и зарубежных журналов расширяли знания не только в узкопрофессиональной области, но и смежных науках. Для меня, пале-

онтолога, «Природа» была одним из источников знаний по другим наукам, в особенности, биологическим. Развитием своего интеллекта я обязан журналу и, не стесняясь быть сентиментальным, говорю: «Спасибо, дорогой путеводитель по передовому краю наук. Если мне удалось чего-то достичь в геологии и палеонтологии, то это и Твоя заслуга. Освещай путь в Науку новым поколениям одержимых».

В.А.Захаров,

доктор геолого-минералогических наук
Геологический институт РАН

В силу стремительного прогресса науки даже в течение одной человеческой жизни члены научного сообщества за пределами своей специальности перестают понимать язык коллег. Разрыв этот весьма опасен, а заполнение его требует непрерывных усилий и особого дара. Такую незаменимую миссию выполняет редакция «Природы».

Для меня регулярное чтение этого журнала необходимо для поддержания научного тонуса и ощущения жизни сообщества в целом. С огорчением отмечу, что «Природу» можно приобрести только по подписке. А в США во всех книжных магазинах и киосках, во всех аэропортах страны всегда можно купить текущий номер равного по рангу «Природы» журнала «Scientific American». Ситуация «наука—общество» в России стала настолько тягостной, что Академия наук создала специальный Совет по борьбе с лженаукой. Пусть так. Но верна давняя истина: лучше зажечь одну свечу, чем сто раз проклинать тьму. Уверен, Академия наук в силах и должна сделать многое, чтобы свеча «Природы» горела ярко.

М.Д.Голубовский,

доктор биологических наук
Университет Калифорнии (Беркли, США)

Вот уже 100 лет, как «Природа» служит благородному делу пропаганды научных знаний. Выход ее совпал с революцией в физике и астрономии, все этапы которой обсуждались и на страницах журнала. В 1917 г. Эйнштейн опубликовал первую космологическую работу, где пытался «получить» стационарную Вселенную. В 1922—1924 гг. Фридман теоретически показал, что она должна быть нестационарной, а в 1927—1929 гг. Хаббл открыл ее космологическое расширение. Эти работы привели к идее Большого взрыва. Утвердилось даже такое «крамольное» понятие, как возраст Вселенной, которое вначале многими людьми воспринималось с трудом, а затем модель горячей, эволюционирующей Вселенной возрастом около 14 млрд лет стала общепризнанной.

Замечательно то, что и сейчас, в год столетия журнала «Природа», мы вновь стали свидетелями начала революции в физике и астрономии. Открыто явление осциллирующий нейтрино, свидетельствующее о ненулевой массе покоя этой удивительной элементарной частицы. Открыт эффект ускоренного расширения Вселенной (Нобелевская премия 2011 г.). Выяснилось, что атомы и молекулы, из которой состоят известные нам тела, составляют лишь 4—5% от всей материи во Вселенной, остальные 95% — так называемый темный сектор (темная энергия и темная материя). Открыты сотни планетных систем вокруг других звезд, и идет поиск внеземной жизни. От всех этих новых открытий буквально захватывает дух. И «Природа» продолжает следить за этими научными достижениями на своих страницах.

академик А.М.Черепашук

Государственный астрономический институт им.П.К.Штернберга МГУ им.М.В.Ломоносова

Я выписываю журнал с 1956 г. и считаю его одним из основных источников своего образования в науках, далеких от геохимии, изучить которые даже в рамках современных университетских курсов невозможно. Физика, астрономия и астрофизика на моих глазах столь сильно изменились, что без «Природы» учить эти предметы пришлось бы заново. Следить за развитием химии, биологии и даже географии с почвоведением, которые ближе к моей специальности, физически уже очень трудно. Если бы не «Природа», я читал бы свой курс геохимии в университете на уровне, недалеко ушедшем от уровня 50—60-х годов. Спасибо ученым разных поколений, ведущим наш журнал и поддерживающим его научный уровень в течение 100 лет.

А.А.Ярошевский,

доктор геолого-минералогических наук
МГУ им.М.В.Ломоносова

Я начала выписывать «Природу» в 1972 г., и она стала одним из моих самых главных учителей. Могу только восхищаться коллективом журнала — энтузиастами, тонкими, интеллигентными, творческими людьми! Желаю им вдохновения и поддержки всех, кто готов помочь в нелегком и таком необходимом всем нам деле! Хорошо бы создать общество друзей «Природы», которое помогало бы ей словом и делом: рассказывать о журнале везде (в средствах массовой информации, в Интернете) и даже — в меру сил — материально. Надо бы завести свой собственный сайт с разными рубриками, блогам и форумами!

Е.А.Гороховская,

кандидат биологических наук
Институт истории естествознания и техники РАН

Последнее столетие картина мира, представления о человеке и окружающем его мире стремительно менялись. «Природа» всегда вносила и вносит весомую лепту в обсуждение этих вопросов. Величие слова и мысли журнала наводит на аналогию века «Природы» с веком Просвещения: те же глубина, основательность, энциклопедичность, а главное — устремленность в будущее, умение нащупать прорывные точки в науке, в развитии общества и человека.

М.А.Мануильский,

журнал «Человек»

Сегодня ученые в России воспринимаются, как мне кажется, юродивыми, которые витают в облаках, став со своей мизерной зарплатой проклятием для собственных семей. Отсутствие обратной связи и веры в то, что занимаешься важным делом, не может не сказаться на образе мысли в целом и на отношении к своей работе. Хочется (не тщеславия ради, а исключительно высоких стремлений для), чтобы репутация науки начало повышаться. Людям смолоду должно быть ясно, что человека делают не только деньги, но и — главным образом! — его ум, интересы, справедливость и гуманное отношение к ближним. Мне кажется, что всем этим целям в той или иной мере служит и жанр популярной науки, формируя у своего читателя правильные ценности и умение взвешивать разного рода пропаганду, заполняющую эфир.

«Природа» делает важное дело, хотя благодарным его не назовешь. Знаю не понаслышке: почти пять лет назад мы с друзьями создали научно-популярный сайт «Биомолекула» (<http://biomolecula.ru>). Однако пять лет и 100 — большая разница! К сожалению, в наши дни о существовании «Природы» даже в среде ученых мало кто знает. Воздержусь от конкретных рекомендаций, но все же пожелаю журналу стать ближе к читателю, выйти в широкий Интернет (pdf-файлы на сайте РАН — это хорошо, но кто об этом знает?) и войти в розничные сети продажи, чтобы в следующую «сотню» сделать наш мир немного лучше!

А.О.Чугунов,

кандидат физико-математических наук
Институт биоорганической химии им. академиков М.М.Шемякина и Ю.А.Овчинникова РАН

Хочется помечтать и увидеть, что будет напечатано в «Природе» в день ее 200-летия в далеком 2112 году (что такой выпуск будет, я не сомневаюсь, продержаться первые 100 лет было труднее всего). Вряд ли стоит пытаться угадать содержание этого номера: глубина научного прогноза, к сожалению, не может превышать сейчас 15–20 лет. Уверен в одном — принцип единства всех естественных наук, ставший основным программным стержнем журнала, окажется еще более плодотворным. Я не верю в масштабную конвергенцию наук — по-видимому, физика, химия, биология, геология и т.д. сохраняют свою индивидуальность. Однако самые интересные процессы в еще большей мере, чем сейчас, будут происходить на стыках наук, и здесь роль «Природы» невозможно переоценить. Уверен, что на бумажных или электронных страницах журнала мы прочтем о главных естественно-научных событиях XXI в. и об их видимых и скрытых связях друг с другом. В дни юбилея хочется пожелать журналу немного несерьезности — рубрика «Физики-химики (и, страшно подумать, даже нанотехнологи) еще шутят» придала бы облику журнала несколько недостающие ему стильность и изящность.

академик **Л.М.Зеленый**

Институт космических исследований РАН

Золотой век космологии

А.М.Черепашук, А.Д.Чернин

Современная космология — ровесница нашего любимого научно-популярного журнала. Она начиналась с наблюдений американского астронома В.Слайфера, обнаружившего в 1912—1915 гг. знаменитый ныне феномен космического красного смещения. Тогда же была создана общая теория относительности, ставшая фундаментом всей науки о Вселенной. С тех пор грандиозные открытия астрономов и теоретиков следовали одно за другим непрерывной чередой. Мы расскажем здесь о самых важных событиях в столетней истории космологии, часть из которых была отмечена Нобелевскими премиями, в том числе и в 2011 г.

Вселенная — мир галактик

В 1917 г. в первой работе по космологии, основанной на только что построенной им общей теории относительности, Эйнштейн говорил о Вселенной как о мире звезд; таково было тогда общепринятое мнение физиков и астрономов. Однако уже в 1918—1922 гг. эстонский астроном Э.Эпик, выпускник Московского университета, работавший тогда в Москве, и вслед за ним в 1924—1925 гг. американский астроном Э.Хаббл доказали, что «строительными блоками» Вселенной служат галактики (рис.1, 2) — гигантские звездные системы, подобные нашей Галактике, которую мы видим на небе как Млечный Путь*.



Анатолий Михайлович Черепашук, академик, директор Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга МГУ, заведующий астрономическим отделением физического факультета МГУ. Вице-президент Европейского астрономического общества, член Английского Королевского астрономического общества. Область научных интересов — исследование двойных систем, обратные задачи астрофизики. Член редколлегии журнала «Природа».



Артур Давидович Чернин, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник того же института. Область научных интересов — космология, физика галактик.

Большинство галактик входит в группы и скопления (рис.3, 4), а скопления образуют самые большие по протяженности сгущения вещества в природе — сверхскопления, которые представляют собой уплотненные образования, содержащие несколько скоплений галактик. Крупнейшие из сверхскоплений называются стенами. Чаще всего сверхскопления соединяются между собой цепочками галактик и скоплений; эти цепочки носят

название филаментов. Размеры типичных сверхскоплений и филаментов измеряются примерно тремя сотнями миллионов световых лет или, что то же, сотней мегапарсек (напомним, что один парсек почти точно равен трем световым годам). Более крупных по размерам и массе сгущений вещества во Вселенной не существует: иерархия астрономических систем обрывается на сверхскоплениях и филаментах.

Последнее не означает, однако, что эти крупнейшие системы разбросаны в пространстве произвольно и беспорядочно. Как оказывается, сверхскопления и

* Подробнее о работах Хаббла, о мире галактик и их систем можно прочитать в книгах [1, 2].

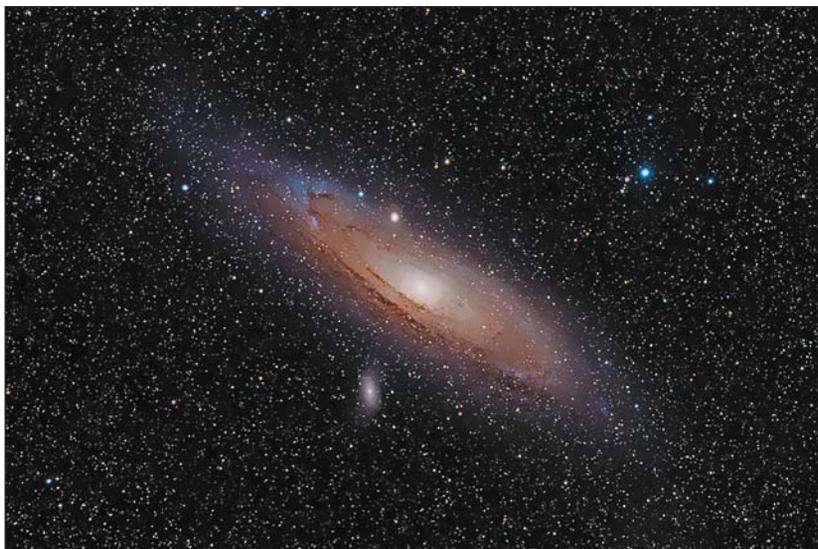


Рис.1. Гигантская галактика туманность Андромеды, соседка Млечного Пути по Местной группе галактик. Расстояние до нее 0.7 Мпк. Мелкие точки по всему фону — звезды нашей Галактики.



Рис.2. Галактика в созвездии Гончих Псов, одна из самых красивых космических спиралей.

филаменты организованы и выстроены в глобальную квазипериодическую структуру, которую сейчас называют космической паутиной (рис.5). Она похожа еще на пчелиные соты, или на кристаллическую решетку, или на гигантские трехмерные кружева, в которых имеются более или менее регулярно повторяющиеся пустоты (войды), очерчиваемые сверхскопления-

ми и филаментами. Этот вселенского масштаба космический узор впервые обнаружили и описали Я.Э.Эйнasto и его ученики в Тартуской обсерватории еще в конце 1970-х годов. Тогда же Я.Б.Зельдович вместе с А.Г.Дорошкевичем и другими сотрудниками предложил первую теоретическую модель, объясняющую происхождение, строение

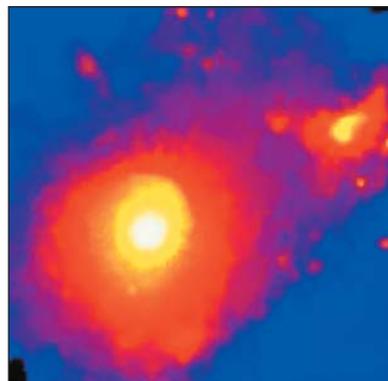


Рис.3. Скопление галактик Вирго (Дева). Изображение его центральной области (4 Мпк в поперечнике) в рентгеновских лучах. Расстояние до центра скопления 18 Мпк.

и эволюцию крупномасштабной космической паутины.

С середины 1990-х годов прогресс астрономической техники сделал доступными для наблюдений огромные объемы космического пространства с размерами в несколько гигапарсек, содержащие сотни и тысячи войдов, сверхскоплений и филаментов. Это стало возможным в первую очередь благодаря космическому телескопу «Хаббл» (рис.6), который уже два десятка лет находится на орбите вокруг Земли, а также новейшим наземным телескопам с зеркалами диаметром в 8–10 м. Вселенная впервые предстала перед нами в глобальном масштабе, так что астрономы смогли наконец увидеть ее как целое, отвлекаясь от таких «деталей» ее устройства, как сгущения и разрежения вещества любых масштабов, даже самых крупных. Оказалось, что в среднем по объемам с размером примерно 1 Гпк и больше Вселенная является однородной по распределению вещества. Объем размером в один гигапарсек часто называют ячейкой однородности в наблюдаемой Вселенной.

Согласно общей теории относительности, пространство, однородно заполненное веществом, и само должно быть однородным. Однородность — это

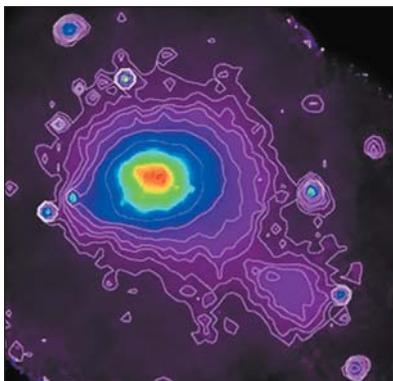


Рис.4. Скопление галактик Кома (Волосы Вероники), одно из самых крупных в наблюдаемой Вселенной. Рентгеновский снимок центральной области (6 Мпк в поперечнике).

свойство геометрической симметрии пространства. В однородном пространстве все точки равноправны, так что сдвиг в подобном пространстве от одной точки к другой оставляет результаты физических и астрономических измерений неизменными. В наблюдаемой Вселенной «точками» однородного пространства служат ячейки однородности.

Идея однородности мира как целого лежит в основе новой космологии. Она восходит к традиционным представлениям о мире, известным как коперниковский принцип, согласно которому в пространстве мира нет единого выделенного центра, а все области в нем равноправны между собой. Еще Паскаль говорил: мир — это круг, центр которого везде, а окружность нигде.

Разбегание галактик

Эйнштейн полагал, что идея однородности распространяется и на время. Если время однородно, то все моменты времени равноправны между собой. Но это означает, что в мире ничего не происходит, он всегда один и тот же в прошлом, настоящем и будущем. Это представление — тоже философского характера — не вытекало из фактов астроно-

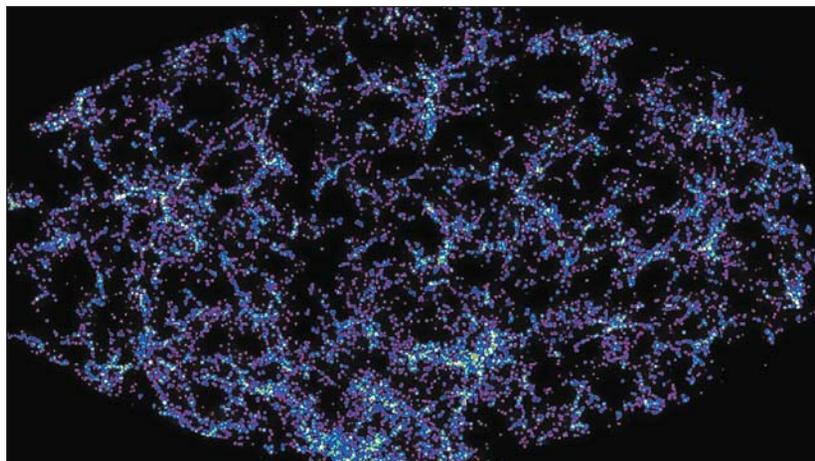


Рис.5. Карта крупномасштабной космической структуры. Каждая точка — галактика или квазар из каталога SDSS (The Sloan Digital Sky Survey) в слое толщиной 14 Мпк до расстояний 330 Мпк. Четыре главные элементы структуры — плотные скопления галактик, протяженные филаменты, уплощенные сверхскопления, или стены, и почти пустые области — войды. Все вместе они образуют квазипериодическую космическую паутину. (Из работы И. Сухоненко, Я. Эйнасто, Л. Ливамяги и др., 2011).



Рис.6. Космический телескоп «Хаббл» на орбите вокруг Земли.

мии; оно не следовало с необходимостью и из общей теории относительности. Теория допускала в действительности и другую возможность, на которую указал в 1922—1924 гг. петербургский математик А.А.Фридман*.

В космологии Фридмана пространство, как и у Эйнштейна,

* Его научная биография изложена в книге [3].

считалось однородным; но в его Вселенной не было покоя, она расширялась.

Одно из фундаментальных следствий теории расширяющегося мира — вывод, что Вселенная существует не вечно, что она возникла конечное время назад. Проявив необычайную научную смелость и редкую физическую интуицию, Фридман нашел численную оценку возра-

ста мира. Он исходил из скудных астрономических сведений, которыми тогда располагали, и сказал, что мир существует примерно десять миллиардов лет, по порядку величины. Как мы знаем, возраст мира, измеренный в наши дни с точностью до трех значащих цифр, составляет 13.7 млрд лет, — но это и есть 10 млрд лет с точностью до порядка величины.

Из модели Фридмана вытекал и ряд других следствий. Особенно важны те из них, которые допускают непосредственную проверку в астрономических наблюдениях. Самое известное — закон космологического расширения. В простейшем случае (когда скорости и расстояния не слишком велики) закон гласит: скорость удаления галактики от нас прямо пропорциональна расстоянию до нее.

Движения галактик изучают в астрономии с 1912 г., когда Слайфер приступил к выполнению обширной наблюдательной программы, целью которой было измерение скоростей близких туманностей, как тогда называли галактики. Он обнаружил, что галактики не стоят на месте, а движутся в пространстве, причем большинство из них удаляются от нас. Этот вывод

прямо вытекал из наблюдаемых спектров галактик: их движение обнаруживало себя в сдвиге спектральных линий света (известных оптикам уже тогда достаточно точно по «земным» измерениям) к красному концу спектра. Сдвиг спектральных линий в красную сторону возникает всегда, когда расстояние между источником и приемником света возрастает со временем, — таков эффект Доплера, хорошо изученный к тому времени в физике. Количественной мерой красного смещения служит относительная величина увеличения длины волны, т.е. разность зарегистрированной и исходной («лабораторной») длин волн, деленная на исходную длину волны. Ее называют просто красным смещением — как и само явление; это одна из основных наблюдаемых физических величин в космологии. Если значение красного смещения мало по сравнению с единицей, то справедлив упомянутый выше закон прямой пропорциональности скорости и расстояния.

Космическое красное смещение имеет, как впоследствии оказалось, всеобщий характер: оно наблюдается у всех галактик во Вселенной. Исключение составляют только самые близ-

кие к нам звездные системы; таковы знаменитая туманность Андромеды и несколько других (менее крупных) галактик, находящихся от нас на расстояниях, не превышающих примерно 1 Мпк. Но если расстояния больше, чем 1 Мпк, все находящиеся за этой границей галактики «разбегаются в пространстве», как говорил об этом Слайфер.

В 1927 г. Ж.Лемэтр, бельгийский математик, повторив вычисления Фридмана, вывел из них в явном виде закон космологического расширения. Что гораздо важнее, он привлек данные Слайфера о скоростях примерно трех десятков галактик и собрал опубликованные к тому времени в астрономической литературе сведения о расстояниях до них. Лемэтр показал, что скорости удаления галактик действительно пропорциональны расстояниям. Он вычислил также и величину отношения скорости к расстоянию: она составила у Лемэтра примерно 600 километров в секунду на мегапарсек (км/с/Мпк) в принятых в астрономии единицах.

Через два года к тому же результату пришел и Хаббл. Он опирался по большей части на те же наблюдательные данные, что и Лемэтр. На рис.7 воспроизводится диаграмма скорость—расстояние из работы Хаббла 1929 года. На ней каждая галактика представлена точкой в соответствии с расстоянием до нее (горизонтальная ось) и скоростью удаления от нас (вертикальная ось). Самые большие скорости достигают здесь 10 тыс. км/с (по вертикали должно быть км/с — у Хаббла опечатка). Самые малые расстояния на диаграмме составляют 0.1—0.2 Мпк, а самые большие — 2 Мпк. Скорости очевидным образом растут с расстоянием и притом почти строго по закону прямой пропорциональности. Отношение скорости к расстоянию, установленное Хабблом из этой диаграммы, практически совпадает с величиной, найденной ранее Лемэтром.

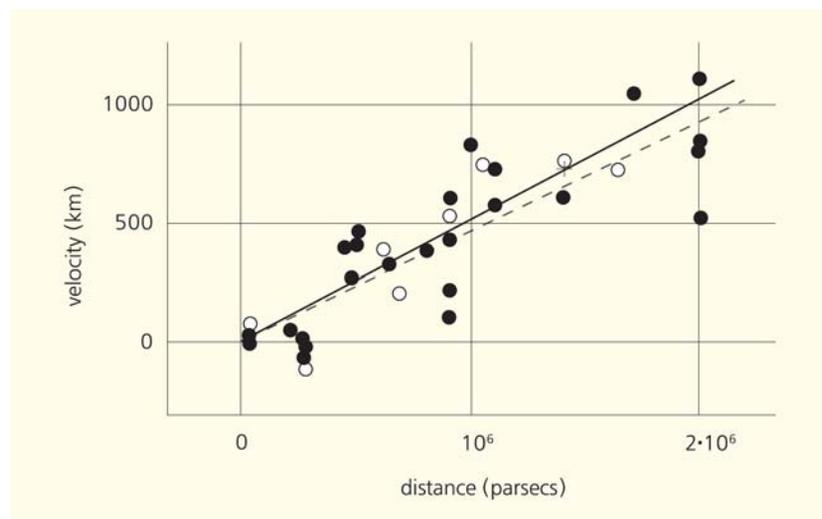


Рис.7. Диаграмма скорость—расстояние, построенная Э.Хабблом в 1929 г. Расстояния в действительности почти в 10 раз больше, чем считал тогда Хаббл. По вертикальной оси — скорость в единицах км/с.

Результаты Лемэтра и Хаббла получили подтверждение и развитие в наблюдательных работах 1930-х годов. С тех пор закон разбегания галактик носит имя Хаббла, а отношение скорости разбегающихся галактик к расстоянию до них (это отношение характеризует темп разбегания) называют постоянной Хаббла. Как позднее, через 30 лет после Хаббла, выяснил А.Сэндидж, его ученик и некогда сотрудник, все расстояния на оригинальной хаббловской диаграмме (рис.7) должны быть в действительности раз в восемьдесят больше, чем думали Лемэтр и Хаббл. Но это была систематическая ошибка, т.е. она почти одинакова для всех галактик; в результате с ее исправлением закон Хаббла не был отменен, а остался полностью в силе. После поправки Сэндиджа предельные расстояния на диаграмме возросли до 16—20 Мпк. Изменилась соответственно и постоянная Хаббла: ее значение составило у Сэндиджа 60—75 км/с/Мпк, что очень близко к значениям, которые приняты в настоящее время. Подводя в 2006 г. итог 15-летней программы наблюдений с помощью космического телескопа «Хаббл», Сэндидж и его соавторы дали для постоянной Хаббла величину 62 км/с/Мпк (с ошибкой около 10%) для огромного интервала расстояний от 2—3 до 200 Мпк. На всех этих расстояниях надежно прослеживается закон разбегания Хаббла.

Удивительное согласие прямых астрономических наблюдений с весьма абстрактной (как почти всем поначалу казалось) теорией расширяющейся Вселенной произвело сильное впечатление в 1930-е годы. Действительно, не только сам факт расширения, предсказанный теорией Фридмана, но и важнейшая закономерность этого явления — пропорциональность скорости расстоянию — были, как все считали тогда, надежно доказаны в наблюдениях. Эту точку зрения разделял Эйн-

штейн. При таких обстоятельствах он считал, что его собственная модель статической неизменной Вселенной «теперь не нужна».

Темная материя

Всего через несколько лет после работ Лемэтра и Хаббла в космологии произошло новое крупнейшее событие. В 1932 г. швейцарско-американский астроном Ф.Цвикки заметил, что кроме светящегося вещества галактик во Вселенной должны иметься еще и невидимые, «скрытые» массы, которые проявляют себя только своим тяготением. Он изучал скопление галактик в созвездии Волосы Вероники — крупном образовании, содержащем тысячи звездных систем, подобных туманности Андромеды или нашей Галактике. Галактики движутся в этом скоплении со скоростями, достигающими тысячи километров в секунду. Чтобы удержать их в объеме скопления, требуется тяготение, которое не способно создать одни только видимые, светящиеся массы самих галактик. Для этого необходимо более сильное тяготение, и, согласно подсчетам Цвикки, тут нужны дополнительные массы, которые примерно в 10 раз больше суммарной видимой массы галактик скопления.

Позднее, в 1970-х годах, усилиями астрономов СССР и США было обнаружено, что скрытые массы должны присутствовать не только в скоплениях галактик, но и в изолированных крупных галактиках. Сначала Я.Э. Эйнасто с сотрудниками, а затем В.Рубин, Дж.Острайкер, Дж.Пиблс и их коллеги выяснили, что скрытые массы образуют невидимые гало крупных галактик. Эти гало — почти сферические образования, радиусы которых в 5—10 раз превышают размеры самих звездных систем. Такая крупная галактика, как, скажем, туманность Андро-

меды или наш Млечный Путь, состоит из звездной системы, погруженной в распределение невидимой массы, которое простирается на расстояния до сотни килопарсек от центра галактики. Эти темные гало, как и дополняющие массы у Цвикки, проявляют себя только своим тяготением.

Невидимое вещество, наполняющее гало галактик и скоплений, принято сейчас называть темной материей. Скорее всего, темная материя представляет собой нерелятивистский газ стабильных (или долгоживущих) электрически нейтральных элементарных частиц, которые могут испытывать только слабое ядерное взаимодействие и, конечно, взаимодействие гравитационное. В списке элементарных частиц, которым располагает на сегодняшний день фундаментальная физика, подходящих на эту роль частиц, увы, нет. Прямой поиск «темных» частиц ведется в настоящее время в ряде крупных лабораторий мира. Не исключено также, что они могли бы проявить себя и в экспериментах на Большом адронном коллайдере (ЛНС) в Европейском центре ядерных исследований (Швейцария). На нем частицы будут разгоняться до энергий, заметно превышающих предполагаемую энергию покоя темных частиц. И если природа склонна отдавать этим частицам заметно больше (в четыре—пять раз) энергии, чем барионам, то почему бы таким частицам не рождаться в массовом порядке на ЛНС? Впрочем, последнее не так уж и очевидно. Физическая природа темной материи и темной энергии — одна из самых острых проблем современной фундаментальной физики.

Реликтовое излучение

В 1965 г. американские радиоинженеры А.Пензиас и Р.Вилсон обнаружили, что вся Вселенная пронизана излучением,

приходящим к нам изотропно, т.е. равномерно из всех направлений. Максимум в спектре этого излучения приходится на миллиметровые волны, причем сам спектр (распределение излучения по длинам волн или частотам) совпадает по форме со спектром абсолютно черного тела. Положение максимума в спектре излучения отвечает, как выяснилось, очень низкой температуре — всего около трех градусов выше абсолютно нулю. В современных наблюдениях эта температура измеряется исключительно точно: $T = 2.725$ К, с ошибкой меньше десятой доли процента. Это излучение называют микроволновым фоном Вселенной, или реликтовым излучением. Если говорить о нем на языке квантов, можно сказать, что в мире имеется равновесный газ фотонов, равномерно заполняющих все пространство. В каждом кубическом сантиметре Вселенной содержится примерно 500 реликтовых фотонов.

Это открытие было отмечено двумя Нобелевскими премиями. Первая присуждена в 1978 г. Пензиасу и Вилсону, а вторая — в 2006 г. Дж.Смуту и Дж.Маттеру, которые дали точное доказательство (в 1992 г.) того, что спектр излучения действительно является «чернотельным». Это было сделано с помощью американского спутника COBE (Cosmic Background Explorer). Кроме того, COBE измерил слабую — на уровне тысячных долей процента — анизотропию фонового излучения. Последняя представляет собой «отпечаток» первоначально слабых неоднородностей вещества ранней Вселенной, которые позднее дали начало наблюдаемым крупномасштабным космическим структурам — галактикам и скоплениям галактик.

Заметим, что космическое фоновое излучение регистрировалось еще в 1957 г. в Пулковской обсерватории с помощью антенны, построенной Т.А.Шмаоновым, С.Э.Хайкиным

и Н.Л.Кайдановским. Но увы, никто тогда не придал этому значения. Слабую анизотропию реликтового излучения первыми заметили в 1992 г. И.А.Струков и его сотрудники (Институт космических исследований РАН) с помощью российского космического аппарата «Реликт». От ГАИШ МГУ в этом эксперименте принимал участие космолог-теоретик М.В.Сажин. В обоих случаях это были достижения «нобелевского» ранга. Без Нобелевской премии остался и русско-американский теоретик Г.А.Гамов, некогда ученик профессора Фридмана по Петербургскому университету. Он предсказал существование во Вселенной реликтового излучения с температурой в несколько градусов абсолютной шкалы еще за 15 лет до его открытия.

Развивая эволюционную космологию Фридмана, Гамов предположил, что в первые мгновения существования Вселенной космическое вещество было не только очень плотным, как следовало из теории Фридмана, но еще и очень горячим. В гамовской теории горячей Вселенной* температура космической среды могла достигать столь высоких значений (многие миллиарды градусов), что тепловая энергия частиц была больше энергии связи нуклонов в атомных ядрах. При таких условиях космическая плазма представляла собой смесь протонов, нейтронов и электронов. По мере охлаждения плазмы из-за космологического расширения ее температура снижалась, и при значении около нескольких миллиардов градусов в космической среде начались термоядерные реакции (как в водородной бомбе), в ходе которых происходило образование ядер гелия-4, содержащих каждое по

* О современном развитии этой теории и, в частности, о процессах «закалки» нейтронов, нейтрино, частиц темной материи в ранней Вселенной, см. в монографии [4], а также в научно-популярной книге [5].

два протона и два нейтрона. Точный расчет, проделанный после Гамова Я.Б.Зельдовичем, Р.Вагонером и другими физиками, показал, что за первые три минуты в таком космическом термоядерном реакторе образуется примерно 25% гелия (по массе). Эта доля гелия должна сохраниться и до нынешней эпохи. На временах, превышающих три минуты, ядерный синтез прекращается: из-за быстрого космологического расширения температура вещества падает до таких значений, при которых термоядерные реакции синтеза уже не идут.

Этот теоретический расчет допускает прямую проверку: нужно сравнить результат с наблюдаемым содержанием реликтового гелия в современной космической среде. Данные наблюдений говорят, что гелия примерно 25% из всей массы вещества. Налицо полное согласие теории первичного термоядерного синтеза и реальной распространенности гелия во Вселенной. Теория хорошо объясняет также и космическую распространенность реликтовых ядер гелия-3, дейтерия и лития-7.

Эпоха первичных ядерных реакций, когда возраст мира измерялся секундами и минутами, — самый ранний момент истории Вселенной, о котором имеются надежные наблюдательные сведения [6].

Начиная с этой эпохи космологическая эволюция надежно прослеживается и строго документируется наблюдательными данными.

Сначала горячая космическая плазма находилась в состоянии термодинамического равновесия; в этом состоянии вместе с ней обязательно должно было существовать и равновесное электромагнитное излучение, т.е. газ фотонов с той же температурой, что и у горячего вещества. В ходе космологического расширения плазма охлаждалась, и при возрасте мира в 330 тыс. лет температура упала до значения примерно 3000 К,

при которой произошла рекомбинация плазмы: электроны соединились с ионами, и плазма превратилась в газ нейтральных атомов. Тогда фотоны космического излучения перестали взаимодействовать с веществом и распространялись с тех пор свободно. Они сохранили и донесли до нас картину «стенки последнего рассеяния», как об этом говорят радиоастрономы. Эти фотоны и эту «стенку» увидели открыватели реликтового излучения и исследователи его структуры.

Результат наблюдений состоит прежде всего в том, что Вселенная в первые минуты своего существования действительно была горячей. Далее, существовавшие тогда и выжившие до нашей эпохи реликтовые фотоны приходят к нам изотропно, равномерно из всех направлений в пространстве. Поэтому наблюдаемая картина — это сплошной фон, на котором почти ничего не изображено. Казалось бы, картина бедновата информацией. Однако из самого факта ее бесструктурности немедленно вытекает вывод большой важности: вещество ранней Вселенной было распределено однородно (или почти строго однородно — с точностью до тысячных долей процента) в эпоху последнего рассеяния фотонов. Но это значит, что и само пространство мира было тогда однородно, и притом практически во всех масштабах — от отдельных частиц до масштаба всей Вселенной. Изотропия реликтового фона усиливает это заключение: пространство должно быть не только однородным, но и изотропным — все направления в нем равноправны. Такое пространство обладает максимальной геометрической симметрией: оно не меняется и выглядит одним и тем же при любых сдвигах и поворотах в нем. Таким образом, с помощью реликтового излучения напрямую наблюдается и строго фиксируется физическое состояние мира и его геометрические симмет-

рии в раннюю эпоху, когда в нем еще не успели образоваться галактики. И это далеко не все из того, что способно сообщить нам реликтовое излучение.

Детальное изучение тонкой структуры реликтового излучения, начатое с помощью космических аппаратов «Реликт» и COBE, а затем успешно продолженное в последние годы по программе WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), позволило установить, что на равномерном реликтовом фоне имеется в действительности определенный «пятнистый» рисунок: это слабые (на уровне тысячных долей процента) отклонения от идеальной однородности фона. Эти отклонения представляют собой отпечаток слабых неоднородностей — сжатий и разрежений космической среды, которые (как уже упоминалось) позднее дали начало галактикам и их системам. В сжатиях температура излучения слегка выше средней — это дает яркие (относительно среднего фона) пятна, а в разрежениях — слегка ниже, и здесь возникают относительно темные пятна. Степень отклонения от фона различна от пятна к пятну и среди ярких, и среди темных пятен. В этой сложной картине запечатлены (закодированы, можно сказать) важнейшие физические характеристики как самих протогалактических неоднородностей, так и всей Вселенной.

Особенно интересны самые яркие пятна на картине реликтового фона. Двум таким соседним пятнам соответствуют два сгущения, которые в эпоху рекомбинации космической плазмы располагались на вполне определенном характерном расстоянии друг от друга. Теория образования галактик, основанная на классической работе Е.М.Лифшица (опубликованной еще в 1946 г.), говорит о том, что это характерное расстояние есть возраст мира в эпоху рекомбинации, умноженный на скорость света; этот возраст известен — 330 тыс. лет (см. вы-

ше). Линейному расстоянию между двумя сгущениями соответствует определенный угол между направлениями в пространстве на два соответствующих ярких пятна. При этом соотношение между видимым углом и собственным линейным размером зависит от того, какова геометрия пространства: в сферическом пространстве интересующий нас угол составляет полтора градуса, в гиперболическом — половину градуса, в плоском — один градус.

В наблюдениях было обнаружено, что характерное угловое расстояние между соседними яркими пятнами равно 1° (с точностью до 2%). Это означает, что трехмерное пространство, в котором происходит космологическое расширение, является плоским. Или во всяком случае практически плоским, очень близким к плоскому. Выходит, что природа предпочла самый простой вариант пространственной геометрии мира. Так стала известна геометрия трехмерного пространства, в котором движутся разбегаящиеся галактики (это пространство называют сопутствующим).

Космическое ускорение

В 1998—1999 гг. две международные группы астрономов-наблюдателей, одной из которых руководили Б.Шмидт и А.Райсс, а другой — С.Перлматтер, сообщили, что им удалось измерить не только скорости удаляющихся галактик и расстояния до них, но также — впервые в космологии — и ускорение, которое испытывают галактики в своем движении. Эта задача была принципиально невыполнима, пока дальность действия телескопов оставалась в границах ячейки однородности. Но во второй половине 1990-х годов космический телескоп «Хаббл» и другие крупнейшие астрономические инструменты позволили преодолеть этот барьер, и наблюдения вышли наконец

на истинно космологические, глобальные расстояния в расширяющемся мире.

Наблюдения на больших космологических расстояниях интересны прежде всего тем, что именно они способны напрямую подтвердить или опровергнуть космологическую теорию однородной расширяющейся Вселенной. И теория Фридмана действительно была проверена и подтверждена в новейших наблюдениях на рекордно больших расстояниях. Это было весьма значительное достижение астрономической науки. Оно, правда, не привлекло к себе большого внимания: в теории Фридмана уже давно, с середины 1930-х годов, никто не сомневается. Кроме того, сильным независимым свидетельством в пользу однородности и изотропии мира послужило открытие и исследование реликтового излучения (см. выше).

В наблюдениях на глобальных расстояниях есть и еще одна примечательная особенность. Дело в том, что закон Хаббла, как уже говорилось, применим лишь на сравнительно малых расстояниях, когда скорости разбегания галактик гораздо меньше скорости света. При таких условиях он служит простым и хорошим первым приближением, вытекающим из строгого общего соотношения между скоростью (вернее, красным смещением) и расстоянием, даваемого точной теорией космологического расширения. В следующем после закона Хаббла приближении это соотношение дает более сложную зависимость, в которую входят не только скорость и расстояние, но также и ускорение, которое испытывают разбегающиеся галактики.

Ускорение может быть, вообще говоря, как положительным, так и отрицательным. При положительном ускорении скорость удаления галактик возрастает со временем, а при отрицательном убывает. При положительном ускорении измеряемое расстоя-

ние больше, чем при отрицательном. Большее расстояние означает, что видимая яркость источника света будет в таком случае меньше. На малых расстояниях этот эффект исчезающе мал. Но на космологических расстояниях такого рода потемнение или уярчение источника света можно заметить в наблюдениях и довольно точно измерить, если воспользоваться методом, предложенным много лет назад профессором ГАИШ МГУ Ю.П.Псковским. Что и поспешилось сделать, и притом независимым друг от друга образом, двум упомянутым выше группам наблюдателей. Руководителям этих групп присуждена Нобелевская премия 2011 г. «за открытие ускоряющегося расширения Вселенной по наблюдениям сверхновых звезд» (подробнее об этом см. статью в конце номера).

Ранее считалось, что разбегание галактик может только замедляться со временем под действием их собственного взаимного тяготения, так что космическое ускорение должно быть отрицательным. Но ускоряющееся разбегание означает, что в природе имеется не только всемирное тяготение, но и «всемирное антитяготение», всеобщее отталкивание, которое стремится не сблизить галактики, а удалить их друг от друга. Более того, антитяготением преобладает над тяготением в глобальном космологическом масштабе.

О всемирном антитяготении первым сказал Эйнштейн (хотя и в других словах). В его космологической модели 1917 года притяжение всех тел природы друг к другу... отсутствовало. Ньютоновское всемирное тяготение при этом, однако, не отменялось; но помимо него в эйнштейновской модели действовал еще один силовой фактор — всемирное антитяготение, которое полностью и точно компенсировало взаимное тяготение космических тел в масштабе всей Вселенной. Ни-

чего подобного прежняя, доэйнштейновская физика не знала. Но антитяготение не вытекало в действительности и из общей теории относительности как таковой. Это была совершенно новая идея. Тем не менее она органично и в исклчительно экономной форме была введена в структуру общей теории относительности, в ее математические уравнения. Антитяготение было представлено в этих уравнениях всего одной и притом постоянной физической величиной, которая получила позднее название космологической константы. Она обеспечивала в модели Эйнштейна компенсацию всемирного тяготения — без нее теория не допускала бы статичности мира.

Эйнштейновское антитяготение присутствует и в космологической теории Фридмана. Но в ней нет точной компенсации тяготения антитяготением. Во Вселенной Фридмана антитяготение может быть и слабее тяготения, и — при определенных условиях — сильнее его. Вариант теории, при котором в современном наблюдаемом состоянии Вселенной преобладает антитяготение, стал в наши дни стандартной космологической моделью. Она очень хорошо согласуется с наблюдаемым феноменом ускоряющегося космологического расширения, да и со всем вообще комплексом современных наблюдательных данных о Вселенной как целом. В этой модели космологическая постоянная Эйнштейна выступает как главная и единственная физическая характеристика всемирного антитяготения.

В стандартной модели физическим агентом, создающим антитяготение, служит некая невидимая космическая среда, получившая название темной энергии. Считается, что она равномерно заполняет все пространство мира, а ее плотность всюду одинакова и неизменна во времени (в любой системе отсчета). По измеренной величине космического ускорения астрономы

смогли установить, что в наблюдаемой Вселенной на темную энергию приходится около 70% всей массы/энергии мира; темной материи принадлежит примерно 25% полной массы/энергии; на «обычное» вещество из протонов, нейтронов и электронов (это вещество называют барионным) остается меньше 5%, а на космическое реликтовое излучение выпадают сотые доли процента. Доля темной энергии примерно в три раза больше доли всех остальных видов космической среды. При таких обстоятельствах во Вселенной как целом всемирное антитяготение, создаваемое темной энергией, сильнее тяготения, создаваемого веществом.

Интерпретация темной энергии как макроскопической среды с постоянной плотностью (а последняя прямо выражается через космологическую постоянную Эйнштейна) восходит к Лемэтру, к его работам 1930—1940-х годов; в 1965 г. ее детально разработал Э.Б.Глинер. Темная энергия — весьма необычная среда. Начать с того, что ее плотность положительна, а давление отрицательно. Плотность у всех обычных сред положительна, но и отрицательное давление нечасто, но все же встречается в физике. При «нормальных условиях» давление в «нормальной» жидкости или газе, как правило, положительно. Но и в жидкости (например, в потоках воды у винта парохода), и в твердых телах (скажем, во всесторонне растянутой стальной болванке) отрицательное давление возникать тоже может. Это требует некоторых специальных условий, но само по себе не является чем-то исключительным. Однако в случае темной энергии ситуация совсем особая. Ее давление не только отрицательно, но к тому же равно — по абсолютной величине — плотности энергии (эти две физические величины имеют одинаковую размерность). Такого нет ни в каких жидкостях, газах или твердых телах.

Отношение плотности энергии к давлению может быть непосредственно измерено в астрономических наблюдениях. По данным на сегодняшний день, это отношение есть минус единица с точностью до 5%. С такой (очень высокой для космологии) точностью наблюдения подтверждают интерпретацию темной энергии в духе эйнштейновской космологической постоянной.

Всемирное антитяготение

Почему же темная энергия создает не тяготение, а антитяготение? Дело в том, что, согласно общей теории относительности, тяготение (точнее, искривление пространства-времени) создается не только плотностью среды, но и ее давлением. Так что «эффективная» плотность, создающая тяготение, складывается из двух слагаемых: одно из них — плотность энергии, а другое — утроенная величина давления. При той связи между давлением и плотностью, о которой мы только что сказали, эффективная гравитирующая плотность оказывается отрицательной — это две величины давления. Отсюда и антитяготение темной энергии: отрицательная эффективная плотность создает «отрицательное» тяготение. Если поместить в темную энергию две частицы, она заставит их двигаться прочь друг от друга. В отличие от всемирного тяготения, всемирное антитяготение стремится не сблизить галактики или любые другие тела природы, а, напротив, удалить их друг от друга.

Один иллюстративный количественный пример. Представим себе, что в мире нет ничего, кроме космической темной энергии и еще двух электрически нейтральных атомов водорода, которые в нее погружены. Атомы притягиваются друг к другу по закону всемирного тяготения Ньютона и отталкиваются по закону всемирного

антитяготения Эйнштейна. Оказывается, что антитяготение сильнее тяготения, если расстояние между атомами больше чем полметра.

Как заметил Глинер, темная энергия с ее необычной связью между давлением и плотностью представляет собой — по своим механическим свойствам — вакуум. Как и тривиальная абсолютная пустота, такая среда не может служить системой отсчета в механике: относительно нее движение и покой неразличимы.

О вакууме в физике говорят давно, с 1920-х годов, когда возникла квантовая механика. Из этой науки вытекает, в частности, что у всех полей и частиц природы имеется состояние минимальной энергии, которое и называется вакуумом. Как и в механике, простейший и тривиальный пример вакуума — это абсолютная пустота, т.е. состояние, когда в пространстве нет ни частиц, ни полей. Но соответствующая этому состоянию минимальная энергия полей и частиц, вообще говоря, не равна нулю. Вакуум в квантовой физике может обладать определенной собственной энергией, а также и давлением, если описывать такую среду на языке макроскопической физики. Не является ли темная энергия вакуумом всех квантовых полей и частиц Вселенной? Такой вопрос поставил Зельдович в 1968 г. [7].

Если да, то как вычислить плотность космического квантового вакуума в рамках стандартной фундаментальной физики? Эти вопросы до сих пор остаются без ответа, несмотря на многолетние усилия теоретиков. Мы не знаем, действительно ли темная энергия «стоит» из вакуумных (нулевых) колебаний квантовых полей. Никто не знает, какой физический эксперимент или астрономическое наблюдение нужно поставить и произвести, чтобы это выяснить.

Для фундаментальной физики должно быть, по-видимому,

очень важным, однако, уже и то обстоятельство, что измеренная астрономами плотность темной энергии служит абсолютным верхним пределом суммарной плотности вакуума всех видов полей и частиц природы (и притом в любой системе отсчета). Но что в действительности вытекает из этого обстоятельства? И почему этот верхний предел плотности имеет именно то значение, которое найдено в наблюдениях в 1998—1999 гг.? На эти вопросы тоже нет ответа*.

Темная энергия вблизи нас

Если темная энергия действительно описывается эйнштейновской космологической постоянной, то она присутствует всюду в пространстве и ее плотность везде одинакова. Можно ли это проверить в физических экспериментах или астрономических наблюдениях? Лабораторные эксперименты вряд ли возможны — эффект антитяготения слишком слаб в земных условиях. В 2000 г. астрономы ГАИШ МГУ выдвинули предположение о том, что динамический эффект темной энергии может быть весьма сильным в масштабе групп и скоплений галактик. Предположение подкреплялось теоретической моделью, ориентированной на Местную группу галактик (рис.8). Эта группа включает в себя нашу Галактику и другую гигантскую галактику — уже упоминавшуюся выше туманность Андромеды (рис.9). Вместе с ними в состав группы входит еще примерно 50 менее крупных или вовсе карликовых соседей. Группа считается гравитационно связанной и квазистационарной. Ее полная масса оценивается астрономами в несколько триллионов масс Солнца. Галактики группы заполняют более или менее сферический объем радиусом примерно в

один мегапарсек. Вне этого объема и вокруг него наблюдается более двух десятков карликовых галактик на расстояниях до 3 Мпк от центра масс группы. Все эти внешние галактики удаляются от Местной группы, образуя поток разбегания, в котором скорость галактик (в системе центра масс группы) тем больше в среднем, чем дальше они от центра группы.

В модели, разработанной в ГАИШ МГУ совместно с астрономами Санкт-Петербургского государственного университета, Университета Турку (Финляндия) и Университета штата Алабама (США), принимается, что группа и поток погружены в однородный фон темной энергии. На каждую галактику группы и потока действуют две силы: ньютоновская сила притяжения и эйнштейновская сила отталкивания. Первая преобладает в группе, а вторая — в потоке. Границей между группой и потоком служит в модели «сфера нулевого тяготения», на которой тяготение и антитяготение точно компенсируют друг друга. Из данных о полной массе вещества в группе и плотности темной энергии вытекает, что радиус сферы нулевого тяготения составляет примерно 1 Мпк. Вне этой сферы, в области потока, где доминирует антитяготение, движения галактик-карликов происходят с положительным ускорением. Ускоряясь, поток разбегания приобретает регулярный характер: он стремится выйти на закон прямой пропорциональности скорости и расстояния. Отношение скорости к расстоянию (характеризующее темп расширения) стремится к постоянной величине в 62 км/с/Мпк. Модель позволяет предсказать также, что в потоке существует минимальная скорость, которая служит — на каждом данном расстоянии — нижним пределом скорости разбегающихся галактик.

Местная группа и поток разбегания вокруг нее стали недавно предметом специальных вы-

сокоточных наблюдений, проводимых И.Д.Караченцевым в Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН в сотрудничестве с астрономами Украины, Германии и США. Результаты, полученные, в частности, с использованием 6-метрового телескопа САО РАН и космического телескопа «Хаббл», представлены в виде диаграммы скорость—расстояние на рис.10. На диаграмме показаны и галактики группы, и галактики потока. Первые находятся на расстояниях до 1 Мпк и имеют как положительные (движение прочь от центра группы), так и отрицательные (к центру) радиальные скорости, причем сколько их движется в сторону центра, столько же (практически) и удаляется от него. Галактики потока имеют только положительные скорости. В этом очень малом по космологическим меркам масштабе наблюдаемый поток раз-

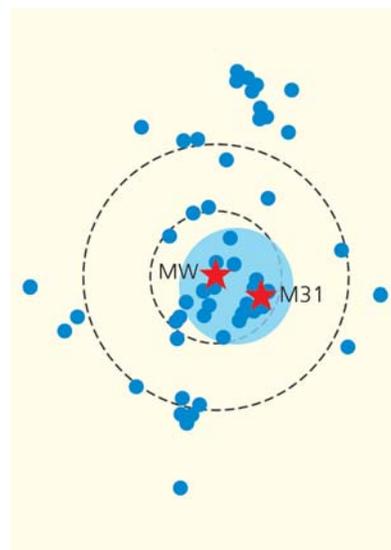


Рис.8. Карта Местной группы галактик и ее окрестностей (И.Д.Караченцев и др., 2004). Показаны Млечный Путь (MW), туманность Андромеды (M31) и несколько других крупных галактик группы; они располагаются внутри круга радиусом примерно в 1 Мпк. Вне этого круга — галактики-карлики, удаляющиеся от центра группы; это местный поток разбегания галактик — миниатюрная копия глобального космологического разбегания галактик.

* Подробнее о ключевых нерешенных проблемах современной астрофизики и космологии см. в работах [8—11].

бегания довольно близко следует, как можно видеть, закону Хаббла. Отношение скорость—расстояние (постоянная Хаббла) находится в пределах 60—75 км/с/Мпк, которое не так уж далеко от асимптотического значения, найденного в модели (62 в тех же единицах). Эта локальная постоянная Хаббла близка также и к глобальной постоянной Хаббла (70—72 км/с/Мпк), известной по наблюдениям в космологических масштабах.

Группа Караченцева провела (также с помощью космического телескопа «Хаббл») наблюдения двух близких групп галактик — группы Cen A и M81 с их окрестностями. Эти системы похожи на Местную группу. Данные о всех трех системах полностью согласуются с описанной выше моделью. В частности, измеренные скорости разбегания в потоке удовлетворяют условию минимальной скорости.

Более того, наблюдения вместе с моделью позволили дать первую эмпирическую оценку локальной плотности темной энергии. Действительно, если известна масса группы, а значение радиуса нулевого тяготения можно найти по диаграмме скорость—расстояние, то комбинация этих наблюдаемых величин способна дать значение плотности темной энергии в области локального потока. Оказалось, что оно приближенно (если не строго) совпадает с глобальным значением, найденным в глобальных космологических наблюдениях. Те же результаты найдены недавно для двух систем масштаба скопления галактик — для скопления Вирго с потоком разбегания вокруг него (рис.11) и скопления Форнакс с его потоком разбегания. Поток простирается в этих случаях до расстояний в 25—30 Мпк от центра соответствующего скопления, как видно из диаграмм скорость—расстояние, впервые построенных для данных систем группой Караченцева.

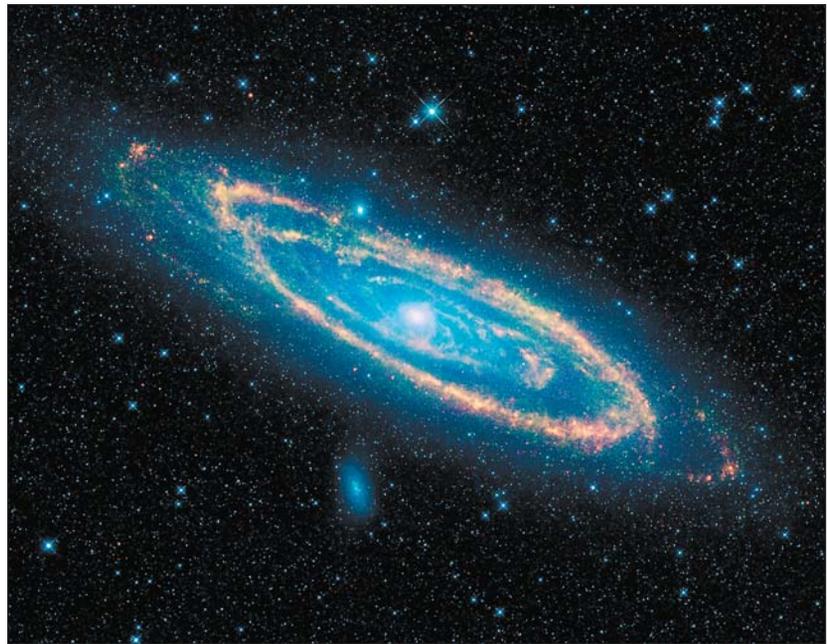


Рис.9. Еще один взгляд на туманность Андромеды.

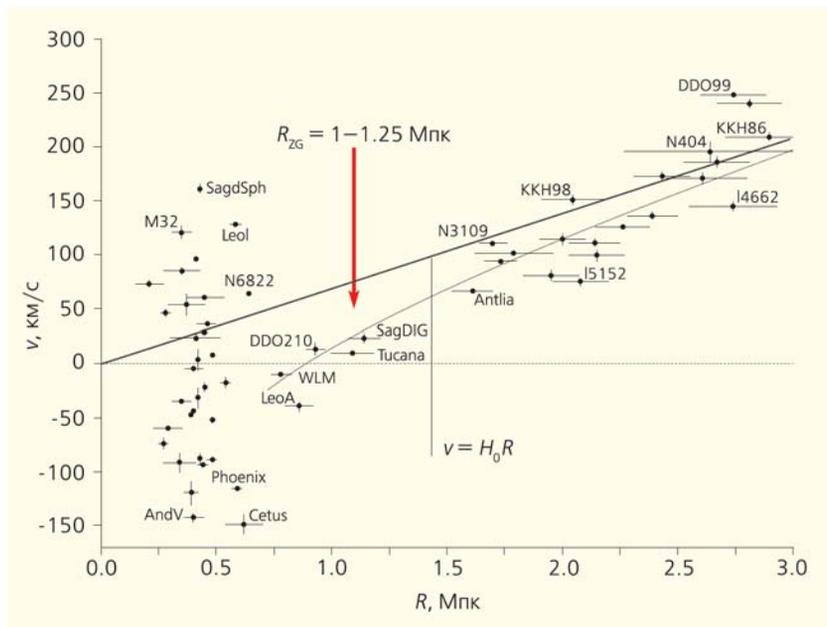


Рис.10. Диаграмма скорость—расстояние для Местной группы галактик и потока разбегания галактик-карликов вокруг нее (И.Д.Караченцев и др., 2009). Здесь $R_{zg} = 1-1.25$ Мпк — радиус нулевого тяготения, т.е. расстояние от центра группы, на котором тяготение вещества группы точно компенсируется антитяготением фона темной энергии. Гравитационно-связанная группа находится внутри сферы радиуса R_{zg} , где преобладает тяготение. Вне этой сферы располагаются удаляющиеся от группы галактики-карлики; для них антитяготение (т.е. отталкивание от центра группы) сильнее, чем притяжение к ней. Тонкая линия — средняя линия потока; толстая — закон Хаббла с «универсальной» постоянной $H_0 = 62$ км/с/Мпк, которая определяется только плотностью темной энергии. С увеличением расстояния от центра средняя линия приближается к хаббловской прямой.

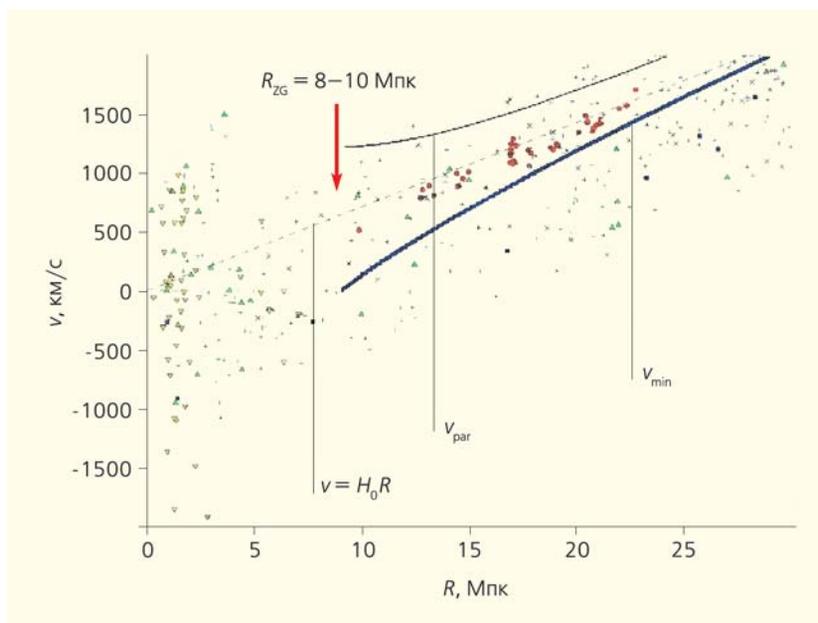


Рис.11. Диаграмма скорость—расстояние для скопления галактик Вирго и потока разбегания галактик вокруг него (И.Д.Караченцев и др., 2010). Скорости и расстояния большинства галактик определены со значительными ошибками. Точные определения с помощью космического телескопа «Хаббл» обозначены жирными красными точками. Гравитационно-связанное квазистационарное скопление расположено внутри сферы радиуса R_{ZG} , а вне ее — поток разбегания галактик. В объеме группы преобладает тяготение, а вне его — антитяготение. Показаны хаббловская прямая для потока с универсальным значением постоянной H_0 , а также даваемые теоретической моделью кривая минимальной скорости потока v_{min} и кривая параболического (с нулевой полной механической энергией) v_{par} движения. Видно, что красные точки находятся вблизи хаббловской прямой и не выходят за пределы области, ограниченной кривыми для v_{min} и v_{par} .

Таким образом, новейшие высокоточные наблюдения пяти близких галактических систем свидетельствуют: идея Эйнштейна о всемирном антитяготении выдерживает прямую проверку

в локальных астрономических наблюдениях.

Локальные потоки разбегания — и потоки вокруг близких систем, и движения галактик, открытые и изученные на заре космо-

мологии Слайфером, Лемэтром и Хабблом, — оказываются феноменом космологической природы, так как их динамикой управляет в основном та же сила всемирного антитяготения, что ускоряет глобальное космологическое расширение. Закон Хаббла, найденный Лемэтром и Хабблом, был в этом смысле первым эмпирическим указанием на присутствие в мире темной энергии. По сути они открыли не глобальное расширение Вселенной, как все еще принято считать, а всемирное антитяготение и темную энергию.

* * *

За первые 100 лет своего существования космология превратилась из области абстрактных и почти фантастических, как многим казалось, занятий на далекой периферии тогдашней науки в одно из центральных направлений естествознания XXI в. Она обладает надежным наблюдательным фундаментом, на котором строится и развивается теория, прочно связанная со всей современной физикой, включая общую теорию относительности, ядерную физику и физику элементарных частиц. Современная космология дает широкую, богатую и согласованную картину мира, которая становится сейчас неотъемлемой частью общей культуры человечества. Золотой век космологии продолжается. ■

Литература

1. Новиков И.Д., Шаров А.С. Человек, открывший взрыв Вселенной. М., 1989.
2. Ефремов Ю.Н. Звездные острова, Фрязино, 2005.
3. Тротт Э.А., Френкель В.Я., Чернин А.Д. Александр Александрович Фридман. Труды и жизнь. М., 1988; 2006.
4. Горбунов В.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва. М., 2007.
5. Сажин М.В. Современная космология в популярном изложении. М., 2002.
6. Вейнберг С. Первые три минуты. М., 1982.
7. Зельдович Я.Б. Космологическая постоянная и теория элементарных частиц // Успехи физ. наук. 1968. Т.95. №2. С.209—217.
8. Черпащук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. Фрязино, 2003.
9. Черпащук А.М., Чернин А.Д. Горизонты Вселенной. Новосибирск, 2005.
10. Чернин А.Д. Космический вакуум // Успехи физ. наук. 2001. Т.171. №10. С.1153—1175.
11. Чернин А.Д. Темная энергия и всемирное антитяготение // Успехи физ. наук. 2008. Т.178. №3. С.267—300.

Луна: исследование и освоение Вчера, сегодня, завтра, послезавтра

Если у тебя спрошено будет: что полезнее, Солнце или месяц — ответствуй: месяц. Ибо солнце светит днем, когда и без того светло.

Козьма Прутков

Л.М.Зеленый, В.В.Хартов, И.Г.Митрофанов, В.П.Долгополов

Эту статью следует начать с вопроса: можно ли представить себе будущее развитие земной цивилизации без освоения и использования Луны? По нашему мнению, ответом должно быть категорическое «нет». Двойная система Земли и Луны — достаточно уникальный астрономический объект, в котором небольшая по массе планета обладает удивительно массивным спутником на относительно небольшом расстоянии от нее. Есть веские основания полагать, что древние гигантские приливы, вызываемые Луной, которая 4 миллиарда лет назад находилась к Земле гораздо ближе, сыграли важную роль в зарождении земной жизни.

Секреты привлекательности

Поверхность Луны получает такой же поток солнечной энергии, как и Земля. Состав лунных минералов разнообразен и вполне пригоден для освоения и промышленного использования. На Луне нет атмосферы, но в окрестности ее холодных полюсов есть районы, где температура не поднимается выше -200°C и где в течение сотен миллионов лет откладывались летучие соединения. Огромные их запасы включают и обычный (водяной) лед, что позволит создать обитаемые комплексы

© Зеленый Л.М., Хартов В.В., Митрофанов И.Г., Долгополов В.П., 2012



Лев Матвеевич Зеленый, академик, директор Института космических исследований РАН, профессор Московского физико-технического института. Научные интересы связаны с плазменными процессами в космической среде, физикой и эволюцией Солнечной системы. Член ряда международных научных организаций. Руководитель проектов «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс». Член редколлегии «Природы».



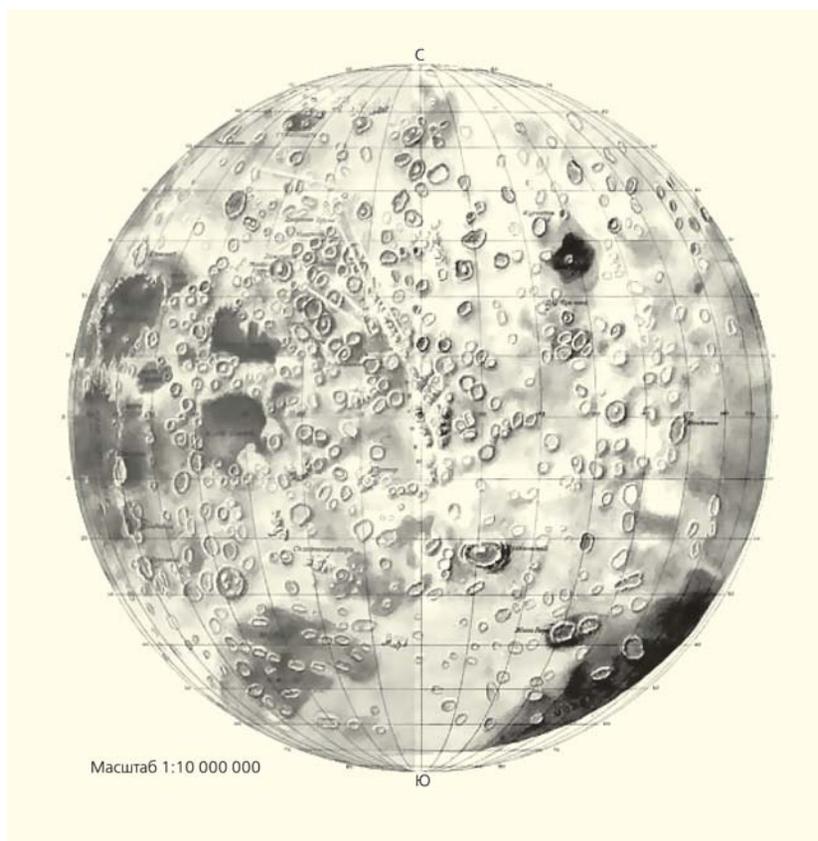
Виктор Владимирович Хартов, доктор технических наук, генеральный директор и генеральный конструктор ФГУП «НПО им.С.А.Лавочкина». Лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники (2008), заслуженный конструктор РФ. Специалист по автоматическим космическим аппаратам.



Игорь Георгиевич Митрофанов, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией космической гамма-спектроскопии ИКИ РАН. Область научных интересов — астрофизика высоких энергий и ядерная планетология. Руководитель российских экспериментов ХЕНД, ЛЕНД и ДАН на борту автоматических межпланетных аппаратов НАСА.



Владимир Павлович Долгополов, главный конструктор по направлению «Лунная программа» Центра планетных исследований ФГУП «НПО им.С.А.Лавочкина». Занимается конструированием автоматических космических аппаратов.



Первая карта обратной стороны Луны, полученная советской автоматической лунной станцией.

лунных баз с полностью автономным циклом жизнеобеспечения. Гравитация Луны гораздо меньше земной, но ее вполне хватит, чтобы, обеспечив привычную для людей силу тяжести, поддерживать физиологический тонус участников продолжительных лунных экспедиций. Наконец, размещение обитаемых комплексов под поверхностью на глубине всего нескольких метров полностью решит самую сложную проблему дальних космических полетов за пределами земной атмосферы и магнитосферы — обеспечение защиты экипажа от космических лучей и солнечной радиации. Сравнивая условия работы космонавтов-исследователей на лунной базе и на орбитальной станции на низкой околоземной орбите, можно утверждать: в перспективе условия на Луне окажутся гораздо более безопасными и комфортными.

Освоение человечеством Солнечной системы, предсказанное нашим соотечественником К.Э.Циолковским сто лет тому назад, уже началось и будет неуклонно продолжаться. Наиболее интересным (и, скорее всего, последним в обозримой исторической перспективе) стратегическим рубежом этого освоения, безусловно, станет Марс, природная среда которого вполне пригодна для целенаправленного преобразования в аналог земной. Вероятно, через несколько веков на Марсе будет присутствовать колония людей. Однако в ближайшие десятилетия марсианские исследования могут проводиться только с помощью автоматических станций — современная космонавтика пока не готова к пилотируемым экспедициям на красную планету. Прежде всего необходимо исключить риск радиационного поражения экипажей во

время длительного межпланетного перелета. Кроме того, чтобы понять, что нас ожидает на Марсе, нужно проверить, существуют ли там какие-то, вероятно примитивные, формы внеземной жизни. Современные исследователи активно работают над этими вопросами, но пройдет еще несколько десятков лет, пока вопрос организации пилотируемых полетов к Марсу сможет перейти в практическую плоскость. Многие же научные и инженерные проблемы будущей марсианской космической программы могут быть решены и технически отработаны в ходе освоения Луны.

С точки зрения фундаментальной науки Луна до сих пор хранит множество загадок. Достаточно сказать, что до сей поры нет единой общепризнанной модели образования нашей ближайшей соседки. Имеющиеся экспериментальные данные противоречивы и не позволяют однозначно отдать предпочтение какой-либо из нескольких существующих теорий.

Не совсем ясно и происхождение летучих веществ, в том числе и водяного льда, в полярных областях Луны. Принесены ли они туда кометами, образовались ли в результате химических реакций лунных минералов с частицами солнечного ветра или являются продуктом каких-либо процессов в лунных недрах, сказать пока сложно.

Лунные исследования в следующие 10—15 лет должны, на наш взгляд, стать центральными в отечественной космической программе и заложить на ближайшие десятилетия научно-инженерный фундамент освоения Луны. В лунных проектах наилучшим образом сочетаются пилотируемая космонавтика и исследования автоматическими аппаратами, что принципиально важно именно для российской программы космических исследований.

Рассмотрим вкратце основные задачи изучения и освоения Луны, современное состояние

лунной космонавтики, а также возможные сценарии российской лунной программы в ближайшей исторической перспективе.

Цели и средства: прежде и теперь

Общепризнанно, что лунная гонка СССР и США в 60–70-х годах прошлого века стала мощным стимулом развития отечественной и мировой космонавтики. Наш пилотируемый космический корабль «Союз» был создан в качестве лунного перелетного модуля. Тяжелый ракетоноситель «Протон» был также разработан для лунной программы. Ракетные двигатели, сконструированные для лунного ракетносителя Н-1, остаются востребованными как для современных, так и для перспективных ракет.

Нашей стране принадлежат четыре пионерских результата в освоении Луны. Это получение первой фотографии обратной стороны Луны («Луна-3», 1959), первая мягкая посадка на Луну («Луна-9», 1966), первая автоматическая доставка на Землю лунного вещества («Луна-16», 1970) и создание первого автоматического лунохода («Луна-17», 1970).

И хотя первыми людьми, ступившими на поверхность спутника Земли, стали американские астронавты («Аполлон», 1969), отечественные достижения XX в. безусловно сохраняют свое значение и дают основу возрождения российской лунной программы века XXI.

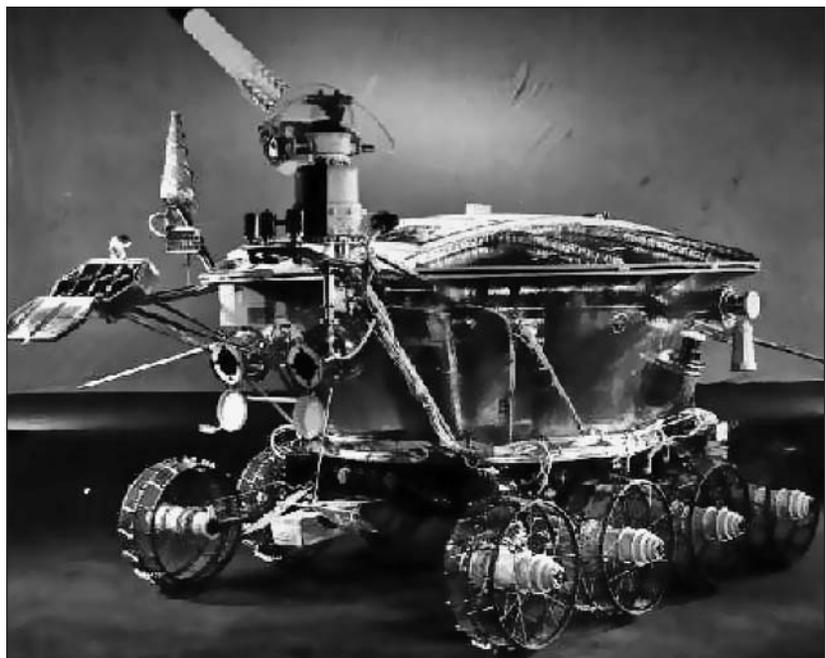
Второй виток лунной гонки (во многом уже не в соперничестве, а в сотрудничестве) начался в 90-е годы прошлого века. Он связан с обнаружением признаков легучих (в том числе и водяного льда) внутри постоянно затененных областей (находящихся, как правило, в кратерах) в приполярных областях Луны, где солнечные лучи падают на поверхность почти по ка-



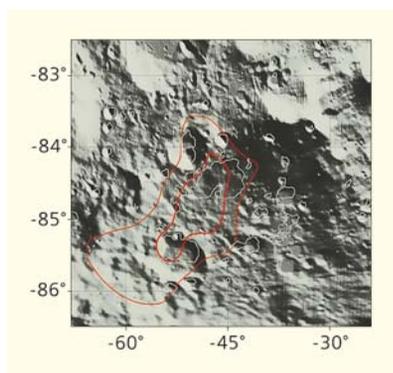
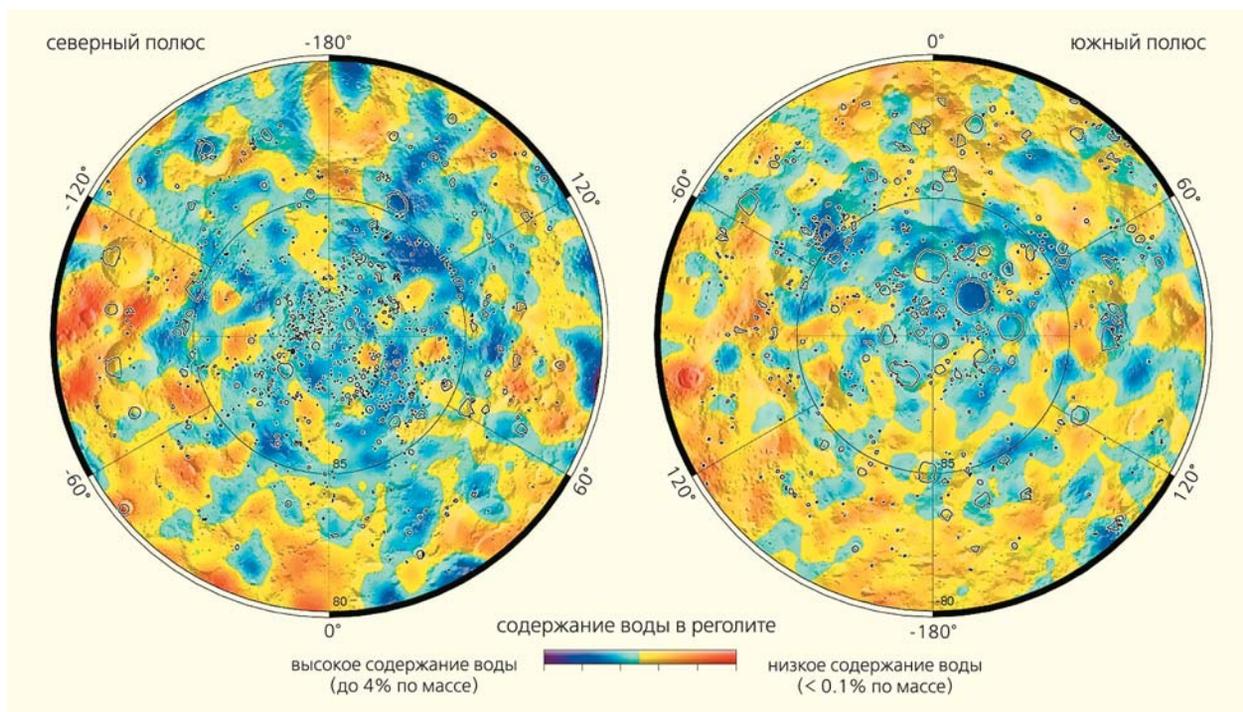
Капсула автоматической лунной станции «Луна-20», доставившая на Землю образцы лунного грунта во второй раз (1972).

сательной. Этот весьма интересный научный результат не имел, как тогда казалось, прямого практического выхода — посадка космического аппарата в такой темной области, лишенной потока солнечной энергии, представляла бы собой сложнейшую техническую задачу с точки зрения энергообеспечения техники («mission impossib-

le», как ее характеризовали наши американские коллеги). Но ситуация в корне изменилась, когда российский нейтронный прибор «ЛЕНД» («Lunar Exploration Neutron Detector» — «Лунный исследовательский нейтронный детектор»), и поныне работающий на борту американского космического аппарата «ЛРО» («Lunar Reconnaissance Or-



Первый автоматический Луноход («Луна-17»).



«Новая Луна XXI века»: содержание воды в реголите полярных районов Луны. Данные российского прибора «ЛЕНД» на борту спутника НАСА «ЛРО» (руководитель эксперимента И.Г.Митрофанов).

Отдельно показана окрестность южного полярного кратера Кабеус. Оттенками серого цвета изображен рельеф Луны по данным лазерного высотомера «ЛОЛА», белые контуры показывают границы постоянно затененных районов, красные контуры — границу и центральную область района повышенной концентрации водяного льда в лунном реголите этого кратера по данным прибора «ЛЕНД». Наличие около 5% по массе водяного льда в обнаруженной области «вечной мерзлоты» было подтверждено прямым определением состава лунного вещества в активном эксперименте НАСА «ЛКРОСС».

biter» — «Лунный разведывательный спутник»), провел измерения содержания водяного льда в поверхностном слое лунного реголита с гораздо более высоким пространственным разрешением. Оказалось, что летучие вещества, в том числе и водяной лед, могут находиться в небольших полярных областях лунной «вечной мерзлоты» как внутри, так и вне постоянно затененных областей вблизи полюсов Луны. Это сразу сделало возможным (mission is possible) прямое экспериментальное исследование данных веществ посадочными аппаратами in situ. Для организации такой экспедиции надо выбрать приполярный

район, где удовлетворяются сразу три условия:

- обеспечивается освещение Солнцем, как можно более продолжительное в течение одних лунных суток, одной лунации;

- существуют длительные периоды радиовидимости Земли, необходимые для управления аппаратом и передачи собранной информации;

- присутствует реголит с заметными включениями водяного льда, причем прямо под «ногами» севшего на поверхность аппарата.

Такие районы в приполярных областях Луны действительно есть, хотя их и очень не-

много. Открылся новый фронт работ, что было учтено в Федеральной космической программе на 2006—2015 гг. Научные исследования, планируемые в ее рамках, нацелены не только на решение текущих задач изучения Луны, но и создают фундамент будущего практического освоения нашего естественного спутника. Здесь можно выделить три самых актуальных цели.

Во-первых, как уже говорилось, очень важно детально изучить состав лунного полярного реголита. В отложениях летучих, если они действительно доставляются кометами и астероидами, может быть закодиро-

вана естественная хроника глобальных процессов эволюции солнечной системы за все время ее существования. Если споры простейших организмов внеземного происхождения переносятся между звездными системами под ледяными панцирями межзвездных комет, эти споры должны присутствовать и в веществе лунных полюсов. Изучение полярного реголита высокоточными методами в земных лабораториях может раскрыть тайну происхождения жизни на Земле и — в целом — в нашей Галактике. С другой стороны, разработка технологии добычи и переработки грунта непосредственно на Луне — необходимое условие будущего использования летучих соединений на борту лунной станции и лунных транспортных средств.

Во-вторых, нужно изучить физические условия на поверхности полярной Луны и процессы в полярной экзосфере. Эти условия могут существенно отличаться от аналогичных на умеренных широтах. Дело в том, что в окрестности лунных полюсов плазма солнечного ветра движется почти по касательной к поверхности, и локальные особенности рельефа вносят существенный вклад в процесс взаимодействия этой плазмы с грунтом. Например, явления в плазменной и пылевой экзосфере могут зависеть от переменного электрического поля на границе освещенных и затененных участков поверхности. Не менее важен вопрос о радиационной обстановке на лунной поверхности в условиях спокойного и активного Солнца. Наблюдение и краткосрочное прогнозирование солнечной активности будет весомым практическим результатом этих исследований.

В-третьих, необходимо обследовать с орбиты и непосредственно с поверхности наиболее благоприятные районы возможного размещения постоянно действующей лунной базы

и начать создавать на одном из них элементы космической инфраструктуры, обеспечивающей транспортные операции, энергоснабжение обитаемого комплекса и связь. Вероятно, эти районы должны располагаться в окрестности лунных полюсов, поскольку именно там лунный реголит имеет относительно высокое содержание водяного льда и период освещенности Солнцем максимален (что требуется для эффективной работы солнечных энергетических установок). Место расположения лунной базы должно также быть интересным как для научных исследований самой лунной поверхности в его окрестности, так и для размещения солнечных, геофизических и астрономических обсерваторий (основную часть времени эти обсерватории будут работать в автоматическом режиме, но космонавты должны иметь возможность проводить их техническое обслуживание и настройку приборов).

Очевидно, что такая обширная совокупность требований к выбору районов размещения базы уменьшает число потенциально интересных областей до нескольких единиц. Именно эти области станут объектами особого внимания для будущих покорителей Луны, и участие нашей страны в данных изысканиях, безусловно, отвечает национальным интересам.

Начало положено

На первом этапе лунной программы решать указанные задачи будут автоматические исследовательские станции, которые обеспечат проведение исследований Луны — глобальных (с орбиты) и локальных (непосредственно на поверхности в самых привлекательных районах).

В первом десятилетии текущего века практически все ведущие космические агентства начали реализацию подобных

проектов, имея в виду перспективу перейти на основе полученных результатов от исследовательских задач к задачам освоения. На окололунной орбите успешно отработали лунные спутники Японии «Кагуяя», Индии «Чандрайян-1» и два спутника Китая «Чанг'Е» (начав своеобразную азиатскую лунную гонку теперь уже XXI века). Сейчас вокруг Луны летает американский исследовательский спутник «ЛРО» и на пути к Луне находятся два исследовательских аппарата НАСА «Грайл». Европейское космическое агентство разрабатывает спускаемый аппарат для высокоточной посадки в районе лунного полюса, а в Японии создают интеллектуальный луноход для исследования лунной поверхности.

Последним лунным проектом нашей страны была автоматическая станция «Луна-24» 1976 г. Провести первые исследования по перечисленным проблемам в текущей национальной космической программе России призваны два проекта — «Луна-Ресурс» и «Луна-Глоб». Первый — совместный с Индией; в его рамках наша страна должна доставить в южный полярный район спускаемый аппарат с индийским луноходом на борту. В проекте «Луна-Глоб» будут созданы отечественные автоматические аппараты: орбитальный (для дистанционного изучения поверхности, подповерхностных областей, экзосферы Луны, ее гравитационных и магнитных аномалий) и спускаемый (со специальной криогенной бурильной установкой для исследования летучих веществ; их рассчитывают найти на глубинах 1,5—2 м от поверхности). Предполагается, что этот посадочный аппарат будет отправлен уже на противоположную, северную полярную область Луны. Оба проекта планируются пока на 2014—2015 гг., и в случае их успешного выполнения наша страна фактически восстановит

свои позиции в исследованиях нашего спутника автоматическими станциями после почти 40-летнего перерыва. Возникает вопрос — а что потом?

Взгляд в будущее

Очевидно, что лунная программа России не должна завершиться после выполнения проектов «Луна-Глоб» и «Луна-Ресурс». Ее должны продолжить автоматические лунные станции следующего поколения, которые будут разработаны для проведения взаимно-согласованной последовательности исследовательских проектов, направленных на достижение основной цели — начала пилотируемых экспедиций к Луне и первых этапов программы ее освоения.

Успех проектов «Луна-Ресурс» и «Луна-Глоб» позволит

восстановить технологии отечественных лунных автоматических станций, в том числе мягкой посадки на Луну и обеспечения продолжительной работы аппарата в условиях длительной лунной полярной ночи. Научные эксперименты, которые будут проведены на этих станциях, дадут возможность выяснить состав летучих соединений в лунном полярном реголите и выбрать наиболее перспективные районы для следующих шагов в освоении Луны.

А следующие шаги (проект «Луна-Ресурс 2.1»), которые необходимо сделать уже (ориентировочно) в 2016—2020 гг., связаны с проведением продолжительной автоматической экспедиции в один из полярных районов с использованием лунохода длительной эксплуатации (до пяти лет) и большого (до 50 км) радиуса действия. Основной задачей лунохода станет

сбор наиболее интересных образцов вещества для последующей доставки на Землю. Эти образцы должны отбираться с глубины, достигающей по крайней мере 2 м, для чего пригодится бурильная установка, разработанная и испытанная в рамках проекта «Луна-Глоб». Добытые образцы будут сортироваться аналитическими приборами на борту для отправки на Землю. Число отобранных образцов вещества из различных районов Луны должно составлять минимум шесть-семь единиц.

Во время работы лунохода предполагается провести отработку высокоточной посадки экспериментального спускаемого аппарата в окрестности расположения лунохода и с использованием сигнала-пеленга с его борта. После посадки могут быть проведены совместные научные и технологические эксперименты лунохода с посадочным аппа-



Проекты первого этапа лунной программы.

ратом (механическая и электрическая стыковка, совместное обеспечение выживания аппаратов в условиях лунной ночи, совместный предварительный анализ большого числа образцов грунта и др.). Также планируется отработать процедуры перегрузки грузов с борта лунохода на борт спускаемого аппарата и создать первую многомодульную исследовательскую станцию на поверхности Луны, которая будет иметь общие системы энергопитания, связи с Землей и обеспечения теплового режима.

Следующий шаг — проект «Луна-Ресурс 2.2» — связан с завершением мобильных исследований полярной Луны с борта лунохода и доставкой на Землю отобранных образцов лунного полярного грунта. Сначала луноход доставит собранный груз в район посадки следующего посадочного аппарата, состыкуется с ним и перегрузит на него капсулы с отобранными образцами. С борта посадочного аппарата стартует возвратная ракета для доставки образцов на Землю. После старта ракеты луноход может продолжить научные и технологические эксперименты как в автономном режиме, так и в составе обсуждаемой сейчас совместной российско-европейской автоматической станции.

В заключение упомянем серьезную проблему, осложняющую работу техники на Луне, — наличие большого количества пыли. Для защиты от нее механизмов и конструкций посадочных аппаратов будет использован успешный опыт работы луноходов и экспедиций программы «Аполлон». Чтобы разобраться с физикой пылевых процессов на Луне, в состав комплекса научной аппаратуры обоих посадочных аппаратов входит прибор «ПМЛ» («Пылевой мониторинг Луны»), кото-

рый произведет измерения характеристик пылевых частиц (их распределения по размерам и заряду), а также исследует электростатические поля, возникающие вблизи аппарата за счет зарядки частиц пыли солнечным излучением.

Итак...

Выполнение предложенной программы позволит:

- получить фундаментальные научные знания о полярных районах Луны, о процессах возникновения и эволюции Луны, о ранних этапах образования и эволюции Солнечной системы (эти результаты позволят планировать как дальнейшие научные космические исследования на лунных полярных полигонах и на окололунной орбите, так и будущие пилотируемые экспедиции);

- построить научно-инженерную модель поверхности и экзосферы лунных полярных районов и исследовать наличие и распространенность летучих соединений в полярном реголите (эта информация станет научно-технической базой для освоения Луны человеком, для создания элементов лунной космической инфраструктуры);

- воссоздать в России на современном уровне технологии лунной посадки, продолжительной работы аппаратов на поверхности Луны, технологии мобильных исследовательских экспедиций на автоматических долгоживущих луноходах большого радиуса действия и технологии возврата космических аппаратов с Луны на Землю — ключевые для освоения Луны (наличие этих технологий у России гарантирует доступ к лунным ресурсам, если такая задача будет поставлена перед космической отраслью; ясно также, что этот технологичес-

кий задел необходим для решения сходных задач изучения Марса, астероидов, спутников Юпитера и Сатурна);

- организовать сотрудничество с зарубежными странами, что позволит России сэкономить значительные средства и сосредоточить свои усилия на разработке наиболее перспективных космических технологий, в которых у нашей страны имеется опыт и технологический задел (бурение и добыча реголита, технологии лунохода, создание радиоизотопных источников энергии, возврат аппарата с Луны на Землю).

Проекты исследования Луны автоматическими космическими аппаратами, о которых здесь шла речь, уже включены (с той или иной степенью проработанности) в Федеральную космическую программу и представляют, на наш взгляд, первый и совершенно необходимый этап государственной программы освоения Луны. Следующие этапы этой программы связаны уже с пилотируемыми полетами и должны обстоятельно обсуждаться в последующих публикациях. Как мы уже отмечали выше, именно при решении лунных задач наиболее эффективно объединяются самые сильные стороны отечественной пилотируемой космонавтики с громадным опытом исследований на автоматических космических аппаратах.

В будущей статье мы планируем представить наши предложения по составу научных экспериментов, которые имеет смысл поставить на российском лунном полигоне. Уверены, землян на Луне ждет неперенный успех!

А читателям, которым интересны детали истории лунных исследований, советуем полистать архив «Природы» — на страницах журнала она подробно отражена. ■

Вклад космической медицины в здравоохранение

А.И.Григорьев

Космическая медицина с начала своего становления тесно взаимодействует с медициной земной. Ее основные исследования направлены на изучение влияния на организм человека факторов космического полета, выяснение механизмов адаптации в ответ на воздействие этих факторов, создание и совершенствование средств медицинского обеспечения космических полетов. Для решения этих задач проводятся разносторонние систематические научные исследования в космосе и на Земле, создаются новые медицинские технологии, методы и уникальная бортовая аппаратура, отвечающие высоким требованиям эксплуатации в космосе (надежность, компактность, автономность и эргономичность). Эти достижения чрезвычайно важны для клинической и профилактической медицины и способствуют внедрению технологий космической медицины в практику здравоохранения [1].

Научные исследования в области космической медицины значительно дополнили земную новыми знаниями о здоровом человеке, критериях нормы, резервных возможностях организма, о влиянии гипокинезии на состоянии функциональных систем организма, о клинике, терапии кинетозов, остеопороза, двигательных и ортостатических расстройств и других заболеваний. Такая работа постоян-



Анатолий Иванович Григорьев, академик РАН и РАМН, вице-президент РАН, научный руководитель Института медико-биологических проблем РАН. Область научных интересов — гравитационная физиология, в частности механизмы адаптации человека к экстремальным факторам внешней среды, в том числе к условиям космического полета. Лауреат Государственных премий СССР и РФ (1989, 2002), двух премий правительства России (1996, 2003), Демидовской премии (2008), награжден орденами «Знак почета» (1976), Трудового Красного знамени (1982), «За заслуги перед Отечеством IV и III степени» (2003, 2008) и медалями С.П.Королева и Ю.А.Гагарина Федерации космонавтики СССР, Золотой медалью им. академика В.Ф.Уткина.

но расширяется, способствуя внедрению в земную медицину средств диагностики, профилактики, коррекции и лечения ряда социально значимых заболеваний.

Концепция здоровья

Объект исследований в космической медицине, в отличие от земной, — здоровый человек. В процессе отбора и подготовки космонавтов, во время полетов и после их завершения накоплен обширный научный материал, во многом обогативший знания о здоровом человеке и позволивший обосновать концепцию здоровья [2].

Основное положение концепции — ее нацеленность на

управление функциями организма конкретного человека с учетом условий и режима его деятельности, что предполагает донологический подход, оценку не симптомов болезни, а состояния здоровья, учет индивидуальных нормированных показателей здоровья, сохранение функциональных резервов организма, обеспечение функционального оптимума и профессионального долголетия. Исследования с использованием функциональных нагрузок при динамическом контроле состояния здорового человека существенно расширили наши представления о нормальном диапазоне приспособительных возможностей и резервов организма в обычных и экстремальных условиях.

Концепция здоровья способствовала обоснованию принципов профилактической медицины и нашла широкое применение в клинике, при массовых медицинских обследованиях населения в специальных передвижных лабораториях («Автосан») и в сочетании с оценкой экологической обстановки в различных регионах и на предприятиях («Экосан») [2]. В этих обследованиях используется широкий набор медицинской аппаратуры, созданной для медико-биологических исследований в космосе.

В последние годы в Институте медико-биологических проблем РАН (ИМБП) совместно с организацией «Спорт-Парк» разработана комплексная методика обследования человека, включающая измерение 15 показателей. По данной методике обследовано 640 тыс. человек в возрасте от 6 до 60 лет, разделенных на 17 возрастных групп, при этом особое внимание было уделено школьникам. Построены рейтинговые шкалы для балльной оценки показателей здоровья, используемые при расчете индекса физического здоровья. Созданная компьютерная программа «Навигатор здоровья» отражает результаты обследования в виде индивидуального «паспорта здоровья» и выдает рекомендации по оздоровлению [3].

Телемедицина

Важное направление внедрения космических технологий в земную медицину составляют успешные телемедицины, послужившей основой дистанционной диагностики здоровья космонавтов и консультативной медицинской помощи. Телеметрические системы позволяют передавать в Центр управления полетами разнообразные физиологические и биохимические данные и фотографии медицинского характера. Телемедицинские методы применялись еще в поле-

тах Ю.А.Гагарина и Г.С.Титова для передачи на Землю данных ЭКГ и дыхания. Опыт создания, совершенствования и эксплуатации телемедицинских систем в космической медицине успешно используется для развития земной телемедицины [4]. С помощью системы спутниковой связи осуществляется интеграция больниц, медицинских учреждений и врачей, находящихся в отдаленных районах и на морских судах, с ведущими медицинскими центрами, что обеспечивает передачу необходимой информации (записи ЭКГ, ЭЭГ, рентгеновские снимки, компьютерные томограммы и др.) для постановки диагноза, квалифицированной консультации и лечения.

Телемедицине принадлежит важная роль в диагностике и лечении пациентов, пострадавших от природных и техногенных катастроф. С этой целью телемедицина эффективно использовалась еще в конце 80-х после землетрясения в Армении и взрыва газопровода под Уфой. Тогда под эгидой советско-американской рабочей группы по космической биологии и медицине были организованы телемосты с участием специалистов московских клиник и ведущих медицинских центров США. В видеоконференциях и телеконсультациях участвовали 247 советских и 175 американских специалистов, рассмотревших 209 клинических случаев по 20 медицинским специальностям. В результате были внесены значительные изменения в диагностический и лечебный процесс, внедрены новые лечебные методики.

Начиная с 2007 г. на Международной космической станции проводятся специальные эксперименты по совершенствованию методов получения мультимедийных медицинских данных в условиях космического полета, полученные данные оцениваются с точки зрения диагностики [4]. Специализированная компьютерная программа, созданная для получе-

ния медицинских изображений, их дешифровки и сохранения результатов для передачи специалистам, использовалась при разработке программного обеспечения для проектов мобильной телемедицины.

Гипокинезия и невесомость

Одну из актуальных проблем современной медицины составляют последствия малоподвижного образа жизни — гипокинезии, которая не без оснований считается «болезнью века». Ей принадлежит важная роль в генезисе сердечно-сосудистых заболеваний (ишемическая болезнь сердца, атеросклероз, гипертония) и нарушений опорно-мышечного аппарата, систем управления движениями и обмена веществ.

Глубокое снижение статической и динамической двигательной активности служит одним из важнейших факторов космического полета, что позволяет считать условия пребывания человека в невесомости особой, крайней формой гипокинезии.

Многолетние исследования в области космической физиологии и медицины позволили установить феномен гипокинетического двигательного синдрома, выделить стадии его развития, раскрыть основные механизмы и разработать профилактические средства, направленные на снижение и предотвращение его неблагоприятных эффектов [5, 6]. Показано, что среди системных проявлений гипокинезии ведущее место занимают костно-мышечные и двигательные нарушения, которые характеризуются изменениями во всех звеньях двигательной системы при кратковременных и, особенно, при длительных воздействиях. Это проявляется в снижении мышечного тонуса и силы сокращений (преимущественно гравитационной мускулатуры ног и туловища), мышечной гиперрефлексии и координационных нарушениях, являю-

щихся причиной снижения вертикальной устойчивости и точностных возможностей систем управления произвольными движениями, а также отклонений в восприятии схемы тела [6]. При длительной гипокинезии и невесомости развиваются атрофические процессы в гравитационной мускулатуре, снижаются сила и работоспособность мышц, отмечаются глубокие сдвиги в рефлекторной сфере.

Изменения мышечной деятельности при гипокинезии служат пусковым звеном для развития глубоких нарушений в деятельности систем вегетативного обеспечения мышечной работы, изменений минерального обмена и структуры костной ткани [5, 7, 8].

Коррекция и лечение двигательных и сенсорных нарушений

Эффекты влияния невесомости и гипокинезии занимают видное место в исследованиях космической медицины по разработке научно обоснованных методов предотвращения и снижения их неблагоприятных воздействий на организм. В частности, в результате изучения последствий длительной гравитационной разгрузки была сформулирована концепция о ведущей роли рецепторов стопы, создающих опорную афферентацию, в организации позы и поддержании мышечного тонуса. Эта концепция послужила обоснованием для разработки и применения метода компенсации опоры с целью коррекции двигательных расстройств в условиях невесомости и при гипокинезии [9].

Механостимулятор «Cupula SAND-501» — устройство для коррекции двигательных нарушений с использованием вибростимуляции стопы, впервые испытанное в советско-кубинском космическом полете, показало свою эффективность во время полета и в период вос-

становления [10]. Впоследствии при участии специалистов ИМБП была создана серия механостимуляторов: «Искусственная опора», «Медицинская обувь», «Компенсатор опорной нагрузки», «Пион». Все они, стимулируя кожные рецепторы стопы, воспроизводят функциональные эффекты опоры и способствуют профилактике и реабилитации двигательных нарушений и атрофии тонической мускулатуры. Устройство «Медицинская обувь» применяется в клинической медицине, преимущественно в неврологической практике для коррекции нарушений сенсомоторной системы, связанных с длительной иммобилизацией [9].

В настоящее время устройство «Пион» позволяет создавать механическую стимуляцию стопы в режиме естественных локомоций. Дальнейшее развитие механостимуляторов реализовано в виде имитатора ходьбы «Корвит», который применяется более чем в 30 медицинских учреждениях страны (рис.1).

Широко используются в клинике и нагрузочные костюмы, созданные с использованием космических технологий. Один из первых — костюм аксиального нагружения «Пингвин», предназначенный для компенсации де-

фицита проприоцептивной афферентной импульсации и увеличения нагрузки на мышцы и структуры скелета в условиях невесомости. Он был разработан ИМБП и фирмой «Звезда» и применялся в космических полетах с 1971 г. [11]. Костюм «Пингвин» используется во многих клиниках при лечении детского церебрального паралича, а в последние годы — для реабилитации пациентов с ишемией мозга и болезнью Паркинсона [12].

Космический костюм «Пингвин» послужил прототипом тренировочно-нагрузочного костюма «Адели» для лечения больных с нарушением позы и двигательной активностью в клинике лечения детского церебрального паралича (рис.2). С помощью амортизаторов костюм создает нагрузку на опорно-мышечный аппарат и помогает сгибать, разгибать и поворачивать туловище. Применение костюма «Адели» позволило выработать навыки ходьбы и закрепить новый двигательный стереотип у детей с тяжелыми двигательными расстройствами. В настоящее время костюм «Адели» используется более чем в 60-ти российских медицинских центрах и в зарубежных клиниках [12].

В развитие данного направления в «ООО Центр авиакосми-



Рис.1. Устройство «Корвит».



Рис.2. Костюм «Адели».



Рис.3. Костюм «Регент».

ческой медицины» при ИМБП создан лечебный костюм нового поколения «Регент» для лечения и реабилитации больных с нарушениями центральной нервной системы (рис.3). Этот костюм эффективен при лечении больных с двигательными расстройствами, вызванными очаговыми изменениями в головном мозгу после острых нарушений мозгового кровообращения в раннем и позднем восстановительном периодах, а также после инсульта и черепно-мозговых травм. Терапевтическое действие костюма «Регент» основано на восстановлении функциональных связей за счет корригирующего потока афферентной информации и улучшения трофики тканей, находящихся под нагрузкой. Его использование способствовало нормализации сложных двигательных актов.

При изучении гипокинезии в качестве профилактического средства и в ходе подготовки космонавтов используется вертикальная беговая дорожка «Подвеска» (рис.4). Это устройство весьма перспективно для лежачих пациентов с нарушениями локомоций.

Хорошим лечебным средством в клиниках служит наземная модель невесомости, так на-



Рис.4 . Стенд вертикальной беговой дорожки «Подвеска».

зываемая «сухая» иммерсия: человек помещается в ванну с водой и для предотвращения мацерации кожи изолируется от контакта с ней при помощи пленки (рис.5). В этих условиях происходит перераспределение

крови от ног к голове, что воспринимается рецепторами кровеносной системы как избыток жидкости в организме. В ответ на это возникают рефлексы, приводящие к выведению из организма избыточной жидкости,



Рис.5. Устройство «сухая» иммерсия.



Рис.6. Электромиостимулятор «Миостим».

благодаря чему «сухая» иммерсия оказалась эффективной в борьбе с массивными отеками, плохо поддающимися фармакологической коррекции. Использование «сухой» иммерсии оказалось также эффективным в неврологии для ранней диагностики скрытых медленно развивающихся неврологических процессов.

В комплексе бортовых тренажеров на борту космических станций используются разработанные в ИМБП электромиостимуляторы для стимуляции различных мышц, которые способствуют сохранению их силовых и скоростных характеристик, повышают статическую и динамическую выносливость. Для предотвращения негативных эффектов невесомости на станции «Мир» применялся автономный стимулятор «Миостим» (рис.6). Российские ученые совместно с австрийскими специалистами разработали и установили на Международной космической станции стимулятор «Стимул-01-НЧ», обеспечивающий продолжительную низкочастотную стимуляцию мышц, адресованную преимущественно тоническим двигательным единицам и направленную на профилактику и коррекцию мышечных нарушений при гравитационной разгрузке [13].

Костюмная конструкция стимулятора позволяет использовать его в течение длительного времени, что открывает новые возможности для клиники, в том числе в борьбе с заболеваниями, требующими постоянной стимуляции, в частности, у пациентов с ишемической болезнью сердца. Успешные испытания стимулятора проходили на кафедре кардиологии Московского государственного университета им. И.М.Сеченова.

Специалистами ИМБП и МГУ создан аппаратно-программный комплекс «Окулостим» для космических полетов с целью коррекции вестибуло-сенсорных нарушений. На его основе разработан и применяется в клинике компьютерный метод лечения, реабилитации и коррекции больных с неблагоприятными иллюзорными, вестибуло-окуломоторными и вестибуло-позными реакциями [14].

Идея применения искусственной силы тяжести, впервые высказанная К.Э.Циолковским, с 1970-х годов реализуется специалистами ИМБП для предотвращения неблагоприятных эффектов воздействия невесомости и гипокинезии в модельных наземных экспериментах и в экспериментах на животных, экспонированных на биоспутниках [15]. Этот подход получил развитие в Самарском государственном медицинском университете, где было установлено, что искусственная гравитация может оказывать терапевтические эффекты при различных заболеваниях, в первую очередь в травматологии и ортопедии [16].

Внедрение средств диагностики в клиническую практику

В космических полетах используется широкий комплекс медицинских приборов, часть из которых в настоящее время вошла в практическую медицину.

В первую очередь это бортовая аппаратура для диагностики, лечения и восстановления нарушений кардио-респираторной системы: «Варикард», «Аргумент», «Полином», «Чибис». В дополнение к ним применяются портативные приборы «Пульс» для оценки состояния вегетативной регуляции сердечно-сосудистой системы, «Карди-2» для оценки риска развития ишемии миокарда и аритмий, «Пневмокард» для оценки функционального состояния сердечно-сосудистой системы, устройство «Резерв» для экспресс-оценки функционального состояния и резервных возможностей организма, прибор «Анна Флеш 3000» для оценки вегетативной регуляции в суточном цикле и прибор «Сонокард» для бесконтактной регистрации физиологических показателей во время сна (рис.7). Наземный аналог прибора «Сонокард» — «Кардиосон» нашел применение в клинике.

Лечебные дыхательные смеси и фармпрепараты

В космической медицине большое внимание уделяется изучению влияния на организм человека измененных параметров газовой среды — элементного состава, высокого и пониженного давления. Цель этих исследований состоит в оптимизации воздушной среды в космическом корабле и в скафандрах, в предотвращении и лечении декомпрессионных нарушений, возможных при внекорабельной деятельности космонавтов. В последнее десятилетие расширяется использование в клинике дыхательных смесей кислорода с инертными газами. С этой целью созданы дыхательные аппараты типа «Ингалит» (рис.8), применяемые в лечении больных с заболеваниями дыхательной и сердечно-сосудистой системы, неврозами различной этиологии, а также при реабилитации здо-

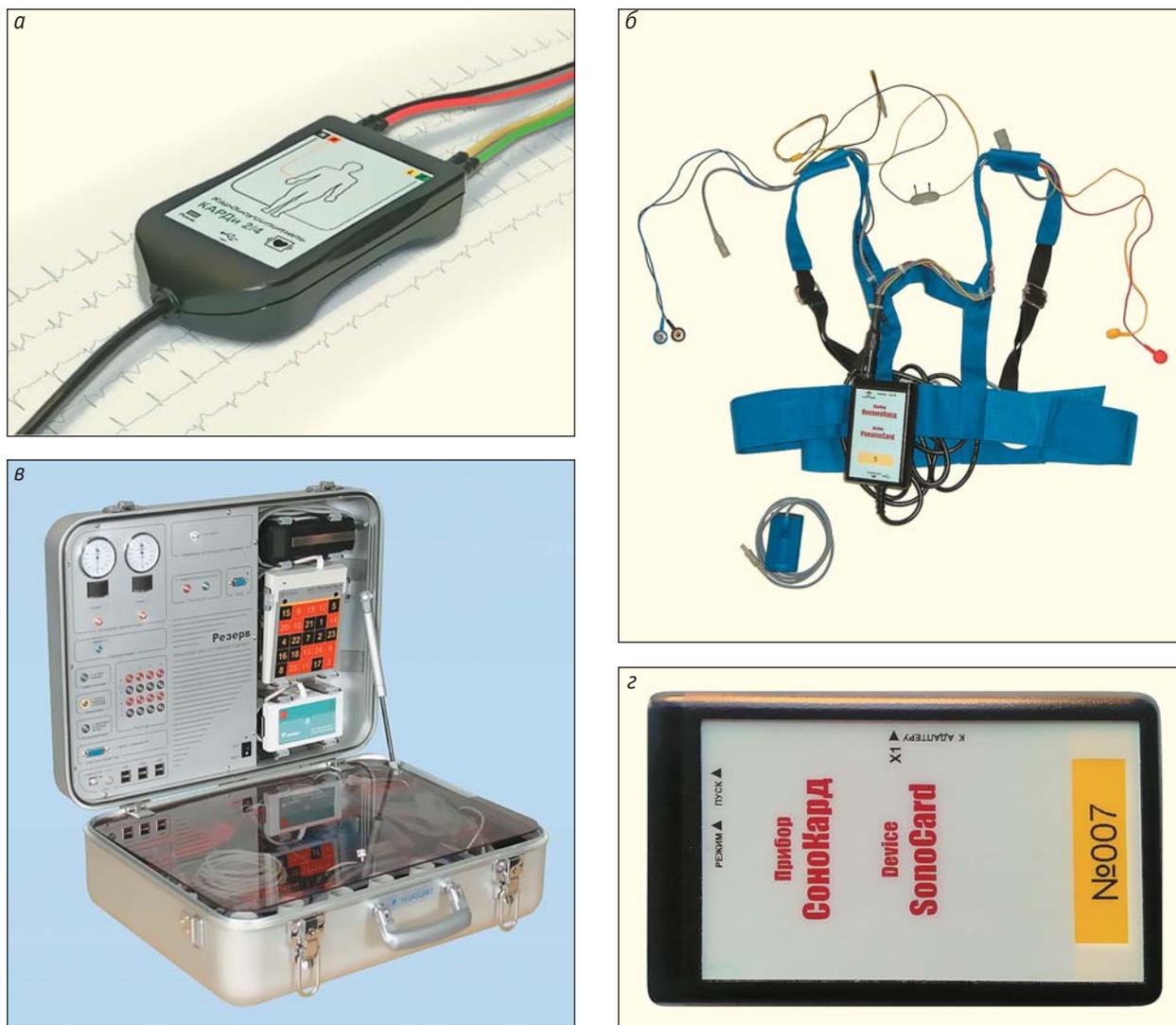


Рис.7. Средства для экспресс-диагностики: а — «Карди-2», б — «Пневмокард», в — «Резерв», г — «Сонокард».

ровых людей после тяжелых физических и психо-эмоциональных нагрузок и для общей анестезии [17].

Барокамерный комплекс ИМБП «ГВК-250» используется для лечения тяжелых и отдаленных последствий декомпрессионных расстройств. По состоянию на август 2011 г. такое лечение прошли 140 человек с декомпрессионной болезнью и баротравмой легких [18].

Для применения в космической медицине разработан целый ряд препаратов, способствующих поддержанию здоровья и работоспособности космонавтов. Среди них можно назвать

фенибут, обладающий адаптогенным и стрессопротекторным действием. Фенибут назначают при болезни Меньера, головокружениях, связанных с дисфункцией вестибулярного аппарата и для профилактики укачивания.

Препарат эстраглутон служит для защиты от переохлаждения и стабилизирует работоспособность человека в экстремальных условиях.

В ходе исследований по гипокинезии были испытаны вещества класса дифосфонатов, которые оказались эффективными в предотвращении деструктивных изменений костной

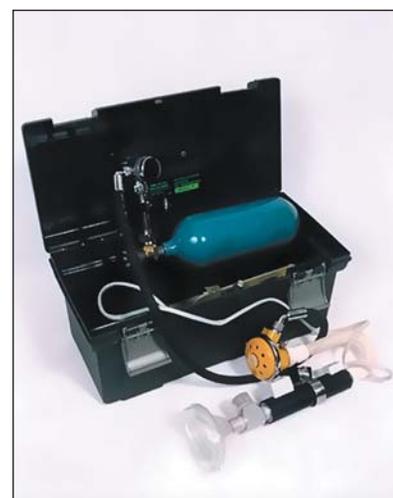


Рис.8. Прибор «Ингалит».

ткани [5]. Дифосфонаты широко используются для лечения и профилактики остеопорозов.

Пищевая добавка астровит повышает работоспособность, общую и иммунную устойчивость к неблагоприятным условиям.

Специалисты ИМБП совместно с Московским НИИ эпидемиологии и микробиологии им. Г. Н. Габричевского и Тартуского университета разработали бактериальные препараты (эубиотики) на основе штаммов

лактобацилл, активные по отношению к патогенным и условно патогенным микроорганизмам. Препараты бифидумбактерин и лактобактерин широко применяются для нормализации микрофлоры кишечника [19].

* * *

В интересах медицинского обеспечения космических полетов постоянно разрабатываются и испытываются новые методы и аппаратура для диагностики,

профилактики, лечения и реабилитации космонавтов, которые находят применение в здравоохранении. Возрастает интерес к внедрению достижений космической медицины в практику здравоохранения. Космическая медицина, постоянно обогащая медицину земную, в свою очередь широко использует достижения медицинской науки и практики. Этот взаимосвязанный процесс служит обеспечению здоровья человека и в космосе, и на Земле. ■

Литература

1. Grigoriev A.I. Health in Space and on Earth // World Health Forum. 1992. V.23. P.144—150.
2. Григорьев А.И., Баяевский Р.М. Концепция здоровья в космической медицине. М., 2007. 198 С.
3. Орлов В.А. Квантификация соматического здоровья человека на основе морфофункциональных показателей организма // Авиакосмич. и экологич. мед. 2008. Т.42. №3. С.3—7.
4. Revyakin Yu.G., Orlov O.I., Goncharov I.B. et al. Creation of integrated media of telemedical consultative service // Medicine in space and in extreme environments. 4th European Congress. Oct. 24—26. Berlin, 2007. P.34—35.
5. Григорьев А.И., Морюков Б.В. 370-суточная антиортостатическая гипокинезия (задачи и общая структура исследований) // Космич. биол. и авиакосмич. мед. 1989. Т.24. №5. С.47—50.
6. Козловская И.Б. Гравитационные механизмы в двигательной системе // Современный курс классической физиологии / Ред. Ю.В.Наточин, В.А. Качук. М., 2007. С.113—134.
7. Huntoon C.S., Grigoriev A.I., Natochin Yu.V. Fluid and Electrolyte Regulation in Space Flight. San Diego, 1998. V.94.
8. Оганов В.С. Гипокинезия — фактор риска остеопороза // Остеопороз и остеопатии. 1998. №1. С.13—17.
9. Kozlovskaya I.B., Vinogradova O.L. Theoretical basis and implementation areas of artificial support // Scientific Analytical Review. Berlin, 2001.
10. Корво Р.Э., Козловская И.Б., Крейдич Ю.В. и др. Влияние 7-дневного космического полета на структуру и функцию локомоторной системы человека // Космич. биол. и авиакосмич. мед. 1983. №2. С.37—48.
11. Барер А.С., Козловская И.Б., Тихомиров Е.П. и др. Влияние профилактического нагрузочного костюма «Пингвин» на метаболизм человека при движениях // Авиакосмич. и экологич. мед. 1998. Т.32. №4. С.4—8.
12. Семенова К.А. Восстановительное лечение больных с резидуальной стадией детского церебрального паралича. М., 1999.
13. Mayr W., Freilinger G., Rafolt R. et al. Functional electrostimulation as a countermeasure against muscular atrophy in long-term space flights // Proc. of the 5th internat. muscle symp. Zurich, 2000. P.59—61.
14. Kornilova L.N., Naumov I.A., Temnikova V.V. et al. The use of «Oculostim» hardware/software for prophylaxis, correction and elimination of vertigo and sensorimotor disturbances // Medicine in space and in extreme environments. 4th European Congress, Oct. 24—26. Berlin, 2007.
15. Котовская А.Р., Шипов А.А., Виль-Вильямс И.Ф. // Медико-биологические аспекты проблемы создания искусственной силы тяжести. М., 1996.
16. Котельников Г.П., Яшков А.В. Клинические аспекты применения гравитационной терапии в травматологии и ортопедии // XII конференция по космической биологии и авиакосмической медицине. М., 2002. С.186.
17. Павлов Б.Н., Смолин В.В., Баранов В.М. и др. Основы барофизиологии, водолазной медицины, баротерапии и лечения инертными газами. М., 2008.
18. Соколов Г.М., Аникеев А.В., Тихомирова М.Е. Опыт лечения декомпрессионной болезни при позднем поступлении пострадавших // Вопросы гипербарической медицины. 2010. Вып.13. № 1—2. С.69—71.
19. Ильин В.К., Лизько Н.Н., Корнюшенкова И.Г. Пути оптимизации микробиоценоза космонавтов // Орбитальная станция «Мир». М., 2001. Т.1. С.114—120.

Клетка: координация молекулярных процессов деления

Ф.И.Атауллаханов, Е.Л.Грищук

Способность создавать себе подобных — важнейшее свойство живых организмов, без которого невозможна непрерывность жизни и ее разнообразие. Главный элемент живых существ, в полной мере обладающий таким свойством, — это клетка. Она умеет делать то, чего не может ни один человек. Пока даже не очень понятно, каковы принципы работы клетки и каковы механизмы этой работы. А простейшая клетка, у которой нет ни глаз, ни рук, ни мозга, легко и непрерывно копирует себя. Задача понять эти клеточные секреты кажется нам одной из наиболее «вызывающих» загадок современного естествознания. Сегодня нет сомнений, что ее решение невозможно без совместных усилий не только биологов, но также химиков, физиков и даже математиков. Нельзя не упомянуть и о медицинских аспектах проблемы: понимание механизмов деления клеток и причин нарушения этих устройств — вот тот ключ, который откроет пути к созданию эффективных методов лечения многих болезней, в первую очередь рака.

Может показаться странным наше утверждение, что в делении клетки есть какие-то загадки. В любом школьном учебнике довольно много места уделяется этому процессу, опубликованы

© Атауллаханов Ф.И., Грищук Е.Л., 2012



Фазоил Иноятович Атауллаханов, доктор биологических наук, профессор МГУ им.М.В.Ломоносова, заведующий лабораторией физической биохимии Гематологического научного центра и лабораторией биофизики Детского центра гематологии, онкологии и иммунологии. Научные интересы связаны с клеточной биологией, нелинейной динамикой и самоорганизацией в биологических системах.



Екатерина Леонидовна Грищук, доктор философии, профессор Пенсильванского университета (США), возглавляет лабораторию биофизики клеточного деления. Область научных интересов включает клеточную биологию и биофизику митоза.

десятки, если не сотни тысяч научных статей. Что же тут может быть загадочного?

Действительно, сейчас известны много деталей клеточного деления, огромная масса безусловно важных событий. Однако непонятны его основные принципы. И поэтому зачастую нельзя оценить, как много еще предстоит выяснить. Последние два-три десятилетия принесли в области клеточного деления ряд выдающихся достижений, которые можно рассматривать как революцию в наших представлениях. Такой успех вселяет в нас оптимизм и надежду, что понимание молекулярных механизмов, принципиально определяющих клеточное деление, не за горами.

Мы покажем, как непросто получать ответы на «простые» вопросы и как эти ответы трансформируют «школьные» знания о клетке. Но сначала напомним вкратце основные сведения о делении клетки, т.е.

«Школьные» представления

Тот факт, что все организмы состоят из клеток, наверное, был установлен сразу же после того, как Левенгук в конце XVII в. создал удивительно качественные линзы, которые привлекли внимание биологов к микроскопическому устройству живых объектов. (Вопреки распространенному мнению, он не был изобретателем микроскопа, но умел делать отличные очень сильные линзы!) И к середине 19-го столетия, в 1855 г. (более 150 лет назад!), Рудольф Вирхов сформулировал свое знаменитое: «*Omnis cellula ex cellula*» (Каждая клетка — из клетки). Таким образом, жизненный цикл любой клетки — клеточный цикл — начинается с деления. Затем следуют рост и удвоение всего содержимого, и клетка готова опять поделиться, чтобы породить себе подобную. Микроскоп позволяет воочию увидеть одну из важнейших фаз этого процесса — митоз, процесс расхождения хромосом и деления клетки на две части.

Чтобы поделиться, все нужно удвоить. Это очевидно и не кажется очень уж сложной задачей. Если при делении какие-то клеточные органеллы разделились не точно поровну, клетка досинтезирует недостающее. У некоторых организмов, например у почкующихся дрожжей, деление всегда происходит очень неравномерно. Эти дрожжи не делятся пополам, а отделяют от себя почку. Образовавшаяся таким образом дочерняя клетка существенно меньше материнской, но потом она вырастет и будет способна сама создавать новую клетку. Утверждение, что все можно поделить примерно, справедливо по отношению ко многим компонентам клетки, но есть серьезное исключение, которое невероятно увеличивает сложность проблемы. Насколько эта сложность велика, стало понятно, когда была выяснена природа наследственности. Только во второй половине 20-го столетия, после революционных достижений генетики и молекулярной биологии, стало ясно, что информация о клетке закодирована в последовательности оснований ДНК. Длина этого «текста» — примерно миллиард букв, записанных в виде 46 длиннейших и тончайших нитей ДНК, т.е. 46 хромосом. Сегодня, когда в моде слово «нано», не грех взглянуть на цифры. Диаметр молекулы ДНК — 2 нм, длина — около $2 \cdot 10^8$ нм, при том что размер самой клетки в десятки тысяч раз меньше! Если увеличить молекулу ДНК до видимых размеров — до толщины, скажем, с волос (0.1 мм) — ее длина составит 10 км! Чтобы сделать новую клетку, необходимо точно скопировать все эти буквы (допускается всего несколько «опечаток»), создать точные копии всех 46 хромосом. При этом недопустимо сделать как меньше, так и больше копий — нужно ровно две. Любое отклонение приведет к гибели. Эту задачу решает целый ряд молекулярных систем, работающих в определенной фазе клеточного цикла — фазе синтеза ДНК,

или S-фазе. Легко увидеть минимум два простых вопроса в этой фазе клеточного цикла:

- как обеспечить такую фантастическую точность копирования;
- как сделать так, чтобы вся ДНК полностью и без пропусков была скопирована только один раз и не больше?

Молекулы ДНК нужно упаковать. Представьте себе замкнутое помещение, в котором находится 46 отдельных ниток, каждая из которых в 10 тыс. раз длиннее самого большого его измерения. Понятно, что без специальных ухищрений невозможно манипулировать нитями без того, чтобы они не превратились в безнадежно запутанный клубок. Так было бы и с молекулами ДНК, а ведь манипулировать ими необходимо. Нужно считывать информацию с генов, синтезировать новые копии нитей ДНК. Похоже, что единственный способ избежать хаоса — упаковка. Проще всего — намотать все на одну катушку — неприемлем. Он делает невозможным быстрый доступ к любым частям нити. Действительно, в клетке они компактно упакованы, что особенно важно перед ее делением. Размер упакованной формы ДНК (она и называется хромосомой) в 10–100 тыс. раз меньше, чем длина ДНК. Отсюда вытекает еще один простой вопрос, в решении которого огромный прогресс произошел в последние годы: как упакована ДНК?

Хромосомы нужно разнести в разные концы клетки, не перепутав. После синтеза молекулы ДНК существуют в виде двух идентичных копий. Их-то и нужно разнести в разные концы клетки, да так, чтобы в каждый набор вошла только одна копия и в нем содержались все молекулы ДНК, скажем, для клеток человека — ровно 46 штук. Ничего нельзя перепутать. Получить два одинаковых тома этой энциклопедии. И ни одной копии другого — для клетки это так же смертельно, как недополучить одну из копий. Разносит молекулы ДНК специальный аппарат, называемый веретеном деления. Оно хорошо видно в микроскоп. Это фаза деления клетки, отчетливо опознаваемая еще первыми микроскопистами, — митоз. Замечательные рисунки У.Флеминга (рис.1) и его современников поражают точностью и детальностью изображения этой структуры. Вот вытекающие из этого простые вопросы, с которых в значительной степени удалось сбросить завесу загадочности в последние годы:

- как клетка распознает сестринские хромосомы;
- какие силы двигают их в нужном направлении и в нужное место;
- как клетка контролирует точность выполнения задачи?

Фазы клеточного цикла. Упомянутые фаза S и митоз (M) — наиболее ярко выраженные антиподы. Процессы, идущие в одной из них, чаще всего подавлены в другой. Полный клеточный цикл не определяется только суммой времен этих двух фаз.

Большинство клеток нуждается в гораздо большем времени для того, чтобы удвоить основную массу своих белков и органелл. Поэтому подавляющее число клеток имеет еще две фазы: G1 (временной промежуток между митозом и S-фазой) и G2 (время между S-фазой и митозом). Вот почему традиционно клеточный цикл ядерных клеток (эукариот) принято делить на четыре последовательно сменяющиеся друг друга фазы — G1, S, G2 и M (рис.2).

В типичных клетках человека, размножающихся в пробирке, клеточный цикл продолжается около 24 ч, тогда как длительность митоза — около часа. Рост клетки происходит во время всех фаз, исключая митоз. G1 и G2 — не просто временная задержка, позволяющая синтезировать необходимые вещества. Эти фазы обеспечивают возможность клетке проконтролировать состояние окружающей среды и внутриклеточных систем, чтобы понять, насколько все готово для такой глобальной перестройки, как деление. Особенно важна в этом отношении фаза G1. Ее длительность может меняться очень сильно в зависимости от внешних условий и сигналов, поступающих от других клеток. Если внеклеточные условия неблагоприятны, клетка задерживается в фазе G1 и даже может перейти в специальную фазу ожидания — G0, в которой способна оставаться многие дни и даже годы, прежде чем возобновятся клеточные деления. Многие клетки в нашем организме постоянно пребывают в фазе G0 до своей смерти или даже смерти организма. Если внеклеточные условия становятся благоприятными для деления или в начале G1 приходят специальные сигналы, предписывающие его возобновление, клетка проходит всю эту фазу, в конце которой предстоит выбор между остановкой и переходом в фазу S. Этот момент принято называть стартом. После него клетка начинает удвоение ДНК, даже если в окружающей среде уже нет специальных сигналов. Так что деление, в которое вовлечены тысячи разных процессов, должно быть строго организовано и во времени, и в пространстве.

Как же координируются клеточные процессы? Этот вопрос занимал биологов не менее сотни лет. Только в последние два десятилетия были сделаны открытия, благодаря которым пришло понимание механизмов этой координации.

Мы очень поверхностно прошли по событиям, связанным с делением клетки. Собранную коллекцию вопросов способен задать любой школьник, а ответить не могла вся наука более столетия. И сегодня, когда знания в этой области фантастически умножились, на эти вопросы все еще не так-то легко ответить. Чтобы осветить каждый из них, необходимо довольно развернуто изложить представления о множестве молекулярных процессов. Но и тогда это будет поверхностное знание того, как клетка решает свои проблемы. Конечно, на все заданные вопросы невозможно ответить в одной популярной статье. Поэтому мы ограничимся рассмотрением только одного:

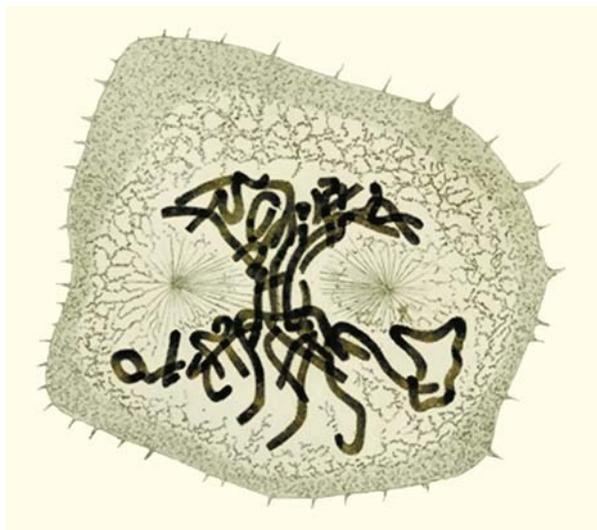


Рис.1. Клетка в процессе митотического деления, какой ее увидел и зарисовал У.Флеминг. Отчетливо видны два центромера, образованные пучками тонких линий, между которыми находятся толстые червеобразные образования, позже названные хромосомами.

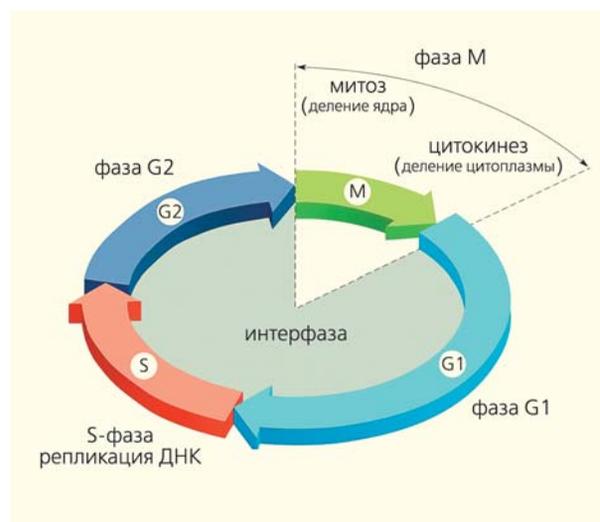
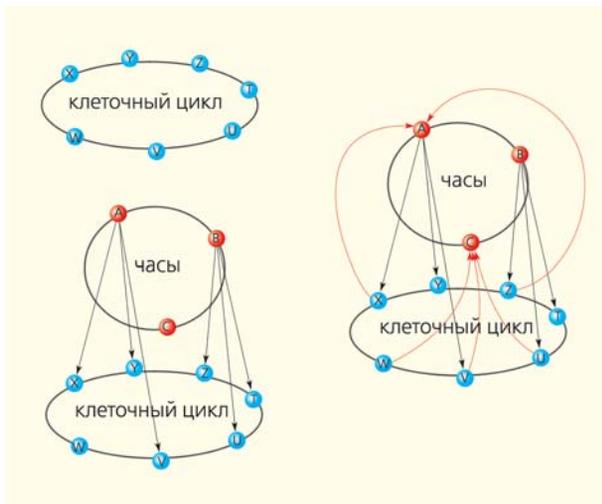


Рис.2. Фазы клеточного цикла.

Как координируются клеточные процессы?

Каковы механизмы, контролирующие и регулирующие многообразие процессов, происходящих в ходе деления клетки? Это занимает умы ученых с тех пор, как они обнаружили, что клетки умеют делиться. Очень давно, более 150 лет назад, возникли две умозрительные гипотезы регуляции клеточного цикла — «домино» и «часов».

По первой гипотезе клеточный цикл представляет собой последовательность процессов, каждый из которых по завершении запускает следующий, тот — следующий и т.д., пока весь цикл не завершится (рис.3). Так ведут себя костяшки домино,



поставленные на попа в ряд: падение одной приводит к последовательному падению всего ряда. По второй гипотезе в клетке существует некая биохимическая колебательная система реакций — «часы». Эти реакции протекают довольно автономно, отсчитывая «время». Они запускают в нужные моменты разные процессы, обеспечивая их правильную очередность (см. рис.3).

Основное различие между этими гипотезами в том, что в «домино» почти все события клеточного цикла вовлечены в формирование его периодичности, а в «часах» есть специальные реакции, предназначенные для генерации колебаний. Многие годы экспериментаторы безуспешно пытались найти биохимические реакции, выполняющие роль «часов». Теоретики же анализировали умозрительные схемы и существующие в клетке системы реакций, пытаясь понять, не служит ли какая-нибудь из них теми самыми «часами».

Но чем больше узнавали о разных стадиях и процессах клеточного цикла, тем больше обнаруживалось связей между процессами. Разумно было рассматривать эти данные, как подтверждение гипотезы «домино». Но...

Открытие циклинов. Оно было сделано в начале 70-х годов и стало сильным аргументом в пользу гипотезы «часов». Начался новый этап в исследовании механизмов, управляющих клеточным циклом. При исследовании процессов созревания икринок шпорцевой лягушки (*Xenopus laevis*) был обнаружен фактор, контролирующий начало митоза и прохождение через мейоз (деление ядра эукариотической клетки с уменьшением числа хромосом в два раза). Надо сказать, созревание, а потом и первые 10–12 делений икринки — очень удобный объект для исследования клеточного цикла вообще.

Поскольку первые деления идут синхронно, «как часы», можно работать с зародышем как с одной клеткой. В ходе этих делений многие процессы, обычные для клеточного цикла, не идут — клетки синтезируют только тот минимум, который нужен для удвоения хромосом и создания перегородки. Практически клеточный цикл редуцирован до митоза и S-фазы. Деления идут автономно, поскольку все необходимое в них есть. Икринка делится, не меняя своего объема. Просто ее содержимое разделяется перегородками, сначала на две клетки, потом каждая из половин — еще на две и т.д.

Икринки — это очень большие клетки, достигающие 1 мм в диаметре, и потому уникально удобные для биологических исследований и манипуляций. Вот на такой модели в опытах по переносу цитоплазмы из одной икринки в другую, находящуюся на иной стадии развития, было обнаружено, что цитоплазма зрелой икринки — ооцита — способна стимулировать созревание незрелых клеток. Фактор, ответственный за стимуляцию, назвали maturation promoting factor (MPF) — фактор, стимулирующий созревание. Позже выяснилось, что он определяет и начало митоза, фазы, в которой происходит разделение хромосом, причем не только в ооцитах, но и в других клетках.

Активность MPF в ходе первых синхронных делений икринки непостоянна, она колеблется с периодом, равным периоду делений (рис.4). Из этого еще не следует, что именно MPF определяет цикличность процесса. Многие параметры клетки, например количество ДНК, тоже колеблются, и тоже с тем же периодом. Однако оказалось, что можно заблокировать синтез ДНК, а колебания активности MPF будут продолжаться. Блокировка образования митотического веретена и разделения хромосом также не влияют на способность цитоплазмы стимулировать другие клетки к митозу (активность MPF будет продолжать колебаться с теми же периодом и амплитудой). Так был открыт процесс, который, как сейчас ясно, играет роль «клеточных часов» — «отсчитывает время» и запускает те или иные процессы клеточного цикла в «нужный» момент. Гипотеза «клеточных часов» получила мощное подтверждение.

В начале 80-х годов произошло еще одно важное открытие, сильно повлиявшее на понимание

механизма работы «часов». Т.Хант предложил группе студентов учебную задачу: исследовать, как меняется содержание разных белков в ходе развития зародышей морского ежа (они очень похожи на развивающиеся икринки лягушки). Студенты обнаружили, что содержание почти всех белков медленно растет. Но в одной из фракций концентрация белка резко падала во время митоза, а потом линейно росла до исходного уровня в течение всего клеточного цикла (см. рис.4). Естественно, что такой белок получил название циклин. Позже выяснили, что он входит в состав MPF.

В те же 70–80-е годы две группы генетиков — Р.Нерса и Л.Хартвелла — активно исследовали мутанты дрожжей *Saccharomyces pombe*, у которых был затруднен митоз. Эти исследования привели к открытию большинства белков, в том числе MPF, определяющих работу «клеточных часов». Один из этих белков оказался протеинкиназой — ферментом CDK2 (cyclin dependent kinase — зависящая от циклина киназа), который вместе с циклином образует MPF. Выяснилось, что практически все белки (циклины) этой важной клеточной системы очень консервативны — они взаимозаменяемы у эволюционно далеко отстоящих друг от друга видов, таких как человек и дрожжи. В 2001 г. Л.Хартвелл, Т.Хант и Р.Нерс были удостоены Нобелевской премии «за открытие ключевых регуляторов клеточного цикла».

Как устроены «клеточные часы». В центре образующего их процесса находится комплекс двух белков — фермента протеинкиназы CDK2 и циклина. Это и есть MPF — фактор, управляющий клеточным циклом. Протеинкиназы осуществляют химическую модификацию — ковалентно присоединяют фосфатную группу к определенным белкам. (Это один из самых распространенных способов управления активностью белков, он лежит в основе регуляции многих внутриклеточных процессов.) Второй белок комплекса MPF — циклин — служит регуляторной субъединицей.

Сначала синтезируется циклин — примерно с постоянной скоростью. Затем он соединяется с белком CDK2 (сам по себе он нефункционален и всегда присутствует в клетке), и образуется комплекс MPF, сначала тоже неактивный. Для обретения активности он должен быть профосфорилирован. Происходит это за счет автокатализа, осуществляемого самой CDK2, у которой после связывания с циклином меняется конформация и появляется киназная активность. CDK2 может фосфорилироваться в нескольких местах, но только модификация одной аминокислоты — треонина (Т) — приводит к активации MPF (рис.5). Существуют еще две реакции, которые фосфорилируют-дефосфорилируют возникший комплекс. Протеинкиназа WEE1 тоже переносит фосфатную группу на CDK2, но в другом месте — Y, и тогда MPF становится неактивным независимо от того, фосфорилирован или нет участок Т. Этот блокирую-

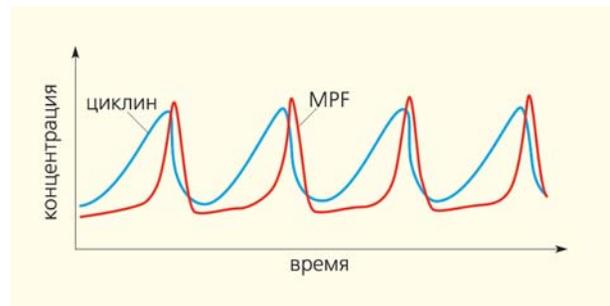


Рис.4. Колебания концентраций циклина и MPF во времени. По завершении предыдущего цикла концентрация циклина нарастает примерно с постоянной скоростью (левая часть кривой). Концентрация MPF довольно долго увеличивается незначительно (почти весь образующийся комплекс «уходит» в неактивную форму из-за фосфорилирования киназой WEE1), а потом быстро нарастает. Когда начинается митоз, концентрации и циклина, и MPF быстро падают.

щий эффект снимается другим ферментом — фосфатазой CDC25, которая специфически отщепляет фосфат от участка Y. Сначала активный MPF образуется очень медленно, но при этом сильно стимулирует собственную активацию (см. рис.5). Какой из этих двух процессов будет преобладать, сказать трудно, в разных организмах это бывает по-разному. Важно, что MPF способен ускорять

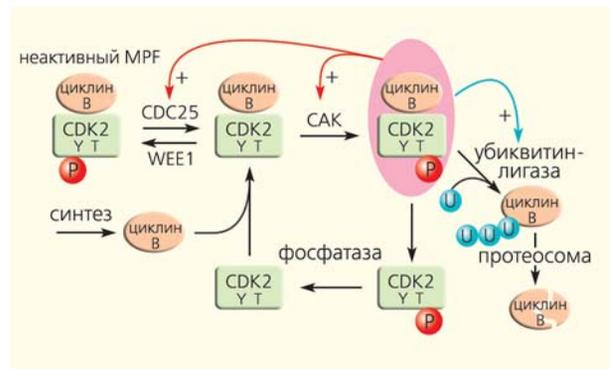


Рис.5. Устройство «клеточных часов». Каждый цикл начинается с синтеза нового циклина В, который связывается с киназой CDK2, после чего она может быть фосфорилирована в двух местах (Т и Y), каждое своей киназой. Результат их работы прямо противоположен: киназа WEE1 делает комплекс MPF неактивным, а киназа САК активирует его, и комплекс фосфорилирует многие белки клеточного цикла. Это приводит к началу митоза. Неактивную киназу CDK2, фосфорилированную по участку Y, «спасает» фосфатаза CDC25, отщепляя фосфат. Когда концентрация MPF становится высокой, фермент убиквитин-лигаза присоединяет к циклину цепочку из нескольких молекул белка убиквитина (U). Эта «черная метка» служит сигналом для протеасомы — она разрушает циклин. Его концентрация, а вместе с ним и MPF, падает до нуля. От CDK2 отщепляются все фосфаты, и «часы» завершают полный цикл.

собственную активацию — одно из главных условий биологического или химического генератора. Итак, функциональный MRF образовался, после чего его активность нарастает нелинейно, ускоряясь со временем.

Следующий ход «часов» связан с работой протеосомы — специализированной внутриклеточной «гильотины» — «машинки», которая избирательно разрушает внутриклеточные белки. Специальные ферменты распознают циклин в комплексе MRF и присоединяют к нему убиквитин, небольшой белок, исполняющий роль метки на «жертве». Помеченный циклин разрушается протеосомой (см. рис.5). Происходит это только при достижении довольно высокой активности MRF в клетке, причем процесс «ликвидации» циклина усиливается самим этим комплексом и идет быстро. В результате количество циклина резко уменьшается, а с ним падает и активность MRF (см. рис.4). Освободившаяся CDK2 дефосфорилируется и возвращается в исходное состояние. Все начинается снова. В действительности в этом циклически работающем механизме нельзя выделить начало или конец. Процесс идет периодически, и одна фаза сменяет другую.

Особенности колебаний в биологии и химии. В этом отступлении, написанном для любителей физики, мы проанализируем сходство и различие «часов», точнее, колебательных процессов разной природы: механических, химических, биологических. Главку можно читать автономно или не читать совсем — это не помешает восприятию последующего материала.

Когда речь заходит о колебательных процессах, видимо, почти у каждого человека возникает образ маятника. И в самом деле, это простое устройство сыграло огромную роль в науке. Идеальный маятник, или, как говорят физики, гармонический осциллятор, до сих пор служит одной из основных моделей, лежащих в основе физической науки. Многие попытки понять природу колебательных процессов в биологии были связаны с поисками тех элементарных, простейших, «маятников», которые работают в живом мире. Попытки эти продолжаются до сих пор. Но в 1960—1970-х годах произошло осознание того, что в основе колебаний, наблюдаемых в биологических и химических системах, лежат осцилляторы, мало похожие на маятник. Прежде чем представить основные свойства таких осцилляторов, попытаемся понять, почему идеальный маятник оказывается столь притягательным при описании колебаний. Чтобы они продолжались долго, нужно тратить на их поддержание энергию. А она должна поступать определенным образом, циклически. Маятник достаточно подталкивать один раз за период в конкретной фазе, чтобы колебания не затухали. Именно так раскачивают качели. Очень нехитрое устройство, называемое анкерным механизмом, делает это же с маятником в механических часах.

Реальные физические маятники обычно работают в воздухе — среде достаточно разреженной. Что произойдет, если такой маятник поместить в воду? (Заметим: все биологические процессы протекают в жидкой среде — цитоплазме.) Его колебания будут затухать очень быстро, а чаще всего маятник не сможет сделать и одного колебания. Такие системы называют релаксационными, а не колебательными. Они очень быстро рассеивают энергию. Этот грубый образ очень сходно передает то, что повсеместно наблюдается в биологии и химии: подавляющее большинство процессов в них — релаксационные. Можно ли сделать часы без колебательных элементов, используя только релаксационные? Да, можно. Примеры тому есть в технике. Например, водяные часы, конструкция которых восходит к древним грекам. В сосуд медленно течет вода, пока он не заполнится. Затем он быстро опорожняется, например через сифон, и процесс начинается снова. В релаксационных часах придется тратить больше энергии на поддержание колебаний, чем в гармоническом осцилляторе.

В 1960—1970-х годах были детально изучены первые химические и биологические колебательные системы и выяснены механизмы колебаний. Стали ясны закономерности, лежащие в основе работы этих систем. Практически во всех хорошо изученных на сегодня колебательных процессах, протекающих в таких конденсированных средах, как вода, можно обнаружить два главных признака:

- положительную обратную связь (как минимум одну);
- торможение.

В химических процессах можно обеспечить положительную обратную связь простейшим способом — за счет автокаталитической стадии. Торможение же создается наличием в системе ингибитора — вещества, останавливающего процесс, которое должно производиться в его ходе.

Установление этих простых на первый взгляд правил заняло более полувека и составляет одну из наиболее драматических страниц науки XX в. Первые химические колебательные системы открыты на рубеже 19-го и 20-го столетий, но тогдашней теоретической физикой были объявлены вне закона, поскольку якобы противоречили термодинамике. И только в 1960-х годах это заблуждение рассеялось — в немалой степени благодаря работам русских ученых: Б.П.Белоусова, А.М.Жаботинского и А.Н.Заикина.

Первая биологическая модель простейшей колебательной системы придумана и исследована уже более 100 лет назад. И называется она моделью Лотки (по имени автора) или моделью «хищник—жертва». Пример тому, скажем, — система зайцы—волки в одном изолированном ареале. Для популяции зайцев количество корма здесь ограничено. Вероятность их размножения пропорциональна численности, что и приносит в систе-

му нужную положительную обратную связь. Количество волков, которые питаются зайцами, пропорционально численности последних. Это и есть тормозящий фактор. В такой модели число зайцев и волков будет постоянно и сильно колебаться во времени.

Особенность релаксационных колебаний в том, что их форма нередко мало похожа на синусоиду. Кривая колебаний в некоторых местах претерпевает излом, как будто один процесс сменяется другим. И действительно, смена активации на торможение часто происходит довольно резко.

Можно ли применить требования, предъявляемые к колебательным процессам в конденсированных средах, к «клеточным часам»? Способность комплекса MPF сильно активировать собственное производство — это типичная положительная обратная связь, настоящий автокатализ с химической точки зрения. Однако торможение, т.е. образование ингибитора, не просматривается так прямо. Циклин инактивируется протеасомой, но она не возникает в процессе работы «часов». Однако синтез белков убиквитинов, которыми метятся циклины, стимулируется комплексом MPF. Таким образом активный фактор «клеточных часов» включает сам себя. Следовательно, выполняется и второе требование. Выходит, «клеточные часы» — типичный химический осциллятор.

Интересная особенность «часов» с точки зрения теории динамических систем — существование упомянутого уже специального места фосфорилирования (позиция Y) каталитической субъединицы CDK2 (см. рис.5). Даже если она фосфорилирована по аминокислоте T, при переносе фосфата еще и на тирозин (Y) комплекс MPF теряет активность. Два фермента — WEE1 и CDC25 — контролируют, какая часть комплекса уходит в неактивное состояние. Зачем это нужно? В 1960—1970-х годах, задолго до открытия циклинов и CDK2, Е.Е.Сельков теоретически изучал возможные принципы устройства биохимических колебательных систем. Он задался вопросом: как управлять периодом системы, в которой реакции идут попеременно, циклически сменяя друг друга? Селькову удалось показать, что, меняя соотношение активной и неактивной форм веществ, участвующих в колебаниях, можно легко изменять период колебаний. Ферменты WEE1 и CDC25 как раз и создают такую пару форм. Следовательно, «клеточные часы» устроены в строгом соответствии с простейшими требованиями к колебательным химическим реакциям. Интересно, что ученые, открывшие циклины и CDK2 и расшифровавшие механизм «клеточных часов», ничего не знали о перипетиях теоретических представлений о колебательных процессах в химии и биологии.

Взаимодействие «клеточных часов» с другими процессами клеточного цикла. Вопрос о взаимоотношениях очень интересен. «Часы» должны запускать определенные процессы в конкретные

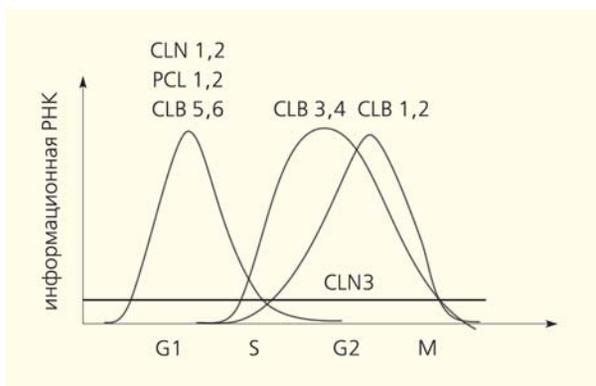


Рис.6. График, отображающий изменение концентрации информационных РНК, кодирующих разные циклины в разные фазы клеточного цикла в дрожжах *Saccharomyces cerevisiae*. По сути этот график отражает содержание циклинов. Концентрация только одного из них — CLN3 — постоянна, но в зависимости от фазы клеточного цикла сильно меняется скорость его деградации, что и делает этот белок циклином.

моменты времени. MPF, как упоминалось, фосфорилирует разные белки в клетке, запуская тем самым разные процессы. Приведем пример. Для начала митоза нужно, чтобы распалась оболочка клеточного ядра, чему и способствует MPF. Он фосфорилирует один из белков ядерной мембраны — ламинин В, молекулы которого перестают связываться друг с другом, и оболочка распадается. Это, может быть, самый простой пример того, как клеточный «осциллятор» запускает другие процессы. Но механизмы его действия еще очень мало изучены, более того, пока даже неясно, все ли процессы в клеточном цикле запускаются рассмотренным «осциллятором».

Может быть, в клетке существует несколько «осцилляторов» («клеточных часов») и каждый управляет своей фазой клеточного цикла? Для положительного ответа, казалось бы, есть основания. Сегодня уже известно множество разных циклинов — регуляторных субъединиц в комплексе MPF. В дрожжевой клетке *Saccharomyces cerevisiae* их 22 и пять различающихся между собой CDK, активность которых обусловлена этими циклинами. Концентрации многих из них сильно меняются во времени, описывая периодические колебания, и достигают максимума в разные фазы клеточного цикла (рис.6). Может, в дрожжевой клетке существует пять несходных «часов»? Это не так. «Часов» не должно быть много — из-за проблем с синхронизацией их работы. Если разные часы запускают разные фазы цикла и идут с несколько отличающейся скоростью (далее будет видно, что биологические «часы» не очень стремятся точно мерить время), правильное следование фаз быстро нарушится. Концентрации многих циклинов не могут колебаться автономно, так как зависят от MPF или других киназ. Возможно, некоторые циклины иг-

рают роль фазосогласующих устройств или вызывают «временные задержки», обеспечивая наступление разных событий, каждое в свое время.

Далеко не всегда условия, в которых находятся клетки, позволяют им вести себя так, как это происходит на ранних стадиях развития зародыша. Клетки должны реагировать на многие события в окружающей их среде и в самой клетке. Это могут быть разнообразны повреждающие воздействия, нехватка питательных веществ и т.д., и т.д. В результате какие-то внутриклеточные процессы пойдут медленнее или быстрее, нарушится их синхронизация и клетка погибнет. Например, при повреждении ДНК клетка не должна начинать деление до тех пор, пока дефект не будет устранен, иначе дочерние клетки не получат полноценных хромосом и погибнут. Или другой пример: если в среде обитания, скажем, дрожжей, кончились питательные вещества, клетки не просто останавливают деление, они создают споры, которые могут храниться длительное время. Значит, не всегда клетки порождают себе подобные. Наиболее впечатляющий пример — возникновение многоклеточного организма из единственной зародышевой клетки. И, наконец, даже в самых прекрасных условиях клетка многоклеточного организма должна уметь остановиться и прекратить деления навсегда. Когда такой контроль за клеточными делениями утрачивается, возникает рак — некоторые клетки начинают бесконтрольно размножаться, приводя в конце концов весь организм к гибели.

Управление работой часов — контрольные точки. Как осуществляется контроль над выполнением приказов, поступающих от «часов» к исполнительным механизмам? Очевидно, что в клетке должны быть обратные связи от этих механизмов к «часам», способные влиять на их работу. Такие связи есть, и их множество. Действие их на «часы» приурочено к определенным фазам клеточного цикла. В каких-то из них клетка ждет поступления сигналов об успешном завершении предыдущих стадий, прежде чем начать следующую фазу. Обычно сигнал приходит раньше, так что в нормально протекающем клеточном цикле ничего ждать не приходится. Все идет «по часам». Но если какой-то процесс оказался сильно заторможен, «часы» остановятся. Это может произойти в контрольных точках (checkpoints). Отметим некоторые из них, наиболее важные.

Старт — момент в клеточном цикле перед началом синтеза новой ДНК. В это время проверяется, например, выросла ли клетка до нужного размера и начинать ли ей новый цикл или остановиться. Тогда же действуют и многие внешние сигналы, например ростовые факторы, гормоны.

Сложный и очень важный этап деления клетки — митоз: нужно точно разделить удвоенные хромосомы. Многие процессы, ответственные за разделение, могут задержать начало митоза или его протекание. Считается, что существуют веще-

ства, появление (или исчезновение) которых служит сигналом для задержки митоза. Такие сигналы вырабатывает, например, система репарации ДНК. Перед тем как начать митоз, клетка проверяет, все ли для этого готово. Есть контрольные точки и в середине митоза. Благодаря им «часы» могут идти не очень точно. Клетке не так уж важно астрономическое время. Гораздо важнее выполнить все максимально качественно, если даже на это уйдет несколько больше времени. Сигналы, связанные с контрольными точками, не абсолютные. Клетка ждет какое-то время (примерно длительность одного клеточного цикла), а потом все же начинает двигаться дальше по клеточному циклу, хотя часто при этом гибнет.

Каковы молекулярные механизмы, обеспечивающие контроль работы «часов»? Они очень похожи на тот, что работает в самих часах. Как уже сказано, активность CDK2 регулируется фосфорилированием и дефосфорилированием определенных мест в этом ферменте. Совершенно так же другие ферменты, участвующие в работе «часов», — WEE1-киназа и CDC25-фосфатаза — выполняют свои функции, каждая на своем месте. Именно так реализуется петля положительной обратной связи от MPF к CDC25. Активность обоих этих ферментов тоже могут менять другие киназы. Так, если «выключить» CDC25, клеточный цикл затормозится, ибо не будет образовываться функциональный MPF. Все внутриклеточные процессы буквально пронизаны цепями и каскадами фосфорилирования и дефосфорилирования, благодаря чему действуют «информационные» сети управления в клетке. (Внутриклеточная сигнализация — сама по себе интереснейшая тема для обсуждения, но в отдельной статье.) Клетка использует для управления не только реакции фосфорилирования и дефосфорилирования. Например, еще существуют специальные белки-ингибиторы, которые регулируют клеточный цикл, прямо связываясь с циклинами или другими белками управляющей системы.

* * *

Какая же гипотеза правильна — «часов» или «домино»? Строго говоря, ни та, ни другая. «Часы» безусловно есть. Но наличие обратных связей (см. рис.3) сильно меняет дело — «часы» становятся «умными», но при этом перестают быть часами в полном смысле этого слова. Они могут «замедлить» ход времени, если клетка не успевает что-то сделать. Их можно вообще остановить, выведя клетку из череды бесконечных делений, а потом, когда нужно, включить. Похоже, это самый простой и действенный способ остановить клеточный цикл, не вызвав необратимых нарушений и гибели клетки.

Сейчас очень многое известно о клеточном цикле. Но исследователям еще есть над чем работать, ведь в него вовлечены тысячи молекулярных процессов. ■

Взлет и падение Y-хромосомы



П.М.Бородин, Е.А.Башева, Ф.Н.Голенищев

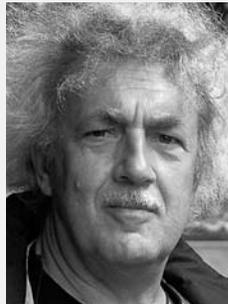
В этой статье мы расскажем, как возникли половые хромосомы млекопитающих, как они эволюционировали, к чему пришли и что их ждет впереди. Особое внимание мы обратим на эволюцию поведения половых хромосом в мейозе у серых полевок. Ее мы исследовали втроем: Ф.Н.Голенищев отлавливал зверей, определял их видовую принадлежность и консультировал нас по всем таксономическим и филогенетическим вопросам; Е.А.Башева готовила и анализировала цитологические препараты; П.М.Бородин придумал план всей работы и написал основной текст статьи.

Полевки как зеркало эволюции млекопитающих

Полевки — это очень молодая и очень успешная группа грызунов. В одном только роде *Microtus* (серые полевки) более 60 видов. Это самый богатый видами род млекопитающих. Видообразование в нем происходило в Голарктике в течение последних 1.5 млн лет.

По происхождению всех серых полевок можно условно разделить на неарктических (американские аборигенные виды) и палеарктических, которые делятся на евро-малоазийских и азиатских: а последние — на дальневосточных и средне-центрально-азиатских. Все они эволюционировали на разных территориях, но в примерно одинаковых условиях среды, поэто-

© Бородин П.М., Башева Е.А.,
Голенищев Ф.Н., 2012



Павел Михайлович Бородин, доктор биологических наук, профессор кафедры цитологии и генетики Новосибирского государственного университета, заведующий лабораторией рекомбинационного и сегрегационного анализа Института цитологии и генетики СО РАН. Область интересов — эволюционная генетика. Лауреат диплома Президиума РАН за лучшие работы по популяризации науки 2009 г.



Екатерина Андреевна Башева, аспирант той же лаборатории. Область научных интересов — молекулярная биология мейоза, сравнительная цитогенетика млекопитающих. Лауреат Всероссийского открытого конкурса 2008 г. на лучшую научную работу студентов по разделу «Биологические науки».



Федор Николаевич Голенищев, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории териологии Зоологического института РАН. Занимается систематикой и эволюционной морфологией грызунов, проблемами видообразования.

му параллельно приобретали очень сходные адаптивные морфофизиологические особенности. Это делало морфологические критерии не очень надежным средством для построения филогении.

Только в последние годы молекулярно-генетические методы анализа митохондриальных и ядерных генов позволили получить данные, точнее и объективнее отражающие полевою генеалогию (рис.1), так как перестройки в генах в большей степени случайны и неадаптивны и, соответственно, не подвержены параллелизмам (гомологиям).

Хромосома	комплекс ДНК и белков. В соматических клетках каждая хромосома представлена в двух экземплярах (гомологах), в половых клетках — в одном экземпляре.
Аутосомы	пары хромосом, одинаковые у самцов и самок.
Половые хромосомы	отличаются у самцов и самок. Например, у самок млекопитающих — две X-хромосомы, а у самцов — X и Y.
Мейоз	деление ядра клетки с уменьшением числа хромосом в два раза. Первое деление мейоза начинается с синапсиса (спаривания) уже удвоенных гомологов и обмена участками между ними (рекомбинации). В местах рекомбинации образуются структуры, которые удерживают гомологичные хромосомы вместе до их расхождения в разные дочерние клетки в конце первого деления. Нарушения в синапсисе и/или рекомбинации хромосом приводят к образованию несбалансированных половых клеток.

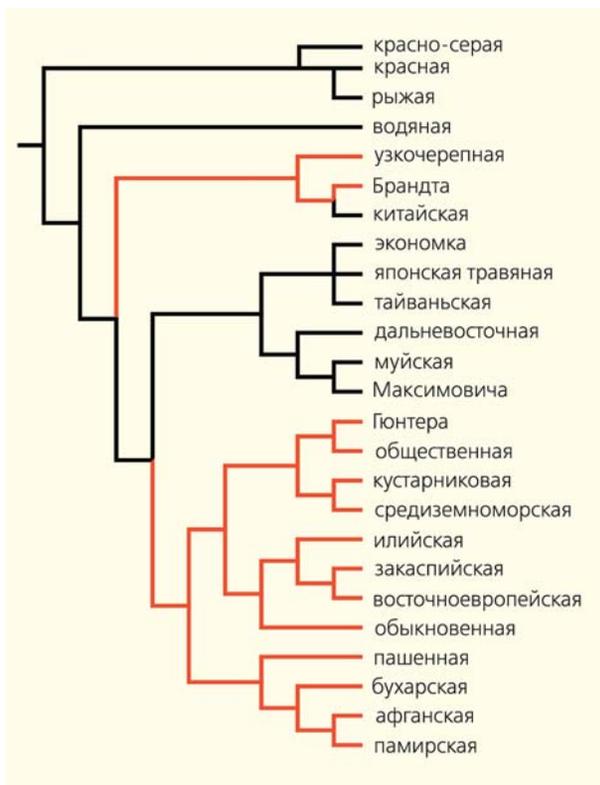


Рис.1. Филогенетическое древо полевок, составленное на основе морфологических и молекулярно-генетических данных. Красные линии ведут к асинептическим видам.

В ходе быстрой дивергенции разные виды полевок накапливали хромосомные различия, в том числе в строении и составе половых хромосом. Именно поэтому для анализа их эволюции мы и выбрали этих животных.

Скромное обаяние хромосом

Способов анализа эволюции хромосом много. Есть разные методы окрашивания, позволяющие надежно выявлять крупные перестройки хромосом (делеции, инверсии, транслокации). Однако чувствительности окрашивания недостаточно для обнаружения мелких перестроек — это возможно лишь

с помощью методов молекулярной биологии. Но все они требуют больших затрат времени и денег, а кроме того, нужно заранее знать, где искать перестройки. Мы пошли другим путем — предоставили хромосомам возможность делать это самим. Собственно, они и без нас этим занимаются в каждом цикле мейоза. Просто в нужный момент мы останавливали поиски и смотрели, что получилось.

Когда на защите дипломной работы студенты говорят, что их задачей было посмотреть то и се, все профессора в один голос возражают: «Не посмотреть, а изучить». Профессора при этом забывают, как много замечательных открытий люди сделали из-за того, что хотелось не изучить, а именно посмотреть: что там за мысом Горн; что будет, если уронить гирию с Пизанской башни или запустить навстречу друг другу пучки протонов в том коллаидере? Особенно силен мотив «посмотреть» у цитологов. Потому что, во-первых, это красиво. А все остальное — как максимум, во-вторых.

Сказочно чудны хромосомы при начале мейоза, когда вольно и плавно движут они теломеры свои по ядерной мембране, сходясь друг с другом [1]. Мы видим, как оси гомологичных хромосом тянутся друг к другу в лептотене, как в зиготене они объединяются — сначала теломерами, потом небольшими участками в середине; затем, сплетаясь как пара змей, надолго замирают в пахитене, чтобы залечить раны друг друга — двунитевые разрывы ДНК [1]. Именно в этот момент мы и фиксируем хромосомы и любуемся получившимися конфигурациями.

Все это выглядит очень красиво даже при полностью гомологичных хромосомах, но наиболее привлекательная картинка получается, если гомология нарушена хромосомными перестройками. Когда один гомолог нормальный, а другой содержит инвертированный (повернутый на 180°) участок, мы наблюдаем у таких гетерозигот изящные инверсионные петли. В свое время из чисто эстетических соображений мы специально конструировали на мышах сложные синаптические конфигурации. Например, скрещивали линии, несущие разные инверсии в одной и той же хромосоме [2].

Большую серию исследований по популяционной цитогенетике обыкновенных землероек [3, 4] мы провели, чтобы *посмотреть* на синаптическую цепь из восьми хромосом, образующуюся

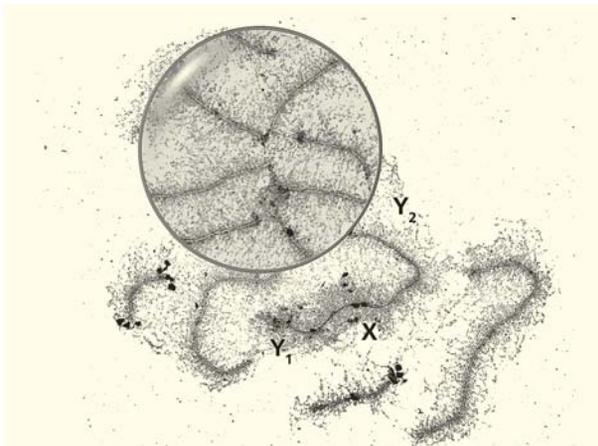


Рис.2. Микрофотография мейотической клетки самца обыкновенной землеройки, гетерозиготного по восьми транслокациям (в круге). У него три половые хромосомы: одна хромосома X и две спаренные с ней хромосомы Y.

у гибридов между двумя хромосомными расами. И согласитесь — оно того стоило (рис.2). Кстати, если уж речь зашла о землеройках, обратите внимание, что у самцов обыкновенной землеройки не две, а три половые хромосомы — X, Y₁ и Y₂. В работе, о которой речь пойдет дальше, мы использовали синаптические конфигурации половых хромосом полевок, чтобы следить за их эволюцией.

Рождение половых хромосом

Специалисты по хромосомам млекопитающих давно пришли к убеждению, что у их общего предка, который жил на Земле более 150 млн лет назад, хромосомы X и Y были одинаковыми и полностью гомологичными [5]. Затем на одной (той, которая потом стала Y) ген фактора транскрипции SOX3 удвоился, и в одной из копий возникла мутация, превратившая его в главный ген мужского пола SRY. Только этим и различались тогда X- и Y-хромосомы. Однако со временем в Y-хромосоме рядом с геном самцовости стали накапливаться полезные для самцов гены. Сейчас их довольно много — все гены, контролирующие сперматогенез, высокий рост и прочие мужские достоинства (рис.3). Они возникали за счет мутаций и/или переносились туда из других хромосом транслокациями и/или мобильными элементами.

Поскольку самкам такие гены были как минимум бесполезны, а иногда и вредны, естественный отбор стал подхватывать любые изменения, предотвращающие обмен генами (рекомбинацию) между X- и Y-хромосомами. Самое надежное средство против рекомбинации — это инверсии [2]. Все они, возникавшие в Y-хромосоме, немедленно закреплялись естественным отбором. В результате рекомбинация полностью прекратилась почти на

всей Y-хромосоме, и она стала быстро дивергировать от X-хромосомы. Тот крохотный район, где хромосомы X и Y еще синаптируют — это все, что осталось от их былой гомологии. Осталось почти у всех плацентарных млекопитающих [5], но за очень малыми исключениями. И, как всегда, именно исключения оказались самыми интересными. Не зря У.Бэтсон учил нас, генетиков: «Treasure your excursions» («Дорожите своими исключениями»).

Полевки как исключительные млекопитающие

В то время, когда Бородин занялся этой проблемой, было известно, что у самцов обыкновенной и пашенной полевок X- и Y-хромосомы в начале мейоза сходились вместе, но, в отличие от половых хромосом всех остальных млекопитающих, не синаптировали. Стало любопытно, как ведут себя половые хромосомы у других полевок, поэтому немедленно было решено посмотреть всех ближайших родственников обыкновенной полевки, которые жили в виварии, — восточноевропейскую, илийскую и закаспийскую. И хотя они сильно отличались друг от друга по размерам и форме половых хромосом (у одних они были нормальными, у других — гигантскими), в одном оказались сходными между собой — их X- и Y-хромосомы не синаптировали друг с другом (рис.4).

Предстояло выяснить, насколько широко это исключение распространено среди полевок, и понять, когда они утратили фундаментальное для всех плацентарных свойство — X—Y-синапсис.



Рис.3. Набор генов, локализованных на Y-хромосоме, как его представляли в 1980-х годах, задолго до эпохи секвенирования (слева), и современный список, основанный на результатах молекулярно генетического анализа (справа). Большинство генов в обоих списках определяют качества, специфичные для мужчин (по: <http://nitro.biosci.arizona.edu/humor/cmap.txt> и http://www.dnarss.com/The_Y_Chromosome.html).

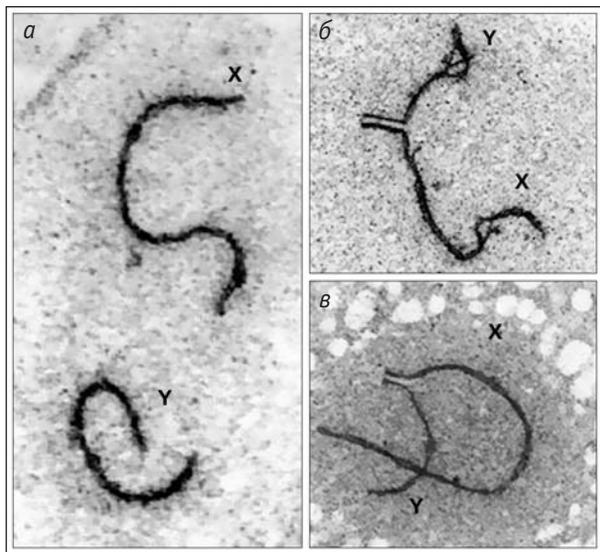


Рис.4. Асинаптические (слева) и синаптические (справа) половые хромосомы полевок: а — обыкновенная полевка, б — дальневосточная полевка, в — муйская полевка.

Для опытов Бородин попросил у Голенищева всех кого не жалко. Не жалко ему было имеющихся у него серых полевок (афганскую, бухарскую, общественную, гюнтерову, кустарниковую, полевку-экономку), а также несколько видов из семейства полевочьих, не относящихся к серым полевкам, — водяную полевку и три вида лесных полевок.

Оказалось, что половые хромосомы водяной полевки и всех трех видов лесных ведут себя в мейозе точно так же, как и половые хромосомы всех остальных млекопитающих, т.е. синаптируют в относительно коротком участке. Следовательно, общий предок всех полевок имел нормальные хромосомы X и Y. Исключение из правила для млекопитающих (отсутствие X–Y-синапсиса) представляли собой виды серых полевок, кроме полевки-экономки. Ее половые хромосомы вели себя не как у остальных серых полевок, а как у остальных млекопитающих.

Когда норма становится исключением

Из перемножения исключений возникала ниже-следующая картина эволюции половых хромосом полевок. У общего предка млекопитающих, который жил на Земле более 150 млн лет назад, хромосомы X и Y были одинаковыми и полностью гомологичными. С появлением Y-хромосомы, они стали быстро дивергировать и к моменту расхождения между грызунами и приматами (91 млн лет назад) район ее гомологии с X сократился до минимума и сохранялся у общего предка полевочьих до очень недавнего времени (1.5 млн лет назад). Более того, он был еще у общего предка полевки-

экономки и всех исследованных остальных серых полевок, который жил на Земле около 1 млн лет назад. Вскоре после этого в Y-хромосоме предка остальных серых полевок что-то сломалось и она окончательно утратила способность спариваться с X-хромосомой.

Вот такую стройную картину Бородин послал в редакцию журнала «Hereditas» [6]. А там уже ждала публикации статья его главного редактора с соавтором под примечательным названием «Курьзная нормальность синаптической ассоциации между половыми хромосомами двух видов полевочьих грызунов: полевки-экономки и рыжей полевки» [7]. Конечно, это было не письмо Уоллеса, да и Бородин был далеко не Дарвином, но все равно ему было обидно. Он посмотрел 14 (четырнадцать!) видов полевок и нарисовал величественную картину эволюции их половых хромосом. А его соперники изучили два вида из его же списка и написали про курьзную нормальность! Более того, предложили возмутительное объяснение этой нормальности. Согласно их теории, общий предок всех полевочьих имел синаптические половые хромосомы, потом общий предок всех серых полевок утратил способность к синапсису, а потом (вот это самое интересное) полевка-экономка чудесным образом эту способность восстановила!

И такое объяснение следовало из одного единственного факта — диплоидное число хромосом у экономки ($2n = 30$) одно из самых низких среди полевок. В те времена цитогенетики наивно полагали, что эволюция всегда идет в сторону уменьшения числа хромосом. Значит, что если у экономки хромосом меньше, чем у других полевок, то она продвинулась по пути эволюции гораздо дальше них, убогих и примитивных. А если экономка такая продвинутая, ее половые хромосомы не унаследовали от общего предка способность к спариванию, а приобрели ее сами по себе.

Эволюция параллельными курсами

Вскоре обе статьи появились в журнале [6, 7], и многие стали внимательно смотреть на разных полевок. Оказалось, что экономка среди серых полевок не одинока. Синаптические половые хромосомы обнаружили у всех ее ближайших родственников, принадлежащих к так называемой азиатской филогенетической группе. И не только у них, а еще у нескольких видов, отделившихся от общего ствола серых полевок несколько раньше, чем разошлись пути азиатских и всех остальных серых полевок (рис.1). Но это так и должно было быть, если в ходе эволюции способность к синапсису полевки утратили один-единственный раз.

Именно это допущение мы и решили проверить, включив в анализ несколько новых видов. Наиболее информативной нам показалась группа, которая включает широко распространенную уз-

кочерепную полевку и два центрально-азиатских вида — китайскую полевку и полевку Брандта. Эта ветвь очень рано отделилась от общего ствола — *после* того как серые полевки отделились от остальных полевоцких (синаптических), но *до* того, как разошлись эволюционные пути азиатской линии (синаптические полевки) и европейско-малоазиатской (асинаптические). Внутри этой ветви первой и давно отделилась узкочерепная полевка, а китайская полевка и полевка Брандта разошлись друг с другом относительно недавно (см. рис.1).

Кроме того, мы рассмотрели еще три вида полевок дальневосточной линии: полевку Максимовича, муйскую и дальневосточную, довольно близких родственников синаптических полевок (экономки, японской травяной и тайваньской). Два первых вида на предмет синапсиса никто не смотрел, а дальневосточную описали в «Зоологическом журнале» как асинаптическую, что показалось нам недоразумением. Хотя в статье было заявлено, что она асинаптическая, но из приведенных там электронно-микроскопических снимков этого никак не следовало. На них мы ясно видели синапсис между X и Y, а авторы его просто не замечали. Поэтому мы решили еще раз внимательно посмотреть на синапсис между X и Y у дальневосточной полевки.

Оказалось, что у всех трех видов азиатской линии (полевки Максимовича, муйской и, что особенно приятно, дальневосточной) наблюдался явный и несомненный синапсис между X- и Y-хромосомами (рис.4). Более того, мы обнаружили, что они не только спариваются, но и рекомбинируют (рис.5). Об этом однозначно свидетельствовало наличие в районе их синапсиса рекомбинационного комплекса белков, в том числе и белка MLN1. Поскольку обмен возможен только между абсолютно гомологичными участками хромосом, то обнаружение рекомбинационного комплекса белков в районе спаривания между X- и Y-хромосомами указывало на его абсолютную гомологию.

Более того, изучение гибридов муйской полевки с полевкой Максимовича показало, что X-хромосома первой спаривается с Y-хромосомой второй и, наоборот, Y-хромосома муйской полевки — с X-хромосомой полевки Максимовича. Следовательно, район спаривания между X- и Y-хромосомами не изменился за десятки тысяч лет, прошедших с момента расхождения этих видов.

Мы ожидали, что и другие виды, включенные в анализ, будут синаптическими. Однако против всех ожиданий, выяснилось, что половые хромосомы узкочерепной полевки и полевки Брандта не синаптируют вовсе и тем более не рекомбинируют. При этом морфология, и палеонтология, и молекулярно-генетические данные однозначно и определенно свидетельствуют о том, что общий предок узкочерепной полевки и полевки Брандта отделился от общего ствола гораздо раньше, чем разошлись европейско-малоазиатская (асинаптическая) и азиатская (синаптическая) линии (см.

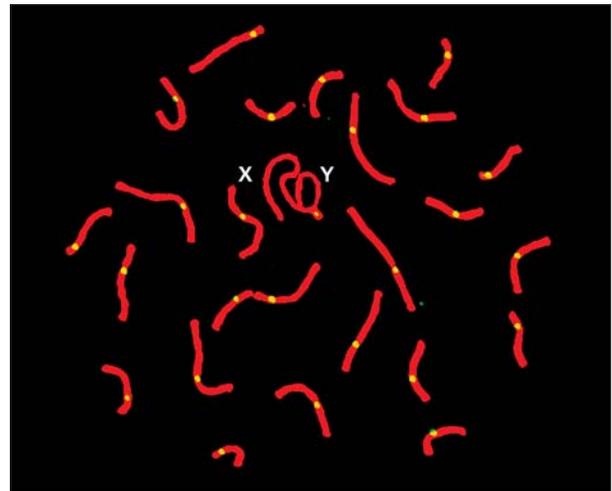


Рис.5. Точки рекомбинации (зеленый сигнал) на аутосомах и в районе спаривания половых хромосом дальневосточной полевки.

рис.1). Значит, такая простая и красивая теория об однократном возникновении асинапсиса половых хромосом у полевок пошла прахом.

Асинапсис у узкочерепной полевки и полевки Брандта возник независимо от полевок *европейско-малоазиатской* линии. Возможно, такое независимое возникновение асинапсиса в этих линиях было подготовлено предшествующей эволюцией. Видимо, еще до разделения основных филогенетических линий полевок у их общего предка появился дополнительный механизм, позволяющий половым хромосомам расходиться правильно как при синапсисе и рекомбинации, так и в их отсутствие. Что это за механизм, мы пока не знаем, но, как пишут в Гугле, когда что-то не открывается, «наши специалисты уже работают над этим».

Китайская полевка и будущее Y-хромосомы

С большим удивлением мы обнаружили, что китайская полевка относится к синаптическому типу. Она не могла унаследовать способность к синапсису от общего предка, поскольку половые хромосомы ее ближайших родственников (узкочерепной полевки и полевки Брандта) не синаптируют. Видимо, мы должны вернуться к тому самому объяснению, которое раньше с гневом отвергли для полевки-экономки, т.е. предположить, что способность к синапсису между X и Y у китайской полевки возникла *de novo*. Похоже, мы имеем на это право, поскольку сам тип синапсиса у нее вообще не полевоцный, а человеческий!

На X- и Y-хромосомах полевок синаптической группы и всех остальных грызунов имеется единственный и очень маленький район спаривания (см. рис.3). На половых хромосомах человека есть не один, а два района спаривания. Один из

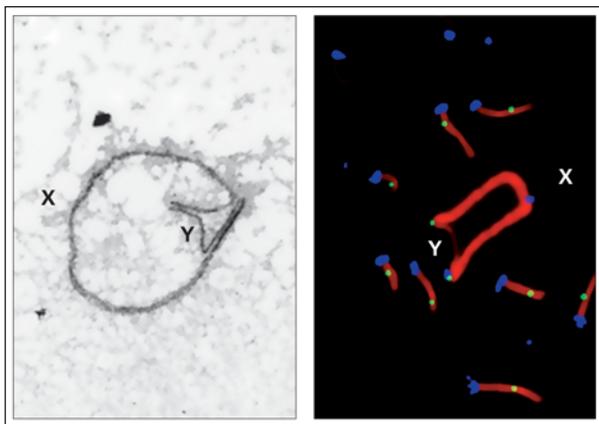


Рис.6. Синапсис и рекомбинация половых хромосом китайской полевки. Электронная (слева) и флуоресцентная микрофотографии. Рекомбинационные узелки (зеленый сигнал) наблюдаются в обоих районах синапсиса.

них факультативный, где синапсис происходит не всегда, а рекомбинация крайне редко. Это реликт того давнего (150 млн лет назад) состояния, когда прото-X и прото-Y-хромосомы были полностью гомологичны. Он, видимо, присутствует в той или иной степени у всех плацентарных. Другой район спаривания, где синапсис и рекомбинация происходят всегда, присущ только приматам. Он возник у них уже после того, как они разошлись с грызунами. Его образование связывают с переносом на половые хромосомы участка какой-то из аутосом [8].

У китайской полевки мы с удивлением обнаружили два района спаривания половых хромосом. Более того, они были гораздо больше, чем человеческие, и рекомбинация регулярно происходила в обоих районах (рис.6). Эти районы, видимо, возникли за счет переноса кусков аутосом, поскольку у общего предка китайской, узкочерепной полевки и полевки Брандта исходный район гомологии

между половыми хромосомами уже был утрачен. Значит, предсказанная заранее и широко разрекламированная смерть Y-хромосомы (в том числе и человеческой) не так уж неизбежна [8].

Идея о том, что мужская хромосома обречена, имеет как теоретические, так и практические основания. Согласно теории, прекращение рекомбинации в любой хромосоме (или на отдельном ее участке) медленно, но неуклонно ведет к мутационному расплавлению генома и деградации [1]. Это положение было доказано и экспериментально. Хромосомы, в которых рекомбинация искусственно подавлялась, накапливали вредные мутации и утрачивали полезные гены.

Такие же неприятные события начали происходить с Y-хромосомой в тот самый момент, когда она стала мужской. У человека, как и у большинства млекопитающих, она гораздо меньше по размеру, чем X-хромосома и большинство аутосом. В Y-хромосоме специфические красители выявляют мало районов, где могут находиться гены. Другие красители показывают, что она состоит в основном из повторяющихся последовательностей, не несущих полезной информации. X-хромосома, которая у самок рекомбинирует в мейозе, содержит более тысячи функциональных генов, а в Y-хромосоме их около 30. Все остальное — генетический мусор. Если аппроксимировать темп деградации Y-хромосомы на будущее, то оказывается, что жить ей осталось около 10 млн лет [8].

Однако наличие в Y-хромосоме человека дополнительного района спаривания с X-хромосомой и, самое главное, очень недавнее (меньше 1 млн лет назад) возникновение в Y-хромосоме китайской полевки двух новых районов спаривания показывает, что процесс этот обратим. Деградация Y-хромосомы может быть частично компенсирована за счет переноса в нее участков аутосом. И, как писал Дарвин в своей великой книге, «мы можем с доверием рассчитывать на безопасное и продолжительное будущее». ■

Работа частично финансировалась Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 09-04-00851 и 10-04-00008) и СОРАН.

Литература

1. Бородин П.М. Генетическая рекомбинация в свете эволюции // Природа. 2007. №1. С.14—22.
2. Бородин П.М., Торгашева А.А. Хромосомные инверсии в клетке и в эволюции // Природа. 2011. №1. С.19—26.
3. Поляков А.В., Бородин П.М. Хромосомный «портрет» бурозубки на фоне ледников // Природа. 2001. №1. С.34—40.
4. Бородин П.М., Рогачева М.Б., Ода С.И. Домовая землеройка на пути к видообразованию // Природа. 2002. №9. С.1—11.
5. Михайлов П. Хромосома X в четырех кругах незнания // Химия и жизнь. 2002. №8. С.24—27.
6. Borodin P.M., Sablina O.V., Rodionova M.I. Pattern of X-Y chromosome pairing in microtine rodents // Hereditas. 1995. V.123. P.17—23.
7. Ashley T., Fredga K. The curious normality of the synaptic association between the sex chromosomes of two arvicoline rodents: *Microtus oeconomus* and *Clethrionomys glareolus* // Hereditas. 1994. V.120. P.105—111.
8. Graves J.A., Wakefield M.J., Toder R. The origin and evolution of the pseudoautosomal regions of human sex chromosome // Hum Mol Genet. 1998. V.7. P.1991—1996.

Кристаллы нового поколения фотонные и другие «онные»

С.А.Никитов

В наступившем году не только журнал «Природа» отмечает свой юбилей — 100 лет исполняется и открытию дифракции рентгеновских лучей на кристалле (подробнее об этом см. статью В.С.Урсова в этом номере). Исторический опыт Макса фон Лауэ 1912 года (Нобелевская премия по физике 1914 г.) экспериментально подтвердил, что атомы в кристалле расположены регулярным образом, и поэтому стал основой рентгеноструктурного анализа. Вся физика твердого тела, в частности зонная теория, первоначально строилась для периодических атомных структур. Можно сказать, что прошлый век был веком кристаллов, представления о которых не стояли на месте (о чем свидетельствует последняя Нобелевская премия по химии, присужденная Д.Шехтману за открытие квазикристаллов — об этой работе можно прочесть в статье А.С.Аронина в конце номера). Расширилось и само понятие «кристалл»: этим термином стали обозначать упорядоченные системы со структурообразующими элементами различных природы и масштаба. Появились новые рукотворные материалы — так называемые фотонные, фононные и прочие «онные» кристаллы, среды с новыми необычными свойствами, аналогов которых зачастую в природе нет. Им и посвящена настоящая статья.



Сергей Аполлонович Никитов, член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, заместитель директора Института радиотехники и электроники им.В.А.Котельникова РАН, почетный доктор Тулузского университета (Франция). Лауреат премии Правительства РФ в области образования (2009). Область научных интересов — электродинамика сплошных сред, физика магнитных явлений, физика метаматериалов.

Когда фотоны подражают электронам

Если привычная сейчас микроэлектроника рождалась на монокристаллах германия и кремния, то развитие современной оптоэлектроники и фотоники уже непредставимо без таких искусственно создаваемых объектов, как фотонные кристаллы. Исходя только из названия, можно догадаться: фотонные кристаллы — некие среды, служащие «кристаллами» для фотонов, т.е. квантов света (или электромагнитных волн), в аналогичном смысле, что природные — для электронов. Обычные кристаллы — вещества, структура которых четко задана природой и управляется симметрией кристаллической решетки (кристаллы бывают кубические, гексагональные, тригональные и др. — в зависимости от типа решетки). Вспомним некоторые их черты, относящиеся к одному из фундаментальных свойств, важнейшему для электроники, — проводимости.

В кристаллах электроны находятся в периодическом электрическом поле атомных остовов. Отличительная особенность кристаллов — наличие разрешенных и запрещенных областей (зон) для энергии перемещающихся в них электронов*.

Иначе говоря, плотность состояний электронов равна нулю в запрещенной зоне и отлична от нуля в разрешенных зонах. Существование таких качественно различающихся энергетических интервалов имеет квантово-механическую природу и ответственно за различное поведение твердого тела по отношению к пропусканию электрического тока: как известно, кристаллы могут быть проводниками, диэлектриками, полупроводниками, сверхпроводниками, наконец,

* Как выяснилось позднее, зонная структура присуща и неупорядоченным твердым веществам — стеклам, аморфным пленкам, но это тема для другого разговора. Для нас принципиально, что настоящих запрещенных зон в таких материалах все же нет.

В металлах заполненная электронами валентная зона смыкается с пустой зоной проводимости, и электроны могут свободно перемещаться, увеличивая свою энергию под действием электрического поля и перенося по кристаллу электрический заряд. Полупроводники, играющие первую скрипку в современной электронике, характеризуются наличием относительно небольшой (по сравнению с диэлектриками) запрещенной зоны между валентной зоной и зоной проводимости (до 2–3 эВ). Электроны могут преодолеть ее благодаря термическому или иного рода возбуждению, что позволяет управлять проводимостью таких тел в широких пределах. В примесных полупроводниках, содержащих атомы примеси того или иного вида, в запрещенной зоне формируются разрешенные (или примесные) состояния для электронов, которые, случается, образуют даже целые примесные подзоны. Такие примеси могут захватывать электроны или дырки и существенно изменять проводящие свойства материала. По сути дела, примесные состояния обусловлены наличием дефектов в идеальной кристаллической решетке (внедрением в нее атомов другого сорта или, наоборот, отсутствием каких-то атомов; в этом смысле к дефектам можно отнести и поверхность, где решетка обрывается).

Возвращаясь к фотонным кристаллам, логично вообразить такие искусственно создаваемые среды, в которых распространяющийся свет (электромагнитная волна) и, следовательно, фотоны будут вести себя подобно электронам в кристаллах реальных. И действительно, здесь снова удастся говорить о разрешенных или запрещенных энергетических состояниях (для электромагнитной волны привычнее сказать — частотах), только уже для фотонов (подробнее см. [1]). Согласно корпускулярно-волновому дуализму электроны описываются как так называемые волны де Бройля. Соответствие между электронами в кристаллах и электромагнитными волнами в фотонных аналогах можно отследить по табл.1.

Таблица

Волна де Бройля	Электромагнитная волна
Энергия электрона E	Частота ω
Квазиимпульс \mathbf{p}	Волновой вектор \mathbf{k} характеризует фазовую скорость волны
Скорость электрона $\mathbf{v}_e = \text{grad}_p E$	Групповая скорость $\mathbf{v} = \text{grad}_k \omega$ равна скорости переноса энергии
Дисперсионная характеристика $E(\mathbf{p})$	Дисперсионная характеристика $\omega(\mathbf{k})$
Зона разрешенных энергий	Зона пропускания
Запрещенная зона	Зона непропускания
Поверхности равной энергии	Изочастоты
Уровни поверхностных или примесных состояний	Локализованные колебания

Чтобы понять свойства фотонных кристаллов, необходимо представить себе их структуру. Элементом, формирующим периодическую, упорядоченную систему, своего рода «элементарной ячейкой», которая транслируется (повторяется) в пространстве, в данном случае будет служить объем вещества, обладающий определенными оптическими характеристиками (например, показателем преломления). На рис.1, взятом из книги [2], показаны примеры одно-, двух- и трехмерных фотонных кристаллов, в которых разному цвету отдельных слоев или кубиков отвечают различные показатели преломления веществ, составляющих эти слои или кубики. Любопытно, что первые, одномерные, фотонные кристаллы известны свыше сотни лет: их исследовал еще лорд Джон Уильям Рэлей. Это многослойные пластинки, через которые может распространяться свет, но не любой. Показатели преломления и толщина слоев выбраны таким образом, что на определенных частотах возникает практически полное отражение световой волны от структуры, и такой свет она не пропускает. На самом деле и природа (в том числе жи-

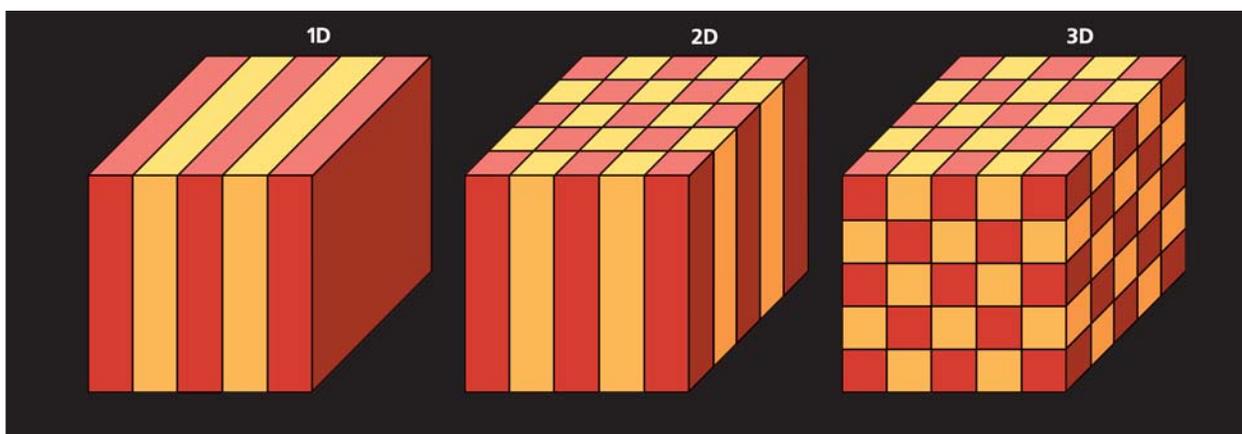


Рис.1. Фотонные кристаллы — периодические электромагнитные структуры. Приведены одно-, дву- и трехмерный варианты.

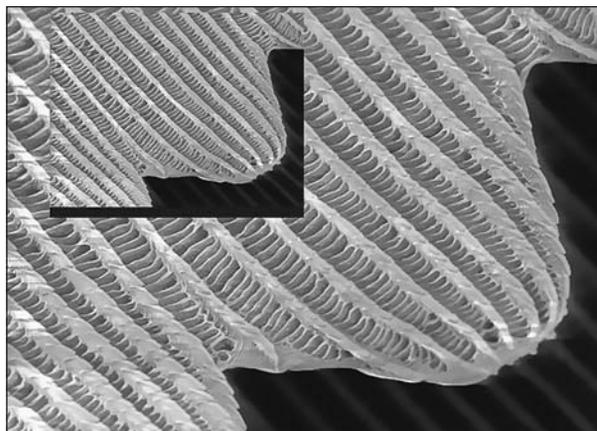


Рис.2. Бабочка *Chrysidia rhipheus*, крылья которой — идеальные фотонные кристаллы, и электронно-микроскопическое изображение фрагмента крыла.

вая) располагает некоторыми примерами фотонных кристаллов. Фотографии двух из них — бабочки и полудрагоценного камня опала — приведены на рис.2 и 3. Конечно, у бабочки таким материалом оказываются только крылья, представляющие собой идеальную периодическую слоистую структуру; в опалах — кристаллах двуокиси кремния — также присутствует идеальная периодическая «сверхструктура» (на масштабах больше атомных). Отражение света от различных слоев опала порождает необычную цветовую гамму этих камней, которая даже заслужила название «опалесценция». Но, чтобы получить материалы с новыми необычными свойствами и целенаправленно использовать их в дальнейшем, нужно уметь синтезировать кристаллы с наперед заданными характеристиками. Двух- и трехмерные фотонные кристаллы создаются за счет периодического изменения коэффициента преломления для распространяющихся в среде волн в двух и трех измерениях соответственно. Каков же должен быть пространственный масштаб искомым структур?

Запрещенные зоны для электромагнитных волн (как и для любых других) формируются благодаря дифракционным явлениям, когда волны, упруго рассеивающиеся на отдельных структурных элементах фотонного кристалла, взаимно гасят друг друга. Условие интерференции на периодической структуре, известное как условие Брэгга—Вульфа, в классическом виде обычно записывается как

$$2d\sin\alpha = n\lambda,$$

где d — период структуры, λ — длина распространяющейся волны, α — угол падения волны по отношению к границе раздела сред с разными показателями преломления, n — целое число. Запрещенные зоны (такие, где свет не может распространяться) образуются, когда длина волны сравнивается с периодом структуры. Иначе говоря, если мы хотим иметь подобный материал для видимого света, постоянная решетки должна быть порядка

микрометра. В соответствии с теорией электромагнитная волна, распространяясь в таких системах, будет испытывать отражение (непропускание) в одном, двух или трех направлениях. Для трехмерного кристалла это означает: могут существовать частотные области, для которых распространение света в фотонном кристалле полностью запрещено. Если же свет такой частоты попадет в кристалл (например, его излучит источник, который находится внутри), то наружу он не выйдет. Все это может оказаться чрезвычайно интересным с точки зрения разнообразных применений.

Трехмерный фотонный кристалл с абсолютной запрещенной зоной был впервые реализован для электромагнитных волн СВЧ-диапазона (см. работы [3, 4] и рис.4, взятый из работы [4]). Слово «абсолютная» подчеркивает тот факт, что электромагнитные волны из определенной полосы частот не могут распространяться здесь ни в каком направлении, так как плотность состояния фотонов с энергиями внутри зоны равна нулю в любой точке кристалла. Подобно реальным кристаллам, фотонные по наличию и характеристикам запре-



Рис.3. Опалы — идеальные природные фотонные кристаллы.

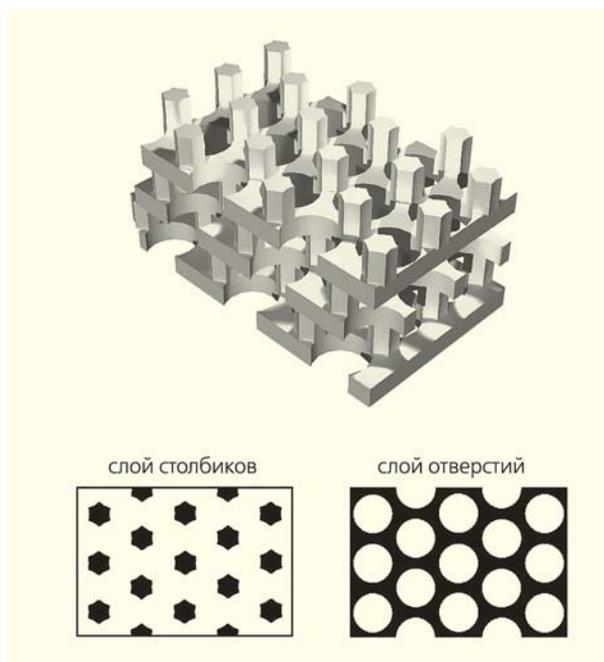


Рис.4. Первый фотонный кристалл из алюминия с «абсолютной» запрещенной зоной.

щенной зоны для фотонов делятся на оптические проводники, полупроводники, изоляторы и сверхпроводники. Аналогия продлевается и дальше: так, в фотонных кристаллах тоже бывают «примеси», называемые дефектами. Под дефектом тут понимается включение материала с другим показателем преломления; оно приводит к тому, что свет с частотами, соответствующими запрещенной зоне (когда распространение волны запрещено), может быть захвачен таким дефектом. В результате «непроходная» по своим параметрам волна все же пройдет сквозь кристалл. Дефекты могут быть самыми необычными — например, иметь самую причудливую геометрическую структуру и форму. В частности, такими, благодаря которым свет распространяется в изогнутых каналах с углом изгиба в 90°. По обычному волноводу с таким изгибом свет не пойдет из-за полного внутреннего отражения, в фотонных же кристаллах на дефектах меняется плотность состояния фотонов, становясь отличной от нуля, что и дает волне шанс распространяться.

О пользе фотонных кристаллов

Фотонные кристаллы представляются необходимыми элементами будущих фотонно-электрических либо чисто фотонных микро- и наносхем. В принципе с их помощью возможна реализация оптического компьютера, в котором и процессор, и жесткий диск сделаны на основе фотонных кристаллов, а роль информационных битов (0 или 1)

будут играть области с разным показателем преломления. Фактически одна половина периода периодической структуры фотонного кристалла будет одним битом, а другая — вторым. Процессоры в таких компьютерах могут выступать матрицы полупроводниковых элементов, например, с квантовыми ямами либо лазерами с вертикальной накачкой. В настоящее время рассматриваются и другие «оптические» возможности. В качестве соединительных элементов здесь понадобятся специальные оптические волокна.

Впервые микроструктурные, или фотонно-кристаллические, оптические волокна были созданы из набора стеклянных капилляров в 1997 г. в университете г. Бат (Великобритания) группой профессора П.Рассела. Приготавливалась заготовка (пачка) капилляров, которая затем подвергалась привычному для оптоволоконного процесса вытяжки, как это происходит с обычными заготовками [5]. В обычном оптоволокне свет распространяется в сердцевине, окруженной оболочкой, из-за полного внутреннего отражения света на внутренней поверхности последней. Для этого показатель преломления материала сердцевины должен быть больше показателя преломления оболочки, тогда свет в основном распространяется по сердцевине, причем потери на распространение не очень велики. Управлять свойствами света в волокне возможно, меняя условия создания волокна (т.е. во время технологического процесса). В частности, при изготовлении первых фотонно-кристаллических волокон структура пучка капилляров сохранялась, а диаметры капилляров соответственно уменьшались. Благодаря эффекту запрещенной зоны в фотонном кристалле, окружающем центральный капилляр, свет «запирался» внутри центрального капилляра, который мог иметь диаметр всего в несколько микрометров. Теоретически таким способом потери будут исключены вообще — чем не оптический сверхпроводник!

Позднее были предложены и другие методы создания фотонно-кристаллических волокон. Например, метод сверления. Сначала заготовку для оптоволоконного механически сверлят, создавая необходимую структуру (рис.5), а затем подвергают вытяжке (рис.6). Так можно получать оптоволокно с любыми структурой и размером отверстий, задающими распространение излучения с наперед выбранными свойствами. Дело в том, что оптоволокно представляет собой для распространяющегося света волновод кругового сечения. Если в свободном пространстве одна электромагнитная волна задается частотой и волновым вектором, то в волноводе из-за геометрических ограничений она распространяется в виде набора мод. Это означает, что на одной частоте там существует целый набор мод электромагнитных волн, различающихся волновыми векторами и своими пространственными характеристиками. В зависимости от толщины волновода или диаметра опто-

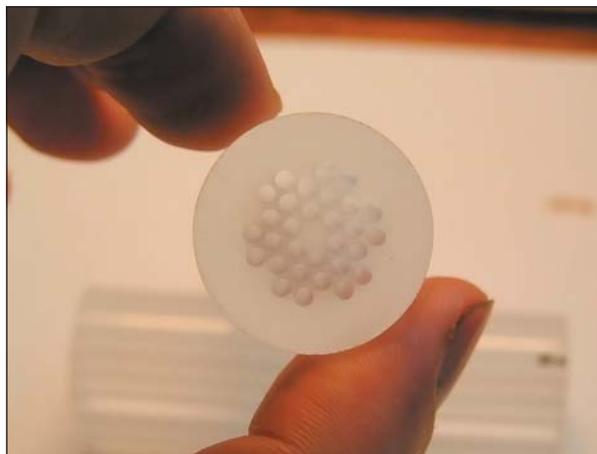


Рис.5. Установка для сверления и заготовка из плавленного кварца для вытяжки фотонно-кристаллического волокна.

волокна в нем на определенных частотах могут возбуждаться одна или несколько мод одновременно. Интенсивности их, конечно, будут различаться, но их можно обнаружить.

Итак, о каких конкретно свойствах оптоволоконна может идти речь? Ответить на этот вопрос поможет рис.7. Первые две картинки демонстрируют срезы волокон с высоким значением оптического двулучепреломления (напомним, это явление состоит в разложении света в анизотропных средах на две плоскополяризованных волны, которые распространяются с разными скоростями, т.е. преломляются по-разному). На третьей картинке показано фотонно-кристаллическое волокно, полезное для различных нелинейных приложений (в частности, оно может пропускать световую волну не с одной частотой, а сразу несколько волн, или мод, — как говорят, мультиплексный волновой сигнал). За счет того что сердцевина здесь окружена концентрическими слоями отверстий, эффективный показатель преломления части волокна с отверстиями меньше, чем сердцевины, т.е. излучение опять концентрируется в сердцевине. Четвертая картинка представляет волокно с малым диаметром сердцевины, фактически это одномодовое волокно (более одной моды в этом волокне распространяться не может), в котором область локализации поля занимает весь объем.



Рис.6. Установка для вытяжки оптоволоконна в лабораторных условиях.

Вообще в фотонно-кристаллических волокнах можно управлять распространением света существенно более эффективно, поскольку контраст показателей преломления между материалами сердцевины и оболочки в зависимости от количества отверстий, их геометрии и т.д. может быть сделан каким угодно. А поскольку в сердцевине таких волокон удастся концентрировать световое

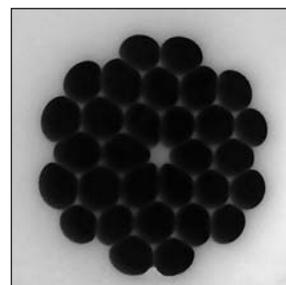
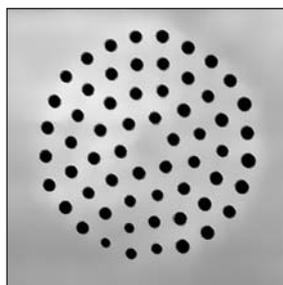
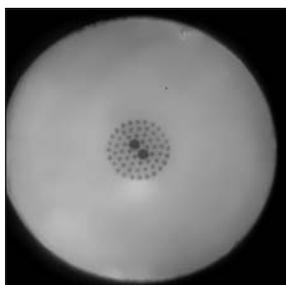
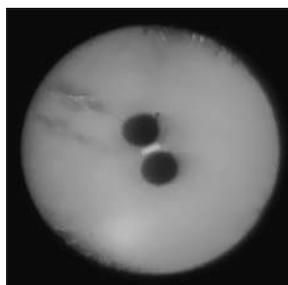


Рис.7. Срезы микроструктурных кварцевых оптоволокон с различным расположением дырок.

излучение большой интенсивности, они весьма перспективны для нелинейных приложений, в частности для создания волоконно-оптических лазеров и усилителей. Другая область их применения — в фотонных элементах с управлением поляризационными свойствами распространяющегося света. Подобные элементы служат неотъемлемой частью датчиков разных физических величин: электрического тока и напряжения, температуры, газовых составов и т.д. В настоящее время из всех фотонных кристаллов, пожалуй, именно фотонно-кристаллические волокна наиболее привлекательны с практической точки зрения и в действительности уже широко применяются.

От электромагнитных волн к механическим

По аналогии с фотонами квазичастицы акустических волн (или звука, т.е. волн плотности вещества в среде) называются фононами. На свойства упругих (твердых) тел влияет взаимное смещение атомов друг относительно друга. Коллективные смещения приводят к образованию упругих волн в твердых телах. В зависимости от частоты возбуждаемых колебаний волны называются ультразвуком (частота при этом лежит в интервале от нескольких килогерц до гигагерц) или гиперзвуком (для частот выше гигагерца, т.е. при более чем 10^9 колебаний в секунду). Если длина звуковой волны в твердом теле сравнивается с периодом упругой системы кристалла (межатомным расстоянием), в таком кристалле могут возникнуть эффекты, аналогичные рассмотренным для фотонных кристаллов, в частности, для акустических волн появятся запрещенные зоны. Однако при таком масштабе периодичности соответствующие частоты окажутся в диапазоне частот видимого света! Акустические волны подобных частот из-за сильного затухания распространяться фактически не смогут. Для практических же приложений, например в СВЧ-электронике, нужны совсем другие частоты — мегагерцы и гигагерцы, поэтому фононные кристаллы тоже приходится создавать искусственно. Роль периодически расположенных элементов в них играют объемы вещества с заданными упругими параметрами, т.е. в среде регулярно чередуются области с различными характеристиками. Простейший вариант — организация в материале соответствующим образом расположенных пустот. Типичные скорости упругих волн в самых распространенных кристаллах (кварца, ниобата лития, кремния и т.д.) порядка 10^3 см/с, так что обычные длины упругих волн в диапазоне СВЧ-частот — миллиметры и сотни или десятки микрометров. Естественно, фононные кристаллы для подобных применений должны иметь характерный период этого же порядка.

Один из первых, и весьма впечатляющий, фононный кристалл можно обнаружить совсем в не-

ожиданном месте — это установленная в Мадриде скульптура, созданная Эйсебио Семпере из полых стальных стержней диаметром 2,9 см, которые расположены строго регулярно с периодом 10 см (рис.8). Акустические свойства такой структуры были подробно изучены испанскими исследователями [6]. В частности, было установлено, что она обладает фононной запрещенной зоной для звука на частоте 1,67 кГц. Конечно, эта конструкция не имеет прямого отношения к твердотельным фононным кристаллам, но как демонстрация «эффекта фононного кристалла» весьма замечательна. Чтобы создать фононные кристаллы, подходящие для уже упоминавшихся применений в СВЧ-электронике, необходим на порядки меньший период структур. Здесь не обойтись без «продвинутых» технологий литографии и осаждения слоев различных веществ, а именно технологии молекулярно-лучевой эпитаксии, магнетронного распыления и др.

Важно отметить сложность описания фононных кристаллов по сравнению с фотонными: свойства первых зависят не только от контраста плотностей и жесткостей соответствующих элементов фононно-кристаллических структур, но и от соотношения скоростей для продольных и поперечных мод акустических волн. (В отличие от электромагнитных волн, распространяющихся в фотонных кристаллах и являющихся поперечными, акустические волны могут быть и поперечными, и продольными.) Однако очень интересная параллель — относительно возможности отрицательного преломления и отражения волн на границе — сохраняется.

Напомним, что впервые детальный анализ возможности отрицательного преломления был дан Л.И.Мандельштамом в одной из лекций в 1944 г. [7]. Именно там в первый раз появились рис.9 и подробное объяснение удивительного эффекта



Рис.8. Мадридская скульптура «Орган» — фононный кристалл.

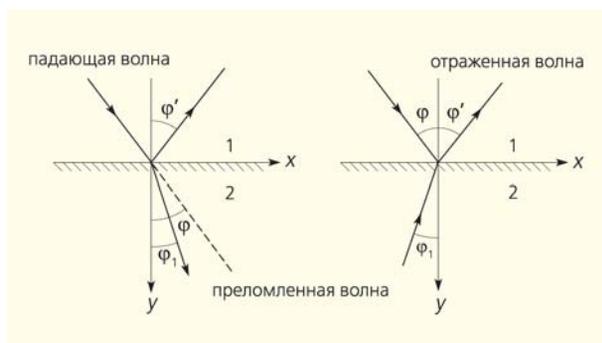


Рис.9. Положительное и отрицательное отражение света на границе раздела обычных материалов (слева) и обычного и левостороннего материала (справа).

при падении волны на границу двух разных сред. В среде 2 поток энергии, попадая во вторую среду из первой, откуда приходит волна, оттекает от границы раздела (как это и должно быть всегда), в то время как фаза (или фронт) волны набегает на эту границу, т.е. волна во второй среде движется как бы «вспять», не от границы, а к ней. Рисунок демонстрирует направление величин волновых векторов падающей, преломленной и отраженной волн; такая картина была позднее приведена в обзоре В.Г.Веселаго [8] со ссылкой на работу Мандельштама.

Столь экзотическим образом выполняться законы преломления и отражения света на границе раздела сред будут лишь в случае, если и диэлектрическая, и магнитная проницаемости в веществе 2 отрицательны. Уже научились получать материалы, в которых подобная ситуация реализуется, — они называются левосторонними. Однако, оказывается, добиться подобного эффекта можно и в нормальных, правосторонних, объектах, но имеющих структуру фотонных или фононных кристаллов. Рассмотрим второй вариант.

На рис.10 (взятом из работы [9] по фотонным кристаллам, но подходящем и для случая фононных), показано распространение акустической волны через фононный кристалл, представляющий из себя призму с периодической двумерной системой отверстий. Акустическая волна набегает на призму снизу. Далее волна проходит через призму и после преломления на косой границе раздела выходит из кристалла. Амплитуда и фаза волны, распространяющейся в периодической структуре, промодулированы периодом этой структуры. Мода нулевого порядка проходит без преломления, мода первого порядка преломляется, однако не по варианту, привычному для обычных материалов, а в соответствии с законами преломления для левосторонних сред. Такое, конечно, может быть только при определенных частотах акустической волны, когда выполняется условие брэгговского отражения. Более того, данный эффект связан с существованием в структуре так

называемых обратных волн. Последние характеризуются тем, что для них, в отличие от прямых волн, скалярное произведение векторов групповой скорости, ответственной за перенос энергии, и фазовой скорости (или волнового вектора) отрицательно, что, собственно, и означает отрицательное преломление. Конечно, не все моды и не для всех частот волны в фононных кристаллах оказываются обратными, однако при определенных условиях это может случиться, как и было продемонстрировано, например, в работе [10].

Эффект отрицательного преломления интересен и другими своими сторонами. В частности, при прохождении волны через пластинку (фононный кристалл) с отрицательным отражением возможно возникновение так называемого эффекта суперлинзы. Такая суперлинза фактически фокусирует изображение с разрешающей способностью, превосходящей волновой предел, т.е. по сути с субволновым разрешением. Это позволит «видеть» детали с размерами меньше длины волны. Сейчас подобные линзы на основе фотонных

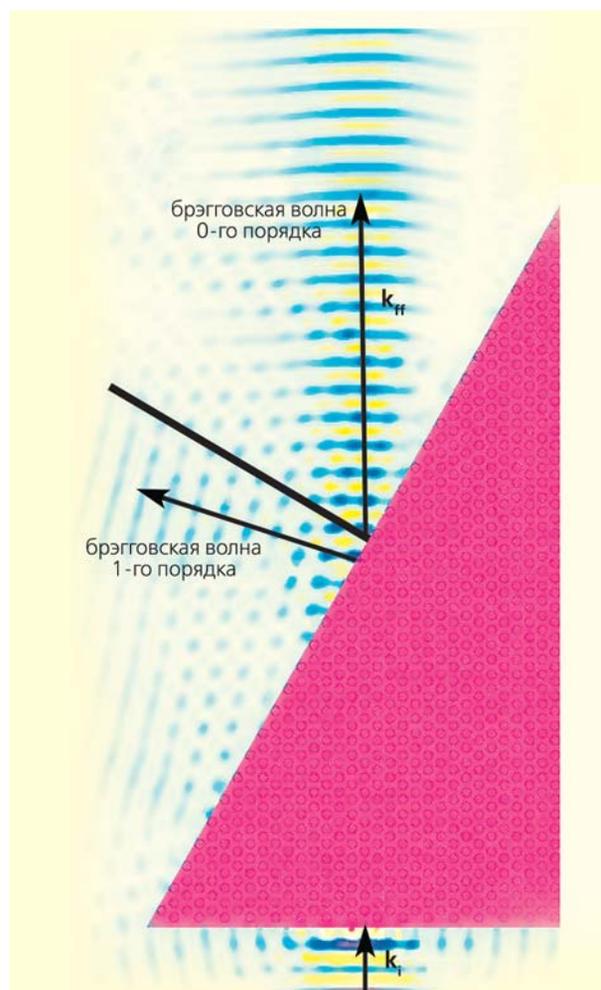


Рис.10. Распространение акустической волны через фононный кристалл.

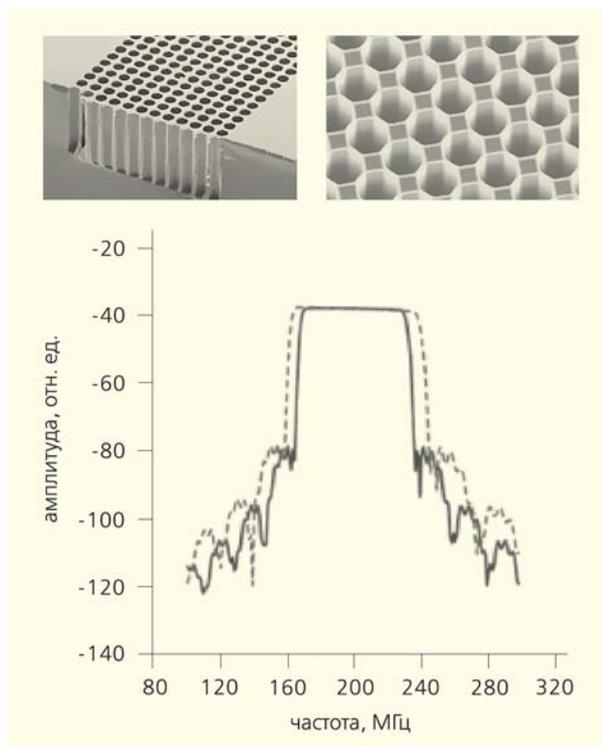


Рис.11. Фононный кристалл на основе пленки кремния и амплитудно-частотная характеристика распространяющегося в нем ультразвука.

и фононных кристаллов уже созданы. А если учесть, что фононные структуры можно делать в том числе и на основе кремния, логично попытаться включить их в полупроводниковые интегральные схемы, порождая тем самым новые типы интегральных устройств. На рис.11 приведены макет двумерного фононного кристалла, полученного из пленки кремния, и амплитудно-частотная характеристика распространяющихся в таком кристалле волн. Наличие запрещенной зоны следует из прямоугловности характеристики, приведенной на рисунке. Фононные кристаллы другого типа можно изготавливать в кварцевом оптическом волокне, что позволяет одновременно возбуждать в нем и свет, и ультразвук, т.е. такое волокно будет сразу и фотонным, и фононным кристаллом. Изменяя частоту одной из волн, можно добиться существенного преобразования другой волны при ее рассеянии на первой и наоборот.

В игру вступает спин

Как уже упоминалось выше, фотонные кристаллы для электромагнитных волн СВЧ-диапазона были созданы и исследованы. Однако при данных длинах волн размеры такого кристалла оказывались достаточно велики — несколько сантиметров или даже десятков сантиметров. С точки же зрения ре-

альных применений фотонных кристаллов в этом частотном диапазоне гораздо предпочтительнее использовать магнитостатические спиновые волны или акустические волны (последние в фононных кристаллах).

Магнитостатические спиновые волны (МСВ) представляют собой волны макроскопического магнитного момента ферромагнетика (который, как известно, складывается из спинов входящих в структуру атомов) при возбуждении магнитной системы возмущением магнитного поля. Длина волны МСВ зависит от частоты возбуждающего внешнего поля, геометрии структуры, в которой распространяется волна, внешнего магнитного поля и свойств ферромагнитного материала. В СВЧ-диапазоне для структур, содержащих магнитные слои в несколько микрометров толщиной, длина волны МСВ лежит в пределах от 1 до 1000 мкм, а групповая скорость — в интервале 10^4 – 10^9 см/с. Это на несколько порядков меньше скорости электромагнитной волны в среде. (Напомним, что скорость электромагнитной волны, равная в вакууме $3 \cdot 10^{10}$ см/с, в средах становится меньше в n раз, где n — показатель преломления материала среды.) Значит, МСВ — волна, сильно замедленная по сравнению с электромагнитной. Таким образом, при возбуждении МСВ внешней электромагнитной волной (например, сопровождающей возбуждающий переменный ток) СВЧ-диапазона можно добиться задержки возбуждающего МСВ электромагнитного сигнала в несколько микросекунд на длине пробега в 1 см. Этот факт чрезвычайно важен с точки зрения применений, поскольку современная аппаратура позволяет во времена такого масштаба сделать любую желаемую обработку сигнала (волны).

Нами, пожалуй, впервые, были предложены для исследования структуры, которые мы назвали — по аналогии с фотонными — магнотонными кристаллами [11]. Магноны — квазичастицы спиновых волн, поэтому для структуры типа фотонных кристаллов, но для магнонов (спиновых волн) такое имя вполне естественно. Структурным элементом магнотонного кристалла служат элементы среды с разным магнитным моментом. Например, среда из двух различных магнитных материалов или из магнитного и немагнитного. Мы впервые создали двумерные магнотонные кристаллы на основе пленок железо-иттриевого граната (ЖИГ) со специально вытравленными регулярно расположенными отверстиями и исследовали их свойства. На рис.12, слева показана микрофотография поверхности такого объекта; справа представлены спектры прохождения, а именно амплитудные и фазовые частотные зависимости поверхностных МСВ, распространяющихся в магнотонных кристаллах. В спектре волн четко видны запрещенные зоны.

Создание структур типа магнотонных кристаллов в ферромагнетиках интересно еще и потому, что в отсутствие магнитного поля ферромагне-

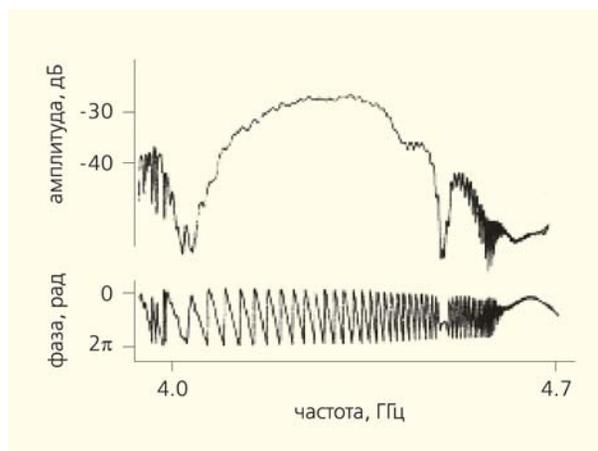
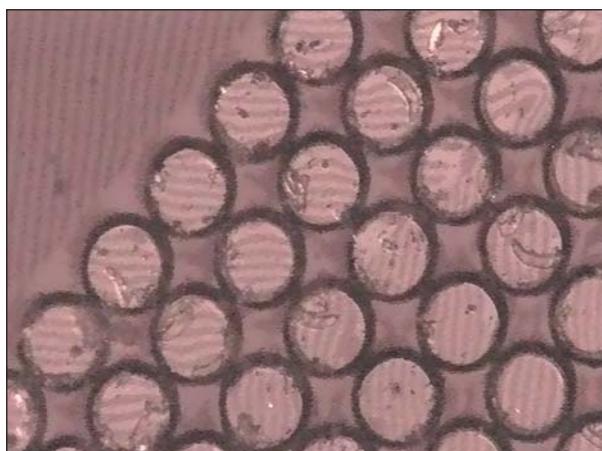


Рис.12. Магنونные кристаллы на основе ЖИГ. Поверхность магنونного кристалла (изображение магнитно-силового микроскопа, диаметр отверстий 20 мкм) и спектры прохождения МСВ в магنونных кристаллах (минимум в спектрах соответствует запрещенной зоне кристалла).

тик разбивается на домены. При помещении его во внешнее магнитное поле определенной величины домены исчезают — образец становится насыщенным и однодоменным. Наличие же структуры магنونного кристалла приводит к тому, что отдельные элементы структуры действуют как центры, удерживающие домены, тем самым за-

ставляя их исчезать при гораздо больших величинах магнитных полей, чем в обычных ферромагнетиках (см. рис.12, слева). Этот эффект может быть использован, например, при создании элементов магнитной памяти. Другие возможные структуры, на основе которых получены магنونные кристаллы, показаны на рис.13. Правые кар-

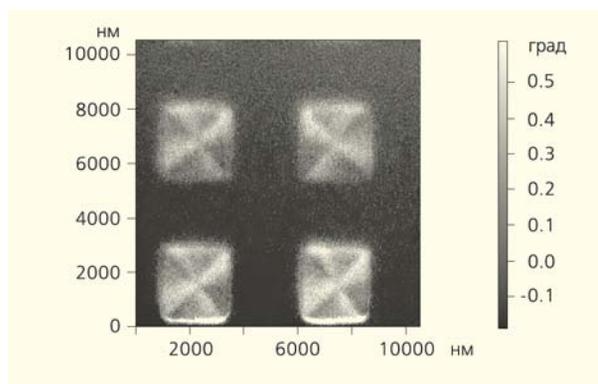
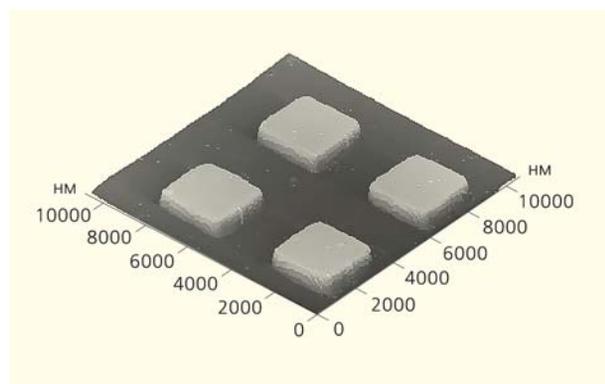
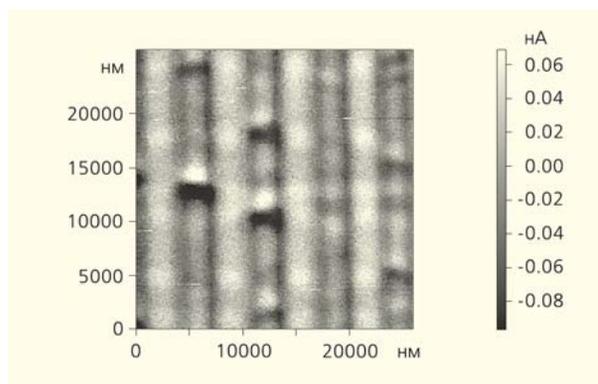
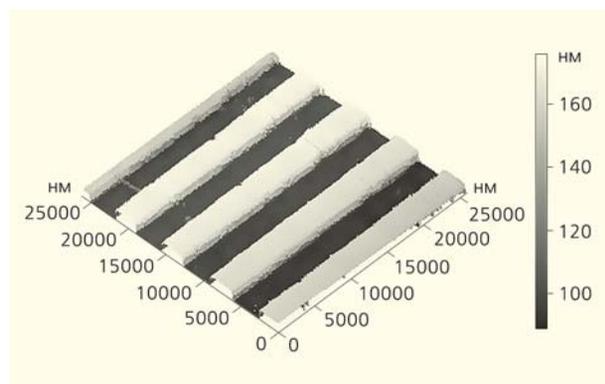


Рис.13. Полосовые (вверху) и островковые (внизу) магنونные кристаллы. Одномерный полосовой магنونный кристалл состоит из магнитных пермалловых ($\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$) полосок, двумерный магنونный кристалл — из островков пермаллоя; изображения слева получены с помощью атомно-силового, справа — с помощью магнитно-силового микроскопов.

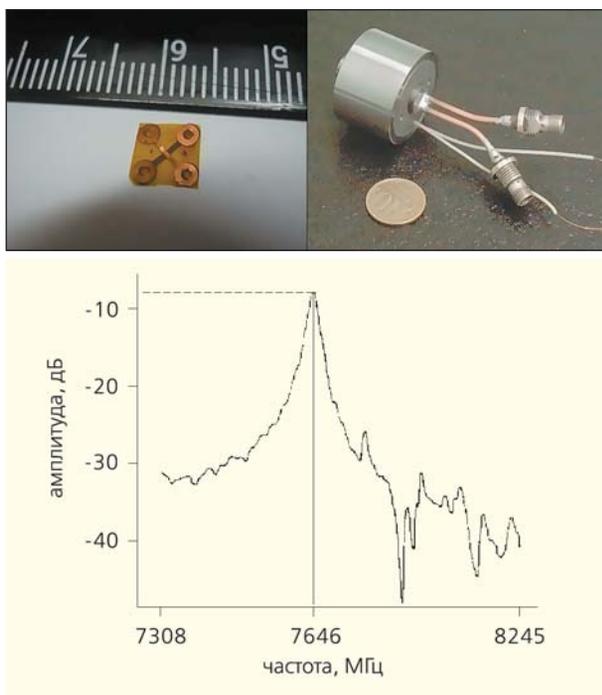


Рис.14. Фотография макета фильтра на магнонных кристаллах и его высокочастотная характеристика.

тинки демонстрируют магнитную структуру магнетонного кристалла в отсутствие внешнего магнитного поля. Видно, что отдельные полоски и островки разбиваются на домены.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 11-07-12052-офи-м) и Минобрнауки (контракты 11.G34.31.0030 и P556).

Литература

1. Богомолов В.Н., Прокофьев А.В. Фотонные кристаллы // Природа. 1998. №8. С.27—36.
2. Joannopoulos J.D., Johnson S.G., Winn J.N. Photonic crystals: molding the flow of light. 2nd ed. Princeton, 2008.
3. Yablonovitch E., Gmitter E., Leung T.J. Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms // Phys. Rev. Lett. 1991. V.67. №17. P.2295—2298.
4. Johnson S.G., Joannopoulos J.D. Three-dimensionally periodic dielectric layered structure with omnidirectional photonic band gap // Appl. Phys. Lett. 2000. V.77. P.3490—3492.
5. Russell P.St.J. Photonic crystal fibers // Science. 2003. V.299. P.358—362.
6. Martinez-Sala R., Sancho J., Sanchez J.V. et al. Sound-attenuation by sculpture // Nature. 1995. V.378. P.6554.
7. Мандельштам Л.И. Лекции, прочитанные 26 февраля 1940 г. и 5 мая 1944 г. // Полное собрание трудов. Т.5. М., 1950.
8. Веселаго В.Г. Электродинамика веществ с одновременно отрицательными ϵ и μ // УФН. 1967. Т.92. С.517—526.
9. Foteinopoulou S., Soukoulis C.M. Negative refraction and left-handed behavior in 2d photonic crystals // Phys. Rev. B. 2003. V.67. P.235107.
10. Zhang X., Liu Z. Negative refraction of acoustic waves in two-dimensional phononic crystals // Appl. Phys. Lett. 2004. V.85. №2. P.341—343.
11. Nikitov S.A., Tailbades P., Tsai C.S. Spin waves in periodic magnetic structures-magnonic crystals // J. Magn. Mater. 2001. V.236. P.320—330.
12. Kbitun A., Bao M., Wang K.L. Magnonic logic circuits // J. Phys. D: Appl. Phys. 2010. V.43. P.264005.

В настоящее время свойства таких кристаллов исследованы достаточно подробно. Более того, уже созданы реальные устройства на их основе — фильтры электромагнитного излучения, работающие в популярном диапазоне частот от 1 до 20 ГГц. Этот СВЧ-диапазон чрезвычайно важен и для мобильных беспроводных телекоммуникационных сетей, и для цифрового телевидения, и для радиолокации, и для многих других применений. На рис.14 приведена фотография макета такого фильтра и его высокочастотная характеристика. На основе таких кристаллов возможно создание не только отдельных устройств, но и логических цепей и целых магнонных интегральных схем [12].

* * *

Конечно, в небольшой статье невозможно охватить весь спектр проблем, которым уделяется внимание в стремительно развивающейся науке о кристаллах нового поколения. Так, за рамками обзора остался еще один интереснейший объект — плазмонные кристаллы. Отдельная (причем обширная) тема — метаматериалы, которые можно представить как квазиизотропные кристаллы. Можно уверенно утверждать: если традиционные кристаллы утрачивают свои былые позиции, уступая место новым материалам нанозлектроники, то история «онных» кристаллов еще только начинается. Чрезвычайно интересная физика этих объектов дает богатую пищу для исследователей и позволяет надеяться на разнообразные применения кристаллов новых типов. ■

Жидкие кристаллы — «кентавры» природы

В.П.Шибает

В греческой мифологии кентавры — это полулюди-полулюки, могущественные существа, наделенные силой лошади и разумом человека. Называя жидкие кристаллы и жидкокристаллические (ЖК) вещества кентаврами природы, я хочу лишь подчеркнуть необычность их строения, предопределяющего сочетание прямо противоположных свойств — текучей жидкости и кристаллического тела.

Такие гибридные соединения существуют в природе и создаются руками нас, химиков [1]. Мы действительно можем совмещать в одном веществе самые разнообразные молекулярные фрагменты и получать множество соединений, в том числе жидкие кристаллы и ЖК-полимеры. Сегодня уже никого не удивит необычное сочетание таких слов, как ЖК-телевизоры, ЖК-экраны, ЖК-мониторы, и мы даже не задумываемся, какой смысл скрывается за этими названиями. Попробуем «расшифровать» их значение, но сначала заглянем в прошлое [2].

Немного истории

Австрийский ботаник Ф.Рейнитцер (1857—1927), работавший в Институте физиологии растений в Высшей немецкой технической школе в Праге, изучал эфиры холестерина. В 1888 г.



Валерий Петрович Шибает, член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор кафедры высокомолекулярных соединений химического факультета МГУ, лауреат Государственной премии СССР (1985), премии Президиума РАН им.В.А.Каргина (2002) и Ломоносовской премии МГУ (2006), заслуженный деятель науки РФ. Научные интересы связаны с синтезом, изучением структуры и физико-химических свойств термотропных жидкокристаллических полимеров.

Рейнитцер обнаружил необычный эффект двойного плавления одного из эфиров, а именно холестерилбензоата. Это кристаллическое соединение плавилось при 145°C, но затем не переходило в прозрачный расплав, а превращалось в мутную, сильно рассеивающую свет, жидкость. Когда температура достигала 179°C, жидкость будто бы плавилась повторно — и становилась прозрачным расплавом (рис.1).

Эту температуру Рейнитцер назвал точкой просветления. Удивленный результатами, он отправил исследуемые им препараты немецкому кристаллографу О.Леману с просьбой помочь разобраться в странном поведении холестерилбензоата. С помощью поляризационного микроскопа Леман установил, что мутная фаза, наблюдаемая Рейнитцером, анизот-

ропна и обладает двойным лучепреломлением, свойственным только кристаллическим соединениям. Поскольку анизотропия присуща твердому кристаллу, а вещество в мутной фазе, в интервале температур 145—179°C, было жидким, Леман назвал его жидким кристаллом. (Подобного рода соединения в то время часто называли также кристаллическими жидкостями и мягкими кристаллами.)

Впоследствии вещества, способные выше точки плавления сочетать свойства жидкостей (текучесть) и кристаллических тел (анизотропию), стали называть жидкокристаллическими, или жидкими кристаллами*.

* Их называют также и мезоморфными веществами, а образуемую ими ЖК-фазу — мезофазой (от греч. $\mu\epsilon\sigma\omicron\varsigma$ — промежуточный, средний и $\phi\alpha\sigma\alpha$ — фаза).

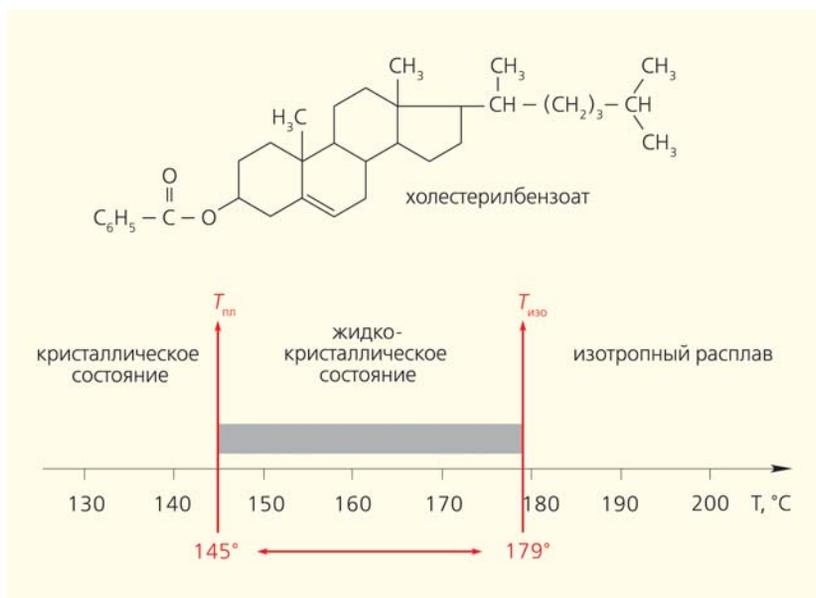


Рис.1. Диаграмма фазовых состояний холестерилбензоата. Этот сложный эфир холестерина был первым жидкокристаллическим соединением, исследованным австрийским ботаником Ф.Рейнитцером в 1888 г.

Однако чтобы понять природу ЖК-состояния веществ, установить их структурную организацию, изучить особенности фазового поведения и физических свойств жидких кристаллов, потребовался не один десяток лет. Первоначальное «неприятие» учеными столь необычных соединений вполне понятно, ведь считалось, что существуют только три состояния веществ — твердое, жидкое и газообразное. Но жидкие кристаллы не «вписывались» ни в одно из них и потому рассматривались как коллоидные растворы, или эмульсии, а в действительности оказалось, что представляют собой четвертое состояние вещества. Активные исследования мезоморфных веществ начались в 1920—1930-х годах. Работы Д.Форлендера в Германии во многом способствовали синтезу новых ЖК-соединений. Французский ученый Ж.Фридель, занимавшийся структурой жидких кристаллов, в 1922 г. предложил их первую структурную классификацию. Чуть позднее голландец С.Озеен и чех Х.Цохер создали теорию упругости [об этом см. 2].

В СССР первыми исследователями жидких кристаллов были профессор В.К.Фредерикс (1885—1944) и аспирант Ленинградского государственного университета В.Н.Цветков (1910—1999). Еще в начале 30-х годов они изучали физические свойства этих соединений: поведение в электрических и магнитных полях, реологические и диэлектрические характеристики. К сожалению, Великая Отечественная война и трагическая смерть Фредерикса прервали научные исследования. Однако основы современной электро- и магнитооптики жидких кристаллов, признанные классическими, были заложены именно в работах Фредерикса и Цветкова [2].

Но до 1960-х годов к жидким кристаллам проявлялся только чисто академический интерес. Правда, еще в 1936 г. Фредерикс, подготовивший материал для доклада А.Ф.Иоффе на сессии Академии наук СССР, отмечал, что жидкие кристаллы необходимо изучать как новое фазовое состояние вещества и их можно использовать «вследствие тесной связи с технически-

ми вопросами, в которых решающее значение имеет тонкий слой жидкости, примыкающей к твердому телу». Это утверждение было многократно подтверждено в дальнейших исследованиях, а структурные перестройки жидких кристаллов под действием электрического и магнитного полей вошли в историю под названием «переходы Фредерикса».

В середине 60-х годов, когда стала бурно развиваться микроэлектроника, потребовались вещества, способные быстро откликаться на воздействие внешних полей и потреблять при этом минимум энергии. И здесь на помощь пришли жидкие кристаллы. Их двойственный характер (анизотропия свойств и высокая молекулярная подвижность) позволял создавать управляемые внешним электрическим полем быстродействующие и экономичные ЖК-индикаторы. Советские ученые активно участвовали в изучении структурных особенностей жидких кристаллов и поисках путей их практического применения. Инициатором этих исследований был Чистяков, основавший первую в СССР лабораторию жидких кристаллов сначала в Ивановском педагогическом институте (теперь это Ивановский государственный университет), а затем и в Институте кристаллографии, в Москве. Именно Чистяковым написана первая книга о жидких кристаллах на русском языке [3].

60-е и 70-е годы прошлого века можно назвать временем «жидкокристаллического» бума. Помимо весьма активных исследований этих «кентавров» созидались международные и национальные конференции и симпозиумы, организовывались школы молодых ученых. За короткое время был выпущен десяток тематических сборников и монографий. Кроме изучения жидких кристаллов проводились синтез и исследование жидкокристаллических и мезоморф-

ных полимеров [4–6]. Об этих «полимерных кентаврах» пойдет речь в следующей статье.

Лавинообразный поток научных публикаций в этой области привел даже к изменению названия международного журнала «Molecular Crystals», он превратился в «Molecular Crystals and Liquid Crystals». С 1986 г. в Великобритании начал издаваться ежемесячный журнал «Liquid Crystals», а в 1990 г. было создано Международное общество по жидким кристаллам (International Liquid Crystals Society) со своим печатным изданием «Liquid Crystals Today». В разных странах появились национальные отделения этого общества. В России в 1992 г. было образовано «Содружество» — общество по жидким кристаллам, куда вошли ученые из стран СНГ, Германии, Италии, Болгарии и других государств Европы. В 2001 г. у этого общества появился свой журнал — «Жидкие кристаллы и их практическое применение». (Кстати, его главный редактор Н.В.Усольцева — продолжательница работ чистяковской школы.) Особо следует отметить Нобелевскую премию (правда, по физике), присужденную французскому ученому П.Ж. де Жену за выдающиеся исследования сложных форм материи, в частности жидких кристаллов и полимеров [7].

В настоящее время поиск и исследование ЖК-систем активно продолжают. Каждые два года созываются европейские и международные конференции по жидким кристаллам, не считая двух-трех тематических симпозиумов по отдельным направлениям их изучения. Химики создают новые экзотические типы «кентавров», а физики и инженеры пытаются разгадать и использовать далеко не простые особенности поведения столь необычных соединений.

Хотя почти каждый человек пользуется приборами, в которых работают жидкие кристаллы, далеко не всем известно, как это происходит. В «Природе»

о них неоднократно публиковались статьи разного характера*, но, несмотря на это, не грех напомнить, что представляют собой эти необычные вещества, привлекая внимание многих исследователей. Каковы особые свойства этих загадочных жидкостей, сделавшие их практически незаменимыми сегодня?

Молекулярное строение и структура

Сейчас известны уже десятки тысяч органических соединений, которые могут находиться в ЖК-состоянии, и число их непрерывно увеличивается. Эти соединения бывают термотропными (образуются при нагрева-

* См., напр.: *Группа по изучению жидких кристаллов Университета Орсе*. Жидкие кристаллы (1972. №2. С.67–75); *Сонин А.С., Степанов Б.М.* Приборы на жидких кристаллах (1974. №11. С.14–22); *Чистяков И.Г., Селезнев С.А.* Биологическая роль лиотропных жидких кристаллов (1977. №9. С.38–45); *Островский Б.И.* Разнообразие жидких кристаллов (1997. №7. С.50–60).

нии или охлаждении) и лиотропными (их получают растворением твердых тел в определенных растворителях). Здесь речь пойдет о термотропных жидких кристаллах.

Главные особенности всех таких соединений — анизотричная форма и жесткость составляющих их молекул. Наиболее известны и широко распространены **каламитики** (от греч. *καλαμύς* — тростник), построенные молекулами стержнеобразной формы. Большинство каламитиков состоит из двух или трех бензольных колец, связанных между собой непосредственно или с помощью химических групп (рис.2)**.

Вместо бензольных колец в молекулах могут быть циклогексановые и гетероциклические фрагменты, а также производные холестерина.

Помимо каламитиков существуют и другие типы жидких

** Сами молекулы ЖК-соединений очень часто называют мезогенами, а жесткие фрагменты молекул, способствующие формированию ЖК-фазы — мезогенными группами.

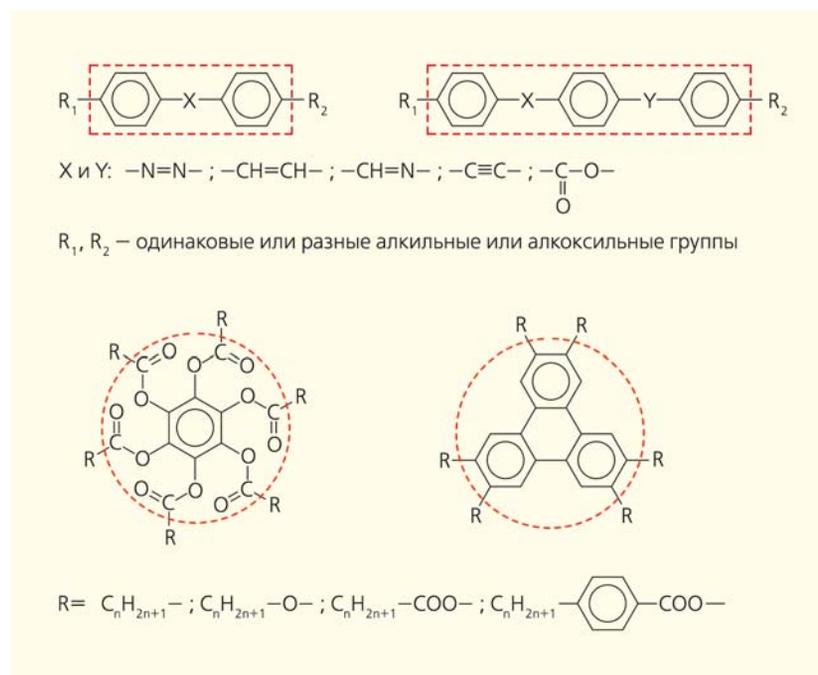


Рис. 2. Примеры химических соединений, образующих ЖК-фазы из стержнеобразных (вверху) и дискообразных молекул. Мезогенные группы показаны пунктиром.

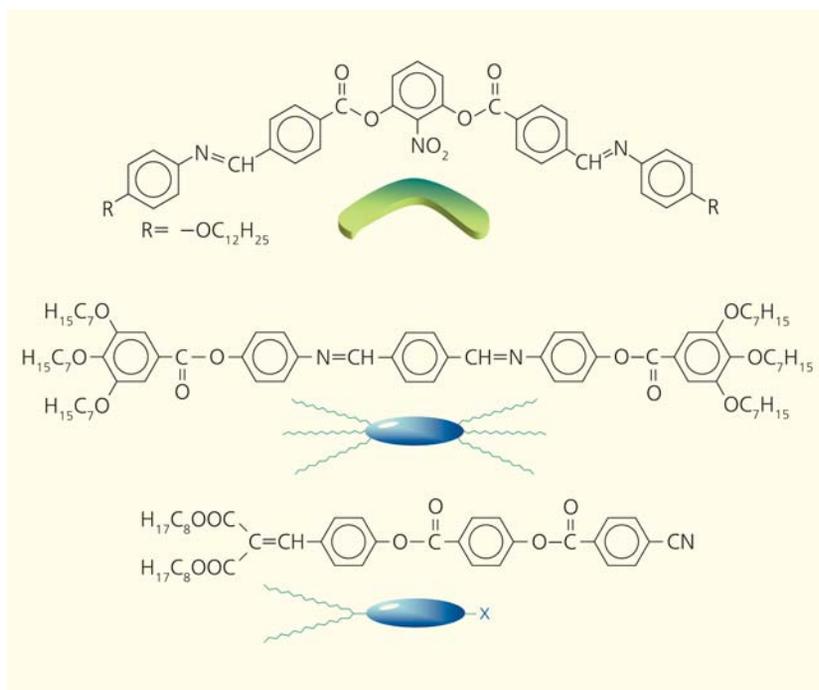


Рис.3. Формы молекул химических соединений, формирующих экзотические жидкие кристаллы: бананоподобная (вверху), фазмидная (в середине) и форма «ласточкина хвоста».

кристаллов, молекулы которых имеют планкообразную или дискообразную формы. Последние обычно содержат несколько длинных гибких цепей, связанных с центральной (жесткой) частью диска, образуя **дискотический** тип мезофазы (см. рис.2).

И, наконец, уже в этом веке обнаружены жидкие кристаллы, сформированные бананоподобными молекулами, пример тому — производное 2-нитропореорцинола (рис.3).

Существуют и довольно экзотические жидкие кристаллы: одни построены из молекул-фазмид,* другие — из молекул, форма которых похожа на ласточкин хвост (см. рис.3).

Объединяющая особенность молекул жидких кристаллов — асимметричность. Именно она обеспечивает анизотропию по-

ляризуемости. Этим же обусловлена и тенденция к расположению молекул преимущественно параллельно друг другу вдоль их длинных или коротких осей.

В соответствии с классификацией Фриделя различают три основных типа ЖК-структур: **нематический**, **смектический** и **холестерический**. Характер упаковки в них молекул во многом определяется их геометрической формой и химическим строением (рис.4). Нематический тип — самый простой, в нем существует только одномерный ориентационный порядок вдоль длинных (в каламатах) или коротких (в дискотиках) осей молекул. (Направление преимущественной ориентации длинных осей молекул называется директором жидкого кристалла и обозначается вектором \vec{n}) Поскольку центры тяжести молекул расположены в пространстве хаотично, трансляционный порядок отсутствует. Смектический тип ближе всего к структуре кристаллических тел, молекулы

в нем собраны в слои, а центры тяжести подвижны в двух измерениях. Длинные оси молекул в каждом слое перпендикулярны его плоскости (ортогональные смектики А и В) или наклонены под углом (наклонные смектики С). Расположение же молекул в слое бывает как хаотичным (смектики А), так и упорядоченным (смектики В).

Дископодобные молекулы могут также образовывать колончатые фазы (см. рис.4). Что касается бананоподобных молекул, структура которых интенсивно исследуется, то они способны создавать и неупорядоченную нематическую фазу, и более упорядоченную, близкую к смектическому типу упаковки (см. рис.4).

Наиболее сложный, холестерический, тип ЖК-структур характерен для хиральных соединений (оптически активных молекул). Холестерики во многом подобны нематикам — тем и другим свойствен одномерный ориентационный порядок. Однако хиральные асимметричные центры молекул холестериков или введенных в нематики небольших количеств хиральных веществ заставляют слои смещаться относительно друг друга на небольшой угол α . Через определенное число слоев ориентация молекул повторяется. Так формируется закрученная спиральная супрамолекулярная структура с шагом спирали $P=2pd/\alpha$ (рис.5). Поэтому очень часто холестерики именуют закрученными нематиками.

Такая структура обеспечивает холестерикам их особые оптические свойства. Период d , за который они меняются, зависит от шага спиральной структуры P .

Если поместить тонкий слой жидкого кристалла между прозрачными стеклами многослойной ячейки, образуется планарная текстура. В ней оси спиралей перпендикулярны плоскости стекол, а длинные оси молекул параллельны друг другу

* Так названы эти молекулы за сходство формы с одноименными векторными молекулами ДНК, которые содержат генетические элементы плазмид и хромосом бактериофагов.

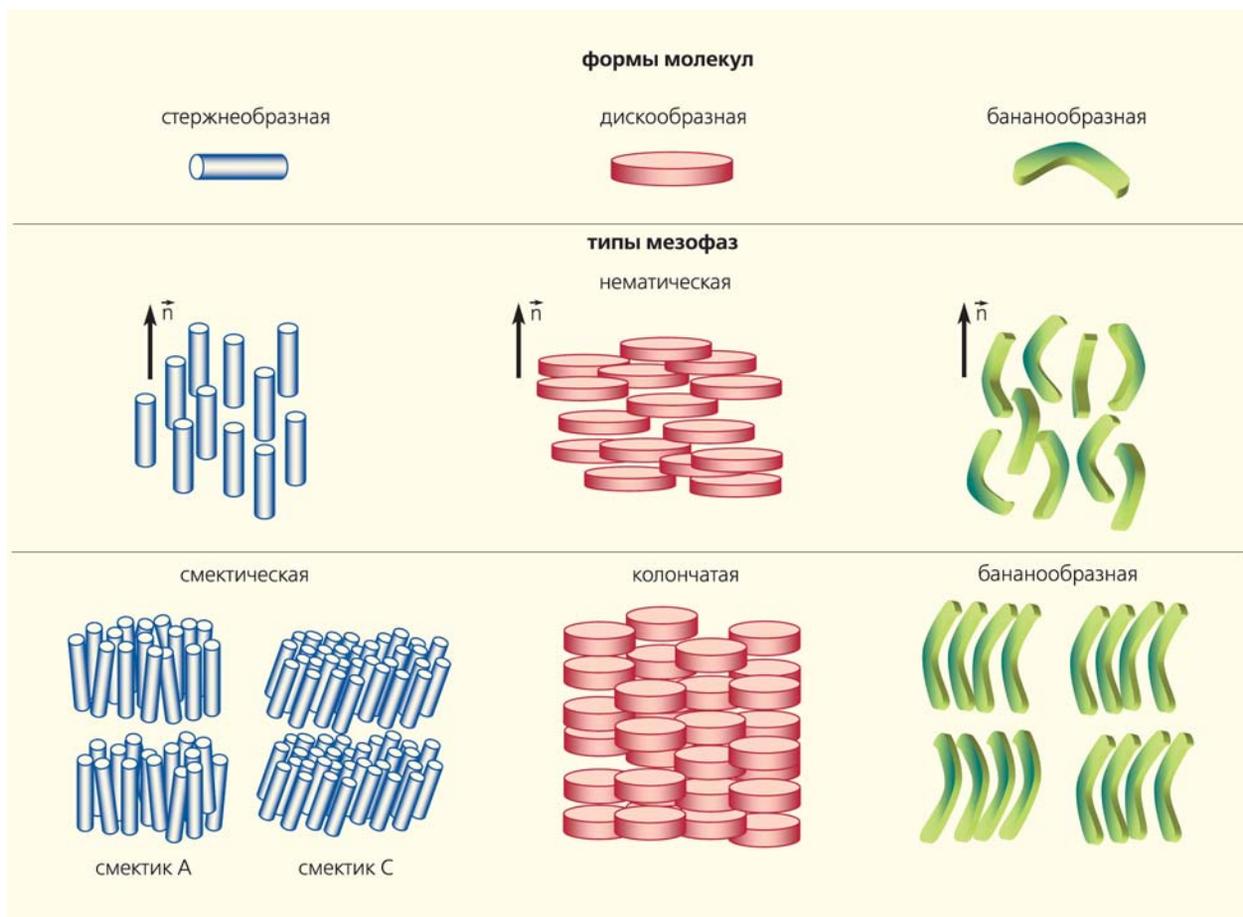


Рис.4. Формы молекул жидких кристаллов и основные типы их расположения в нематической, сметической и дискотической (колончатой) фазах. \vec{n} — директор жидкого кристалла.

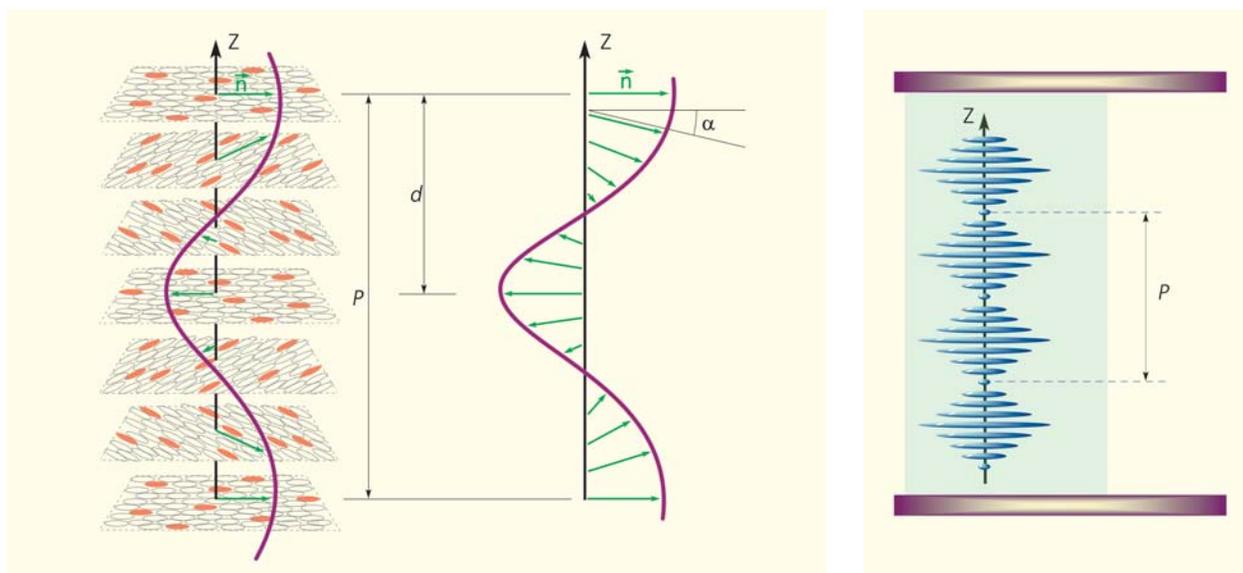


Рис.5. Упаковка стержнеобразных молекул в холестериках (слева), схема спирального расположения директора \vec{n} (в середине) и планарная структура холестерического кристалла. Z — ось спирали; P — шаг спиральной структуры; d — период изменения оптических свойств; α — угол закручивания спирали. Направление директора описывает спираль относительно оси структуры.

и поверхности ячейки. Такая периодическая спиральная структура холестериков определяет их уникальную особенность — селективно отражать падающий свет.

Если угол отражения фиксирован, условия интерференции выполняются только для лучей одного цвета, и тогда слой (или пленка) холестерика кажется окрашенным именно в этот цвет. Иначе говоря, возникает эффект избирательного отражения света определенной длины волны. Ее максимум I_{\max} связан с шагом спирали P , соотношением $I_{\max} = \bar{n}P$, где \bar{n} — показатель преломления холестерика. Величина шага спирали определяется многими факторами — химической природой холестерика, концентрацией и геометрической формой хиральных центров (добавок). Примечательно, что не только видимый свет селективно отражается жидкими кристаллами, но также ультрафиолетовый и инфракрасный. Именно этим объясняется использование оптических свойств холестериков во многих технических областях, о чем речь впереди.

Любой тип мезофаз обычно рассматривается как непрерывная анизотропная среда, где в небольших микрообъемах (их называют роями или доменами), состоящих из 10^4 – 10^5 молекул, мезогены ориентированы параллельно друг другу. Если жидкие кристаллы исследовать в поляризационном оптическом микроскопе (как это всегда делается), можно увидеть совокуп-

ность структурных деталей образца — макроструктуру, называемую текстурой. Каждый тип мезофаз самопроизвольно образует характерную для него текстуру, которая выглядит как красивая «картинка» (рис.6). Такие микрофотографии очень часто помещают на обложки научных и научно-популярных изданий [8]. Под действием небольших внешних воздействий — температуры, механического напряжения, магнитного и электрического полей и др. — текстуры легко подвергаются структурным перестройкам.

Как работают «кентавры»

Основной признак жидких кристаллов — анизотропия физических свойств. Определяется она степенью ориентационного упорядочения молекул, и именно этот порядок обуславливает двойное лучепреломление (Δn) и анизотропию диэлектрической проницаемости ($\Delta\epsilon$) ЖК-соединений. Значения двулучепреломления обычно весьма велики и меняются в широких пределах: от 0.1 до 0.4 (для сравнения: Δn кварца составляет всего 0.01). Величина и знак $\Delta\epsilon$ зависят от соотношения между анизотропией поляризуемости молекулы, величиной постоянного дипольного момента μ , а также от угла между его направлением и длиной молекулярной осью (рис.7).

Приложение даже небольшого электрического напряже-

ния E (1–3 В) к неориентированному слою жидкого кристалла, помещенному между двумя токопроводящими стеклянными пластинами в электрооптической ячейке, вызывает ориентацию образца, которая определяется знаком его диэлектрической проницаемости. Если направление дипольного момента продольное, ориентация будет *гомеотропной*, если же оно поперечное, ориентация станет *планарной* (см. рис.7). Возможна также и твист, или закрученная, ориентация молекул: их длинные оси поворачиваются в направлении от нижнего к верхнему стеклу электрооптической ячейки. Ориентация жидких кристаллов достигается специальной обработкой стеклянных пластинок, например, использованием так называемых ориентантов. Это, как правило, поверхностно-активные вещества, задающие направление ориентации молекул в пристенном слое.

При наложении слабого электрического поля происходят также превращения одного типа ориентации молекул в другой (рис.8). Эти перестройки лежат в основе работы любого ЖК-индикатора, «сердце» которого — упомянутая электрооптическая ячейка. Это многослойное устройство состоит из двух поляризаторов (их плоскости поляризации противоположны), между которыми находятся две стеклянные пластинки с проводящим током напылением (т.е. электродами), а между ними — тон-

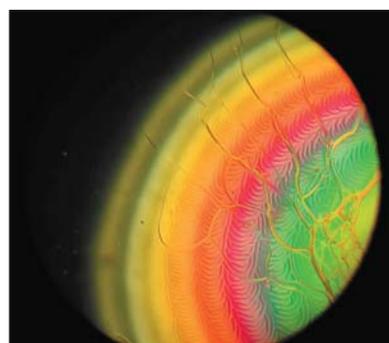
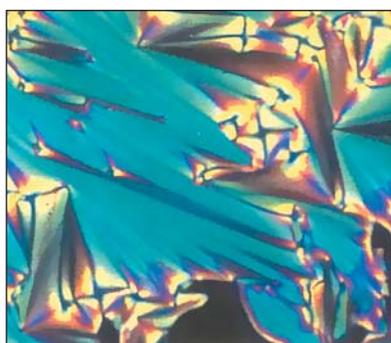


Рис.6. Типичные текстуры трех фаз жидких кристаллов — нематической, смектической и холестерической (слева направо).

кий слой (~10–20 мкм) жидкого кристалла. Нанесение на нижнем электроде — сплошное, а на верхнем — в виде семи полос, в результате чего образуются семь электродов. Каждый из них «питается» электричеством и включается по заданной программе от миниатюрного генератора. Под воздействием электрического поля тип ориентации молекул жидкокристаллического слоя меняется — они выстраиваются вдоль направления силовых линий поля. Например, закрученная (твист) структура (при условии что $\Delta\epsilon > 0$) превращается в гомеотропную. Свет, падающий на верхний поляризатор, становится плоскополяризованным, проходит через слой жидкого кристалла и отражается от зеркала, которое находится под нижним поляризатором. В итоге вся система освещена. Когда подается электрическое напряжение, ориентация молекул меняется и жидкокристаллический слой уже не способен поворачивать плоскость поляризации па-

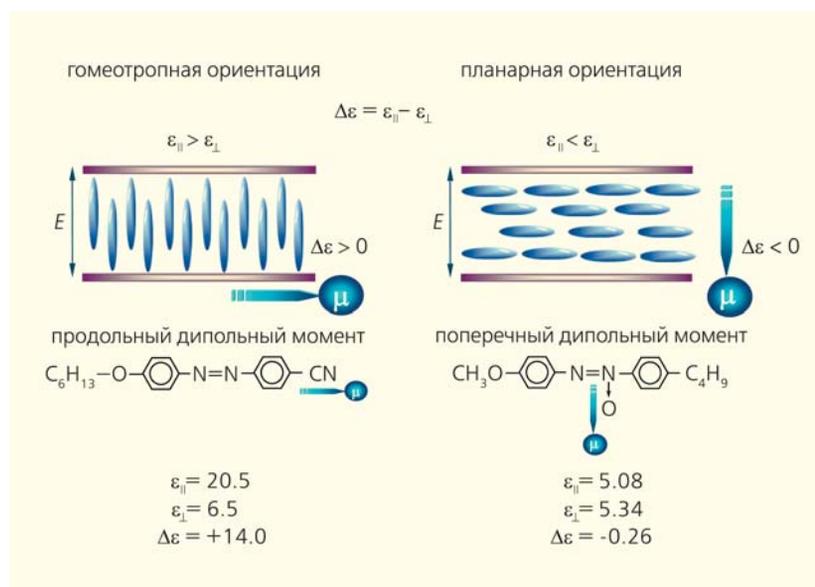


Рис.7. Анизотропия диэлектрических свойств жидких кристаллов в гомеотропной и планарной ориентациях на примере двух соединений. Здесь схематически изображены слои жидкого кристалла, ориентированные электрическим полем E (1—3 В). Поскольку диэлектрическая анизотропия ($\Delta\epsilon$) определяется ориентационным порядком молекул, то при гомеотропной ориентации (дипольный момент молекул продольный) диэлектрическая проницаемость оказывается больше нуля ($\Delta\epsilon > 0$), а при планарной ориентации (дипольный момент поперечный) — меньше нуля ($\Delta\epsilon < 0$). μ — величина постоянного дипольного момента; $\epsilon_{||}$ и ϵ_{\perp} — диэлектрические постоянные при продольном и поперечном дипольном моменте.

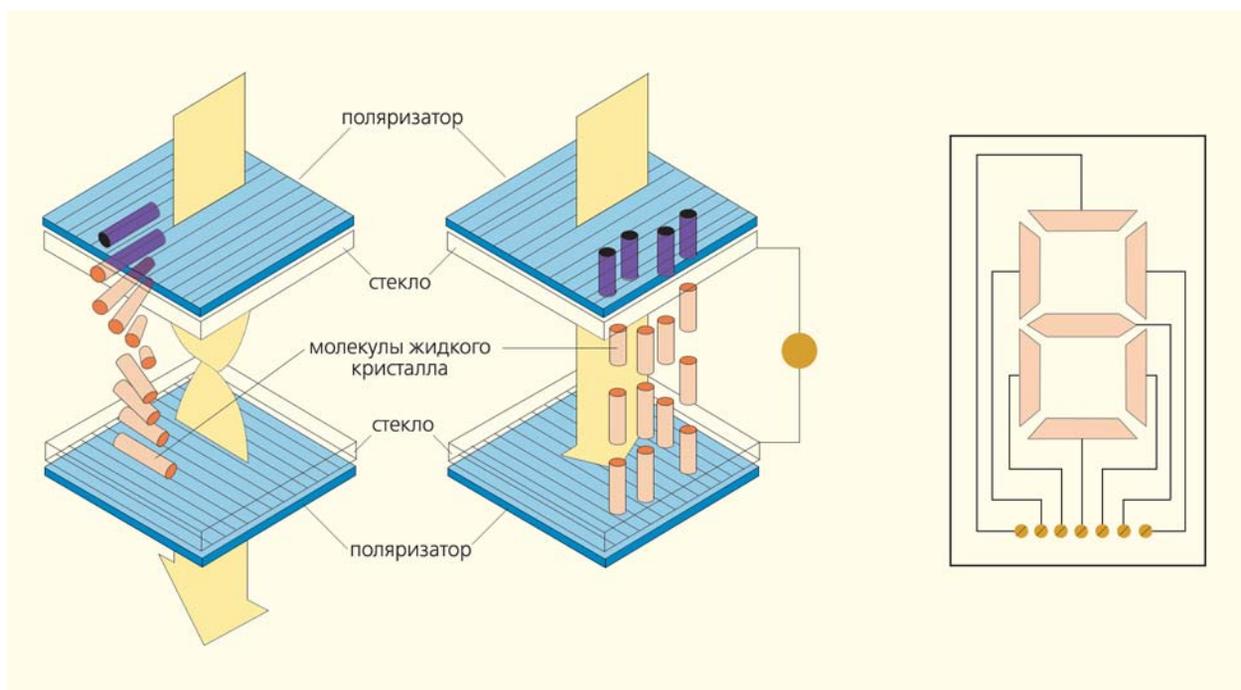


Рис.8. Схема работы ЖК-индикатора на твист-эффекте до включения (слева) и после включения (в середине) электрического поля. Описание в тексте. Справа приведен семисегментный буквенно-цифровой электрод, управляемый электрическим полем, и результат включения разных сегментов — «нарисованная» цифра восемь.

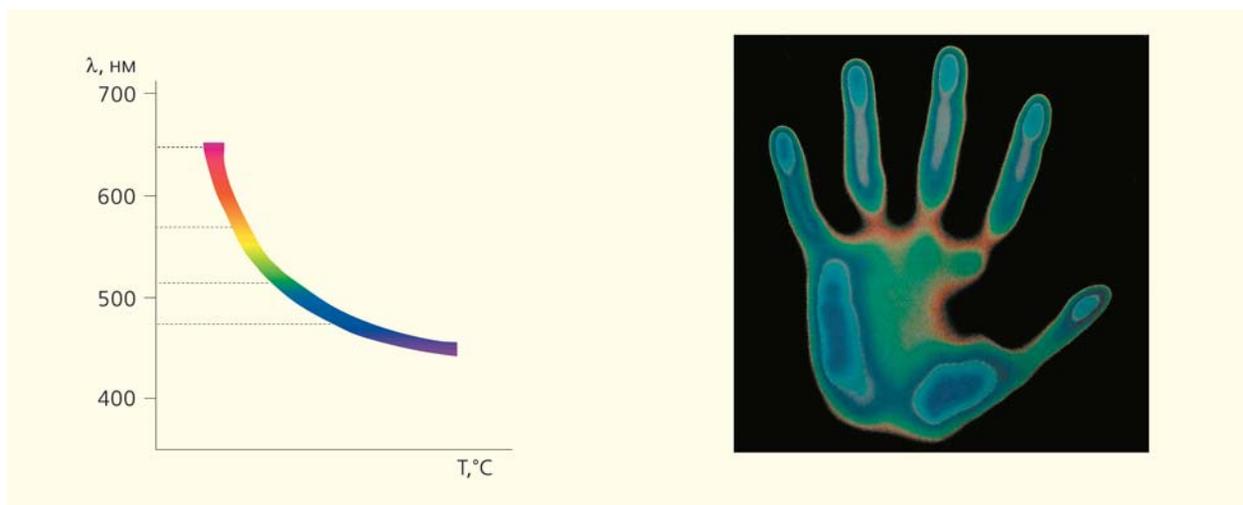


Рис.9. Влияние температуры на цвет холестерического жидкого кристалла и «цветограмма» руки человека. Красный цвет соответствует более низкой температуре, а синий — более высокой.

дающего света, он поглощается нижним поляризатором. Результат этого — непрозрачность оптической системы, темный фон на экране индикатора. Включая разные электроды, можно «рисовать» любые темные символы (буквы, цифры) на светлом поле (см. рис. 8).

У ЖК-индикаторов немало преимуществ, основные из них такие:

- низкое управляющее напряжение (1,5–5 В);
- малая потребляемая мощность (1–10 мкВт);
- быстрый (милли- или микросекунды) отклик на подаваемый сигнал;
- высокая контрастность изображения;
- малая толщина ЖК-экрана.

Все это обеспечивает легкость встраивания индикатора в любые электронные схемы (например, автомобилей, самолетов), надежность в работе и относительную дешевизну. За счет увеличения числа и более сложной конфигурации сегментов-электродов, притом с использованием цветных фильтров, созданы плоские телевизионные экраны и мониторы современных компьютеров и мобильных телефонов. ЖК-индикаторы применяются в системах оптической связи и оптической

обработки информации в быстродействующих ЭВМ.

Особый интерес представляют холестерические жидкие кристаллы — они лежат в основе создания цветоправляемых ЖК-индикаторов [9], поскольку способны изменять цветовые характеристики под влиянием температуры. Необычайно тонко организованная спиральная структура холестериков (см. рис.5) чрезвычайно чувствительна к самым разным внешним воздействиям, в том числе и тепловым. У большинства холестериков с ростом температуры шаг спиральной структуры и длина волны селективного отражения света λ_{\max} уменьшаются. А это, в свою очередь, приводит к изменению цвета жидкого кристалла (рис.9). Поскольку каждой температуре соответствует свой цвет, то топографию ее распределения можно получать по цветовой гамме.

Чувствительность холестериков, позволяющая «пробегать» все цвета видимого спектра в интервале 0,01–0,001°C, огромна. Значит, эти соединения могут служить высокоэффективными термоиндикаторами в технике и медицине.

Для удобства в обращении холестерики вводят в полимерные пленки и получают капсу-

лированные жидкие кристаллы. Эти пленочные материалы используются в качестве термометров, а также для визуализации и «фотографирования» тепловых полей. Чтобы увеличить цветовой контраст, в состав пленок обычно вводят черную краску. На такой пленке, наложенной на какой-либо участок человеческого тела, появляется цветное изображение, которое отражает распределение температуры. Так удастся выявлять очаги воспалительных процессов, злокачественных образований, а также диагностировать сосудистые заболевания, в частности атеросклероз и облитерирующий эндартериит*.

Подобные пленки уже используются в медицине в качестве своеобразных «тепловизоров» для экстренной диагностики и выявления локализации воспалительных процессов в брюшной полости: при аппендиците, перитоните, холецистите.

Разрабатываются также смеси холестерических жидких кристаллов, резко изменяющие

* Это хроническое заболевание периферических кровеносных сосудов человека с преимущественным поражением артерий стоп и голеней, уменьшением их просвета и нарушением кровоснабжения тканей.

шаг спирали, а следовательно, и цвет, под действием малых концентраций вредных паров химических соединений. Такие ЖК-индикаторы за очень короткое время (1–2 мин) меняют окраску при превышении допустимой концентрации вредных паров, т.е. играют роль химических датчиков. Интересные возможности открывает применение холестериков в дефектоскопии и неразрушающем контроле. Вследствие разной теплопроводности жидкий кристалл своим цветом тотчас же укажет те участки, где имеются дефекты. Такой способ годится, например, для оценки однородности многослойных печатных плат, качества спайки и соединений металлических и металлокерамических изделий.

Своеобразная молекулярная архитектура холестерической спирали приводит и к специфическим оптическим свойствам холестериков — круговому дихроизму и чрезвычайно высокой оптической активности.

Когда на образец планарно ориентированного жидкого кристалла падает неполяризо-

ванный свет, то в пределах области селективного отражения он расщепляется на две компоненты. Их электрические векторы поворачиваются в противоположные стороны: один — по часовой стрелке (или, что то же, — вправо), а другой — против (влево). Возникает круговой, или циркулярный, дихроизм — эффект оптической анизотропии. Если холестерическая спираль закручена влево, 50% света с левой циркулярной поляризацией отражается и столько же правой формы проходит через образец. Эта специфическая особенность холестериков позволяет создавать уникальные оптические светофильтры для видимого, УФ- и ИК-диапазонов спектра ($\lambda = 250\text{--}10^4$ нм). Если «правые» и «левые» холестерики разделены слоем нематического жидкого кристалла, который меняет направление (знак) циркулярной поляризации света, то весь световой поток становится циркулярнополяризованным. Будет он с левой или правой закруткой, зависит от того, какой была спираль холестерика. Так получается 100%-й поля-

ризатор, который обеспечивает полное превращение естественного света в циркулярно поляризованный [8].

Другая упомянутая очень важная особенность холестериков, обусловленная их супрамолекулярной структурой, — громадная оптическая активность. Они способны вращать плоскость поляризации света на угол порядка $20\,000^\circ$ на миллиметр толщины образца (у кристаллов кварца в α -модификации, которая считается очень активной, этот угол составляет 20°). Так что холестерические жидкие кристаллы — чемпионы среди известных оптически активных веществ.

* * *

ЖК-соединения стали основным элементом множества разнообразных электронных приборов технического и бытового назначения, знакомых почти каждому человеку. В настоящее время прогресс и развитие ряда отраслей науки и техники уже совершенно немыслимы без жидких кристаллов, более 100 лет назад так удививших Рейнитцера. ■

Литература

1. Шибаяев В.П. Необычные кристаллы или загадочные жидкости // Соросовский образовательный журнал. 1996. №11. С.37–46.
2. Сонин А.С. Дорога длиною в век – Из истории открытия и исследования жидких кристаллов. М., 1988.
3. Чистяков И.Г. Жидкие кристаллы. М., 1966.
4. Платэ Н.А., Шибаяев В.П. Гребнеобразные полимеры и жидкие кристаллы. М., 1980. Расширенная английская версия книги: *Plate N., Shibaev V. Comb-Shaped Polymers and Liquid Crystals*. NY, L. 1987.
5. Шибаяев В.П. Жидкие кристаллы // Энциклопедия «Современное естествознание». М., 2000. Т.6. С.146–151.
6. *Liquid Crystalline and Mesomorphic Polymers* (Eds. V.P. Shibaev, Lui Lam). NY, 1994.
7. Жен П. де Физика жидких кристаллов (перевод с англ. А.Веденова). М., 1977.
8. Пикин С.А., Блинов Л.М. Жидкие кристаллы. М., 1982.
9. Шибаяев В.П., Беляев С.В. Перспективы применения функциональных жидкокристаллических полимеров и композитов // Высокомолекулярный соед. А. 1990. Т.32. №12. С.2266–2310.

Вековой архив «Природы»



Дорогие читатели!

На диске представлены все выпуски «Природы», опубликованные в XX веке (1912—1999 гг.), т.е. более тысячи номеров журнала, содержащих около 40 000 статей на 130 000 страницах. Выпуски за 2000—2011 гг. доступны в Интернете на сайте Российской академии наук по адресу <http://www.ras.ru/publishing/nature.aspx>; мы решили не дублировать их в этом электронном издании, что позволило уместить весь архив на одном-единственном DVD-диске.

Физико-химическая динамика магматического процесса

А.А.Ярошевский

Впервые отчетливое понимание необходимости создания физико-химической теории перераспределения химических элементов в геологическом пространстве при построении модели зонного плавления мантии [1]. Дело в том, что геохимическая неоднородность геологических объектов всегда бывает результатом перераспределения химических элементов в геологическом пространстве-времени, сопровождающегося их (элементов) разделением (дифференциацией). Это перераспределение осуществляется только за счет диффузионного и конвективного массопереноса, физические законы которого накладывают принципиальные ограничения на реализацию данных механизмов в природе. Для того чтобы построить настоящую, физико-химически последовательную, теорию геологических процессов, необходимо включить в соответствующую модель корректный (и конкретный) анализ физико-химической динамики перераспределения химических элементов в ходе этих процессов. Эмпирические закономерности распределения химических элементов в пространстве генетически единого геологического объекта при этом являются непосредственным следствием именно механизмов и законов массопереноса и тем самым служат критерием адекватности модели.

© Ярошевский А.А., 2012



Алексей Андреевич Ярошевский, доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геохимии геологического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Основные работы посвящены общим проблемам геохимии земной коры, геохимии и моделированию магматических процессов, космохимии, геохимии биосферы. Заслуженный деятель науки РФ. Заместитель главного редактора «Природы». Старейший подписчик журнала.

Физико-химическая модель перераспределения химических элементов при эволюции геологической системы и формирования ее геохимической структуры должна включать решения термодинамической (системы уравнений, связывающих фазовый состав и состав отдельных фаз с температурой и давлением) и динамической (системы уравнений теплопереноса) задач. Однако надо иметь в виду, что динамическая задача не может быть решена методом физического эксперимента. Для сложной системы с фазовыми переходами, химическими реакциями и теплопереносом сформулировать критерии подобия экспериментальной и природной систем невозможно. Единственный метод — численная математическая интерпретация физической модели на базе современных ЭВМ. Такой математический эксперимент замечателен еще и тем, что дает воз-

можность вывести на экран компьютера состояние системы в любой момент времени и тем самым получить полную информацию о параметрах изучаемого процесса. Иными словами, математический эксперимент — незаменимое средство в исследовании физико-химической динамики перераспределения химических элементов в пространстве геологической системы. Такой подход мы впервые в науке реализовали в приложении к поведению химических элементов в магматических процессах [2—5].

Эмпирический материал

Эмпирическим материалом, конкретно формулирующим проблему, служат данные о строении дифференцированных интрузивных комплексов (рис.1). Интрузивных — потому что только в этой геологической ситуации доступна информация о реаль-

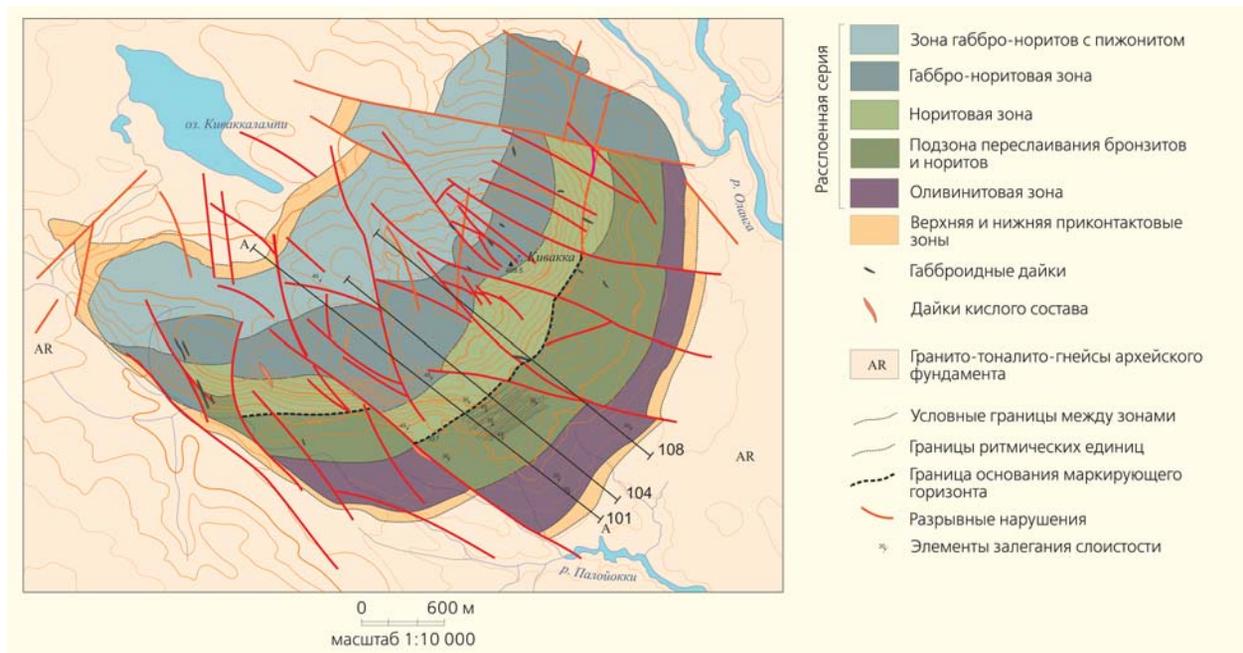


Рис.1. Схема геологического строения интрузива Кивакка, Северная Карелия.

ных пространственных взаимоотношениях пород, составляющих дифференцированную магматическую серию. Соответствующие наблюдения доказывают несколько важных положений: *закрытость системы* и формирование пространственной геохимической структуры только за счет процессов, протекавших внутри магматической камеры;

существование общего пространственного тренда в изменении минерального состава и состава минералов (для интрузивных комплексов основных-ультраосновных пород) (рис.2–4), направленного снизу вверх в гравитационном поле и полностью соответствующего направлению эволюции составов минеральных парагенезисов и мине-

ралов в соответствии с законами кристаллизационной дифференциации; *осложнение общих направленных трендов* минеральной расслоенности ритмической расслоенностью.

Эти принципы в приложении к дифференцированным комплексам основных-ультраосновных пород требуют комментария.

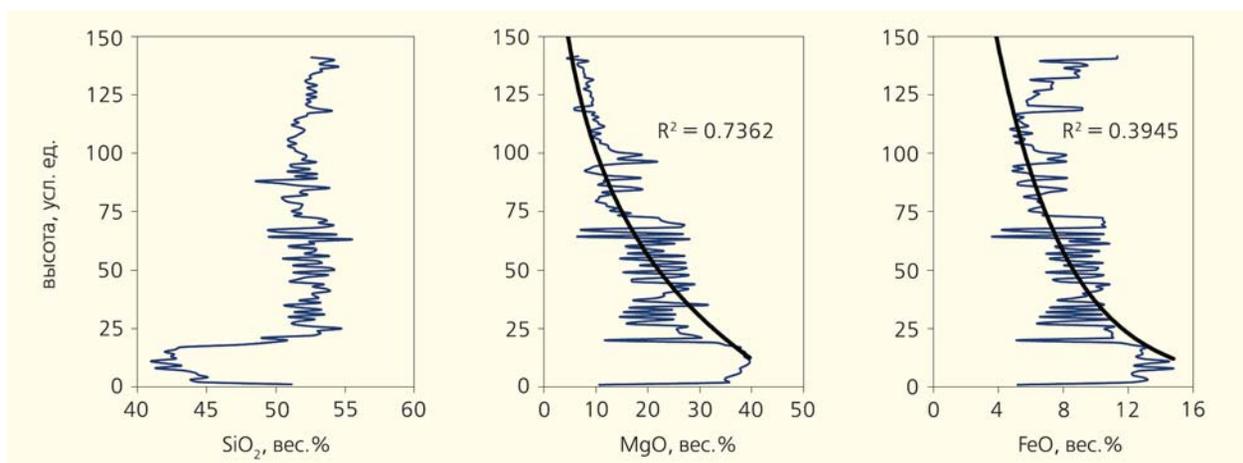


Рис.2. Распределение по разрезу интрузива Кивакка содержаний Si, Mg и Fe. Четко выделяется оливинитовая зона (минимальные содержания SiO₂ и максимальные — MgO и FeO), норитовая и габбро-норитовая зоны с направленными трендами изменения с высотой содержаний Mg и Fe. Эти распределения полностью согласуются с последовательным (снизу вверх) формированием пород с накоплением оливина, сменяемым породами, сложенными в качестве главных породообразующих (кумулятивных) минералов пироксенами и плагиоклазом. R² — достоверность аппроксимации.

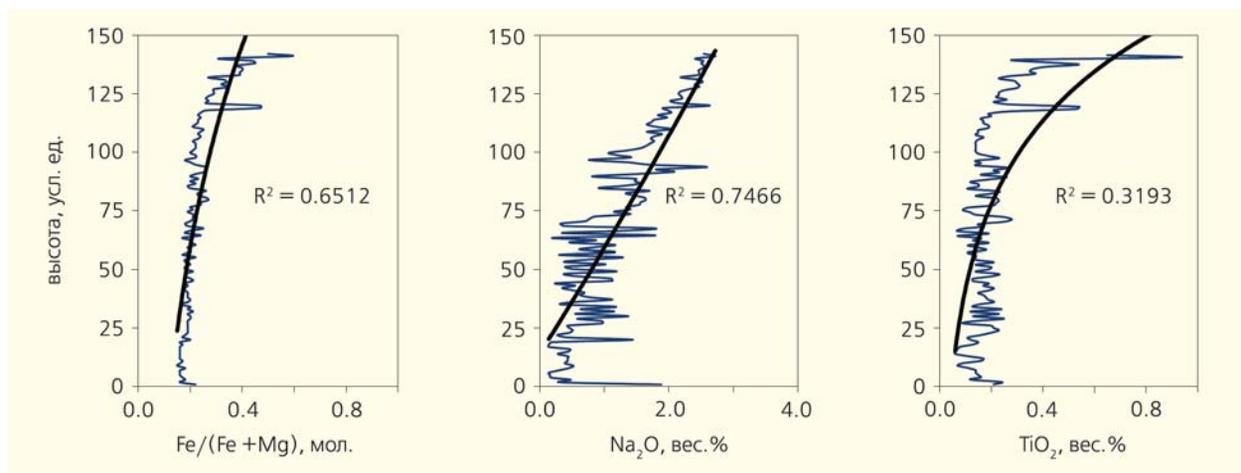


Рис.3. Распределение по разрезу интрузива Кивакка величины отношения $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ и содержаний Na и Ti. Увеличение этих параметров снизу вверх в разрезе полностью согласуется с закономерностями изменения величины Fe/Mg -отношения и поведения Na и Ti в ходе кристаллизационной дифференциации.

Общая закрытость магматических камер (в классическом «чистом» варианте) подтверждается существованием краевых, нижних и верхних приконтактных пород, отсутствием секущих взаимоотношений между породами расслоенных серий, ненарушенностью общих пространственных геохимических трендов. Однако существуют две проблемы.

Во-первых, изотопные данные (изотопный состав кислорода, системы Sr—Rb и Nd—Sm) как будто указывают в ряде случаев на вовлечение в магматическую систему вещества вмещающих пород. Но эти факты требуют специального исследования, поскольку конкретная ассимиляция вещества, имеющего иные изотопные отношения по сравнению с магматической (мантийной) системой, никак не сказывается на общих геохимических трендах. А вопрос серьезный — ведь не может быть избирательной ассимиляции Sr и Nd и тем более кислорода. Значимое их поглощение должно сопровождаться значимым же поглощением Si, Al, Ca и других элементов, чего в геохимических трендах не видно.

Во-вторых, идея смешения двух веществ с разным изотопным составом элементов, кото-

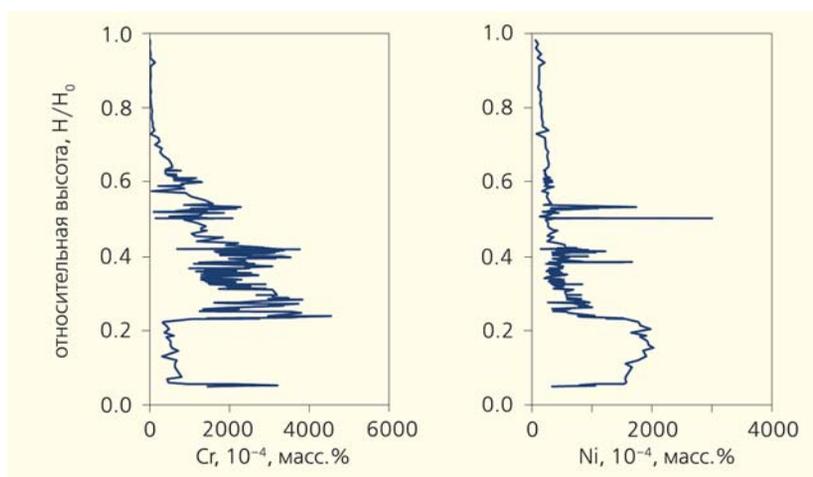


Рис.4. Распределение по разрезу интрузива Кивакка содержаний Cr и Ni. Они не образуют собственных минералов и входят как изоморфные примеси в пироксены (Cr) и оливин и пироксены (Ni). Содержание этих элементов закономерно уменьшается вверх по разрезу (как следствие захвата в состав оливина и пироксенов в ходе кристаллизационной дифференциации). Скачки содержания Ni в середине разреза связаны с появлением пород, обогащенных сульфидами.

рое сопровождается эффективной гомогенизацией изотопного состава в пределах магматической камеры, упирается в серьезные физические ограничения. Суть их заключается в необходимости признавать тонкоструктурную турбулентность, что в вязкой и кристаллизующейся магматической массе невозможно. Вопрос не ясен, но есть альтернатива — изотопная неоднородность мантийного источника

магматической системы. (Утверждение в данном случае, конечно, бездоказательное; основанием для него служит только отмеченное противоречие.)

Общие направленные геохимические тренды нередко осложняются появлением в разрезах дифференцированных серий возвратов к предшествующим парагенезисам кристаллизующихся минералов. Такие возвраты служат основанием пред-

полагать дополнительные внедрения новых магматических порций. Оспаривать эту идею сложно (и не нужно), но можно найти объекты, где таких взвратов нет.

Проблема же ритмической расслоенности остается. Все попытки ее понять в рамках представлений о закономерностях кристаллизации (найти фактор и механизм возникновения периодичности) пока остаются несостоятельными [6]. От беспомощности и в данном случае привлекается идея о многократных дополнительных внедрениях. Но есть два обстоятельства, которые делают эту идею смешной.

Во-первых, можно ли представить, что в ходе формирования трехкилометрового разреза дифференцированного массива происходило стократное (тысячекратное!) внедрение расплавов, формировавших 2–10-сантиметровые слои без нарушения их параллельного напластования, без пересечений и признаний внутренних зон закалки?

Во-вторых, как при формировании ритмически расслоенных комплексов на каждом этапе их внутренней эволюции (отраженной в направленных геохимических трендах) новые порции расплава (где-то параллельно эволюционирующего!) внедрялись именно в ту часть разреза, которая соответствовала данной стадии эволюции? Связывать формирование ритмической расслоенности с многократно повторяющимися внедрениями бессмысленно. Она (ритмическая расслоенность) есть очевидное явление, накладывающееся на общий эволюционный тренд. Искать объяснение необходимо только (!) в собственных закономерностях внутренней эволюции формирующихся расслоенных комплексов. Но идеи возникновения периодической кристаллизации в рамках физико-химически последовательной модели затвердевания магматических масс нет, и при построении та-

кой модели пока остается ее (ритмическую расслоенность) игнорировать и считать второстепенным осложняющим явлением, которое остается за рамками физико-химической интерпретации.

Я представляю, что человеческий снобизм не может признать, что чего-то мы не понимаем. Но никуда не уйти от проблем происхождения жизни, природы шаровой молнии, ритмической расслоенности магматических комплексов. Мы их пока действительно не понимаем. Надо иметь смелость признаться себе в недостаточности собственных умственных способностей, надо быть честным, по крайней мере по отношению к себе. В настоящее время имеет смысл решать проблему поведения химических элементов в ходе магматической эволюции, игнорируя ритмичность. Может быть, идея придет.

Свойства модели

Формулируя проблему механизма поведения химических элементов при затвердевании дифференцированных магматических комплексов основных-ультраосновных пород, мы исходим из следующих априорных положений.

Формирование интрузива начинается с одностадийного внедрения слоя однородной по параметрам (фазовому и химическому составу и теплосодержанию) магматической массы. Магматическая система остается закрытой и эволюционирует только за счет потери тепла в более холодные окружающие породы. Потеря тепла осуществляется диффузионными потоками через верхнюю и нижнюю границы. В горизонтальном направлении магматическая камера считается бесконечной, и краевые эффекты не учитываются. В теряющих тепло приконтактных зонах интрузива начинается кристаллизация, и выделяющиеся кристаллы вместе с глубинной

твердой фазой начинают оседать. Скорости погружения кристаллов соответствуют закону Стокса. В нижней приконтактной зоне это перемещение незначительно, а из верхней зоны твердая фаза оседает до поверхности накопившегося кристаллического слоя — кумулула. Кинетика зарождения и роста кристаллов не учитывается. Рассматривается модель локального равновесия, в рамках которой количество вновь образованной твердой фазы просто пропорционально количеству теряемого тепла. В нижней части магматической камеры формируется кумулул, степень пористости которого задается произвольно. В его пределах никаких перемещений твердых фаз и межзернового расплава не допускается.

Алгоритм решения и программный комплекс численных расчетов был создан М.Я.Френкелем [7]. Особенность этой задачи — появление и движение поверхностей (точек в одномерном пространстве) фазовых переходов (типа задачи Стефана). В такой ситуации численное решение уравнений со вторыми производными при сеточном разбиении пространства-времени оказывается невозможным, и алгоритм Френкеля основан на решении дифференциальных уравнений с производными первого порядка, позволяющими рассчитывать балансы потоков вещества и тепла для каждого элементарного слоя на каждом временном шаге.

Исследование свойств такой — «седиментационной» — модели методом математического эксперимента сразу выявило ряд принципиальных ее особенностей, игнорировать которые при построении модели природного процесса недопустимо.

Во-первых, это масштабы диффузионного перераспределения компонентов магматической системы. Проблема заключается в том, что градиент состава расплава в зонах кристаллизации возникает за счет выделения твердых фаз иного, чем

расплава, состава и однозначно связан с градиентом температуры. Данная связь определяет количественные соотношения между потоком тепла и диффузионными потоками компонентов расплава [2], а ее коэффициент определяется отношением коэффициентов теплопроводности и диффузии, которые отличаются на 6–8 порядков. Эти соотношения принципиально ограничивают масштабы диффузионного перераспределения химических элементов при затвердевании интрузива, интегральный эффект которого зависит от запаса тепла (теплосодержания) интрузивной магмы. Количественно они оказываются пренебрежимо малыми. Единственным реальным механизмом при формировании пространственной неоднородности интрузива остается только перераспределение фаз разного химического состава (твердых и жидкой) в гравитационном поле, т.е. классический (боуэновский) механизм кристаллизационной дифференциации. Все возможные механизмы, контролируемые диффузионным массопереносом, геологически незначимы. Кстати, это было понятно еще и Н.Л.Боуэну [8], но его пояснения остались незамеченными. При дальнейшем моделировании мы исключили расчет диффузионных массопотоков.

Во-вторых, стало ясным, что на самых первых стадиях остывания поток тепла через верхнюю границу магматической камеры столь высок, что выделяющиеся твердые фазы не успевают покинуть зону кристаллизации и примерзают к кровле интрузива (мы назвали ее верхней зоной примерзания) [2]. Но по мере прогрева пород кровли скорость теплоотвода быстро (по экспоненциальному закону) уменьшается. Кристаллы начинают покидать зону примерзания. Скорость перемещения фронта полного затвердевания уменьшается. И на какой-то стадии формируется стационарный режим, при котором этот фронт

становится неподвижным и все выделяющиеся кристаллы вовлекаются в процесс оседания. Очень интересно, что верхняя зона примерзания оказывается дифференцированной, причем распределение минеральных фаз и химических элементов в ней зеркально симметрично строению расслоенной серии. В дальнейших расчетах мы учли этот эффект достаточно искусственно, запрещая или разрешая различным твердым фазам (в зависимости от стоковской скорости оседания) покидать зону примерзания.

В-третьих, выделяющиеся в верхней приконтактной зоне и погружающиеся в более высокотемпературную зону центральной части магматической камеры твердые фазы должны плавиться. Это было очевидно аргюги и, в частности, служило основанием считать боуэновский механизм кристаллизационной дифференциации не реализуемым в природе (о чем писал, например, П.Ниггли [9]). Однако данное возражение несостоятельно. Оказалось, что, плавясь, кристаллы поглощают тепло и температура на фронте погружения твердых фаз понижается вплоть до равновесной с данной твердой фазой [2]. Но надо иметь в виду, что теплоемкость силикатов примерно 2100 Дж/кг·град., а теплота кристаллизации — 420 000 Дж/кг. (Вообще-то, это тоже очевидно аргюги, но количественно определено только в результате математического эксперимента.) Как следствие, фронты последовательно возникающих твердых фаз движутся с существенно меньшей по сравнению со стоковской скоростью, как правило, не перегоняя друг друга. Твердые фазы накапливаются в слоях кумулуса в порядке их появления на ликвидусе, а не в последовательности их плотностей. Геохимически интересное следствие растворения твердых фаз — обогащение их компонентами расплава в зоне погружения, т.е. формирование геохи-

мической неоднородности расплава. Следующие же порции кристаллов уже приходят в равновесие с расплавом, обогащенным «тугоплавкими» элементами (входящими в состав кристаллизующихся фаз с коэффициентом распределения больше единицы), и сами обогащаются ими в большей степени (по сравнению с ранними кристаллами, равновесными с первичным расплавом).

Отмеченные особенности седиментационного механизма кристаллизационной дифференциации — результат взаимосвязи потоков тепла и вещества, обусловленной выделением или поглощением тепла при фазовом переходе (кристаллизации—плавлении), и теплообменом между потоками более холодных кристаллов вниз и более нагретого расплава вверх. Это фундаментальное свойство рассматриваемого механизма. Без его учета, например, при попытках моделировать динамику разделения инертных по отношению друг к другу фаз, получается картина, которая никакого отношения к поведению затвердевающего расплава не имеет.

Сопоставление с природными объектами

Уровень разработки нашей модели таков (а так и было задумано), что конечным результатом математического эксперимента должно быть воспроизведение (прямое моделирование) структуры геологического — в нашем случае магматического — объекта (кстати, надо указать, что до сих пор, несмотря на то что мы публикуем свои результаты в течение уже более 30 лет, никто в геологии этого делать не умеет). При таком моделировании некоторые параметры приходится «подгонять» под природу.

Конструируя модель конкретного объекта, мы принимаем химический состав магмы на основании оценки средневзвешенного состава интрузива.

Для этого нужны полные эмпирические данные о составах и соотношениях в разрезе всех слагающих расслоенный интрузив пород. Таких данных в литературе почти нет. Мы проводили специальные исследования выбранных (простейших?) расслоенных магматических комплексов основных-ультраосновных пород — интрузивных траппов Сибирской платформы [4], Йоко-Довыренского массива в Северном Прибайкалье [10], Кивакского интрузива в Северной Карелии [11] и некоторых других.

Содержание глубинной твердой фазы (что задает теплосодержание интрузивной магмы) мы подбираем методом перебора вариантов прямой модели.

Соотношения эффективных скоростей погружения кристаллов также подбираются методом перебора вариантов прямой модели. От численных значений этих параметров зависит результат математического эксперимента: конкретное распределе-

ние химических элементов и минеральных фаз в вертикальном разрезе модельного интрузива, но задать их из общих соображений (из первых принципов) невозможно. Численные оценки термодинамических параметров (коэффициентов в уравнениях геохимических термометров), физических свойств расплавов и твердых пород (плотности, коэффициентов теплопроводности и массопереноса) основаны на экспериментальных данных и принимаются как независимые от геологических наблюдений свойства модели.

Один из важнейших результатов моделирования — количественная оценка параметров природного процесса, который мы не видим и не можем изучать непосредственно. Это центральная методологическая проблема геологии — обосновать физически (физико-химически) последовательное представление о механизмах геологических процессов. Мы можем построить лишь достаточные для

интерпретации эмпирических наблюдений модели, но никогда не докажем, что они необходимы. (Могут быть и альтернативные решения, но их надо получить, если кому-то захочется.)

Так вот, первое же сопоставление результатов моделирования с природой (на примере долеритовых силлов трапповой формации) заставило нас пересмотреть одну из важнейших априорных идей — а именно идею о чисто седиментационном механизме кристаллизационной дифференциации. Дело в том, что чисто седиментационное фракционирование твердых фаз приводит к весьма контрастному распределению кумулятивных минералов в разрезе интрузива и к резким границам между зонами с различными минеральными парагенезисами. В природе же распределения оказываются сглаженными, с постепенными переходами между зонами. Единственным способом снять эту проблему («размазать» распределение кумулятивных минералов по разрезу) оказалось конвективное перемешивание расплава со взвешенной твердой фазой между поверхностью кумулуса и верхней зоной примерзания. Самое замечательное то, что необходимость введения конвекции из общих физических соображений была высказана нами еще на предварительной стадии исследования модели [2]. Идея заключается в том, что появляющиеся около границы зоны примерзания кристаллы повышают интегральную плотность каши (расплав + твердая фаза), которая становится выше плотности подстилающего расплава и «пробулькивает» к поверхности кумулуса. Эта идея была ясна еще Г.Хессу [12], но не часто встречалась в литературе. После нашего математического эксперимента она становится совершенно очевидной.

На самом же деле физика явления значительно интереснее. Обычно считается, что раз магматическая масса начинает остывать, неизбежно возникает

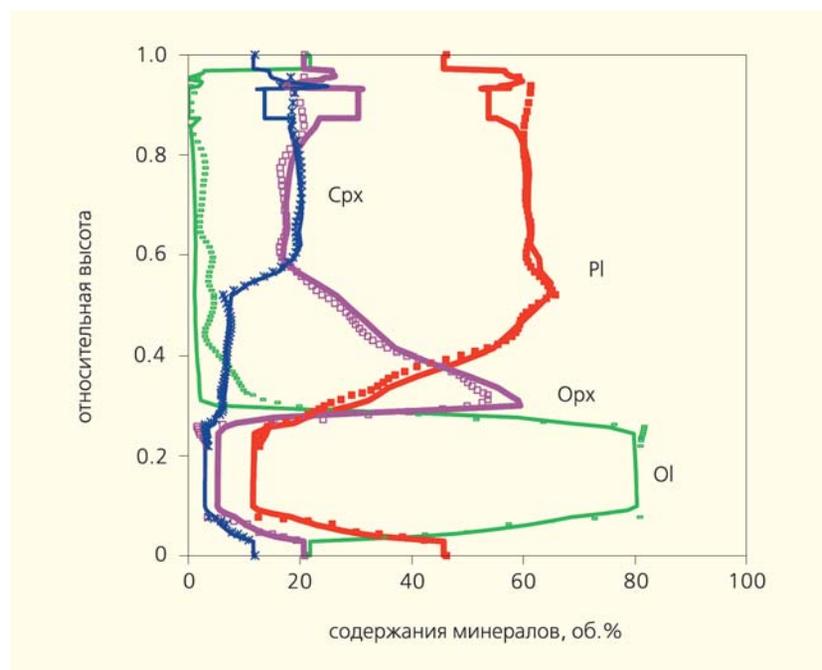


Рис.5. Распределение содержаний нормативных минералов по разрезу интрузива Кивакка. Точками показан сглаженный методом скользящего окна вариант, линиями — оптимальная модель. Ol — оливин, Orx — бронзит, Срх — авгит и пижонит, Pl — плагиоклаз. Вполне приемлемое согласие модели и природы не нуждается в специальном обосновании.

свободная (термическая) конвекция [13], которая контролирует, в частности, распределение взвешенной твердой фазы в интрузиве [14]. Но инверсия плотности, вызванная выделением твердой фазы, на порядок превышает увеличение плотности за счет тепловой сжимаемости и полностью подавляет свободную конвекцию! Никакой «поддержки» во взвешенном состоянии твердой фазы в интрузивном расплаве (в природной обстановке!) быть не может, иначе это было бы аналогично тому, как барон Мюнхаузен вытаскивал себя на лошади из болота за волосы.

Но в нашу модель мы (по техническим причинам одномер-

ного варианта) не смогли включить реальную пространственную структуру конвективных движений и поступили «просто», предположив столь интенсивную конвекцию, которая способна привести к равномерному распределению взвешенной твердой фазы между поверхностью кумулуса и границей верхней зоны примерзания. Варьируя только относительными скоростями погружения твердых фаз (их «убегания» из слоя расплава, примыкающего к верхней границе кумулуса), мы смогли получить [4, 15] полное согласование распределения минералов и химических элементов в модели и в реальных объектах (рис.5).

* * *

Итак, нам удалось построить конвекционно-кумуляционную модель кристаллизационной дифференциации, которая, во-первых, не противоречит общим физическим законам, а во-вторых (впервые в науке!), позволяет количественно воспроизвести строение дифференцированных магматических комплексов (распределение минералов и химических элементов) [4, 5]. И это главный итог работ группы единомышленников на кафедре геохимии геологического факультета МГУ им.М.В.Ломоносова и в Институте геохимии и аналитической химии им.В.И.Вернадского РАН в 70—90-х годах XX в. ■

Литература

1. Ярошевский АА. Физико-химическая модель выплавления вещества земной коры. Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1966.
2. Френкель МЯ, Ярошевский АА. Кристаллизационная дифференциация интрузивного магматического расплава. I, II, IV // Геохимия. 1976. №8. С.1197—1203; №11. С.1624—1632; 1978. №5. С.643—668.
3. Коптев-Дворников ЕВ, Ярошевский АА, Френкель МЯ. Кристаллизационная дифференциация интрузивного магматического расплава. V. Оценка реальности седиментационной модели // Геохимия. 1979. №4. С.488—508.
4. Френкель МЯ, Ярошевский АА, Арискин АА и др. Динамика внутрикамерной дифференциации базитовых магм. М., 1988.
5. Арискин АА, Ярошевский АА. Кристаллизационная дифференциация интрузивного магматического расплава: развитие конвекционно-кумуляционной модели // Геохимия. 2006. №1. С.80—102.
6. Ярошевский АА. Граничные условия возможного механизма формирования ритмической расслоенности дифференцированных магматических комплексов основных и ультраосновных пород // Изв. Секции наук о Земле РАЕН. 2006 (2007). Вып.15. С.117—131.
7. Френкель МЯ. Формулировка и алгоритм решения на ЭВМ системы уравнений переноса тепла и вещества в процессе становления пластового интрузива // Геохимия. 1978. №4. С.547—559.
8. Bowen NL. The Evolution of the Igneous Rocks. Princeton Univ. Press, Princeton, New Jersey, 1928. [Русск. перевод: Боуэн НЛ. Эволюция изверженных пород. М.; Л., 1934.]
9. Niggli P. Das Magma und seine Produkte. Teil I. Leipzig, 1937. [Русск.перевод: Ниггли П. Магма и ее продукты. Ч.1. М., 1946.]
10. Ярошевский АА, Болиховская СВ, Коптев-Дворников ЕВ. Геохимическая структура Йоко-Довыренского расслоенного дунит-троктолит-габбро-норитового интрузива, Северное Прибайкалье // Геохимия. 2006. №10. С.1027—1039.
11. Ярошевский АА. Геохимическая структура магматических комплексов (на примере Кивакского расслоенного оливинит-норит-габбро-норитового интрузива, Северная Карелия) // Геохимия. 2004. №12. С.1251—1270.
12. Hess NH. Stillwater igneous complex, Montana. A quantitative mineralogical study // Geol. Soc. Amer. 1960. Mem.80.
13. Кадик АА, Хитаров НИ. Роль естественной конвекции в переносе магматического тепла и вещества // Геохимия. 1968. №6. С.651—665.
14. Bartlett RW. Magma convection, temperature distribution and differentiation // Amer. J. Sci. 1969. V.267. №9. P.1067—1082.
15. Болиховская СВ, Ярошевский АА, Коптев-Дворников ЕВ. Моделирование геохимической структуры Йоко-Довыренского расслоенного интрузива, Северное Прибайкалье // Геохимия. 2007. №6. С.579—598.

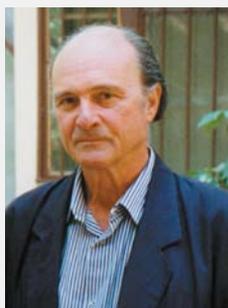
Становление современной ландшафтной оболочки Земли

А.А.Величко

Познание природных событий прошлого Земли — увлекательная задача палеогеографии. Однако глубокая концептуальная значимость палеогеографических исследований состоит, прежде всего, в их вкладе в изучение эволюции биосферы, фундаментальные основы которого заложены еще в трудах В.И.Вернадского. Только придерживаясь эволюционного подхода, удастся установить «координаты» современной ландшафтной оболочки в общем планетарном ходе природного процесса и составить прогноз ее дальнейшего развития. Решение такой глобальной задачи заложено в получении детальных сведений о природных событиях прошлых эпох, начиная с самых ранних этапов, когда на Земле стали формироваться гигантские климатические волны — ледниковые эры и глобальные потепления. Корректность привязки современной ландшафтно-климатической системы к общему вектору развития географической оболочки планеты, как и степень приближения к раскрытию причин, определивших такой ход развития, зависит от дальнейшего углубления знаний в области палеогеографии.

Климатические изменения

Эволюция климата и ландшафтов Евразии за последние 65 млн лет, определившая в конечном



Андрей Алексеевич Величко, доктор географических наук, профессор, заведующий лабораторией эволюционной географии Института географии РАН. Специалист в области палеогеографии и палеоклиматологии. Член редколлегии журнала «Природа».

итоге их современные свойства, характеризовалась чрезвычайно широким диапазоном трансформации. Особенно это проявилось на северо-востоке континента, где на протяжении кайнозойской эры условия, свойственные современным субтропикам, сменились полным господством криосферы с почти километровой глубиной промерзания земной коры и развитием наземного оледенения. Размах этих изменений стал крупнейшим в истории развития нашей планеты, начиная со второй половины фанерозоя.

Температурная кривая. Тренд и особенности климатических изменений на отдельных этапах мезозоя и кайнозоя прослеживаются на палеотемпературной кривой, построенной по комплексу палеогеографических данных для Восточно-Европейской равнины (рис.1). Выводы, сделанные при анализе этой кривой, в целом согласуются с полученными впоследствии

и для других регионов северной Евразии [1].

Установлено, что в начале кайнозоя колебания климата имеют максимальный интервал около 5—10 млн лет, а амплитуды годовых температур составляют 2—4°C. В это время, в эоцене, происходит одно из самых значительных потеплений климата в истории Земли второй половины фанерозоя — термический максимум кайнозоя. Он становится своего рода рубежом, после которого в начале олигоцена намечается отчетливый тренд к понижению теплообеспеченности. Наступает ледниковый этап в истории биосферы. Однако похолодание не было равномерным: оно прерывалось периодическими короткими потеплениями. На временном отрезке с конца эоцена по плиоцен период колебаний уменьшается до 1—5 млн лет, а среднегодовые амплитуды возрастают от 5—6°C в начале этого отрезка до 8—10°C в его конце. В этот пери-

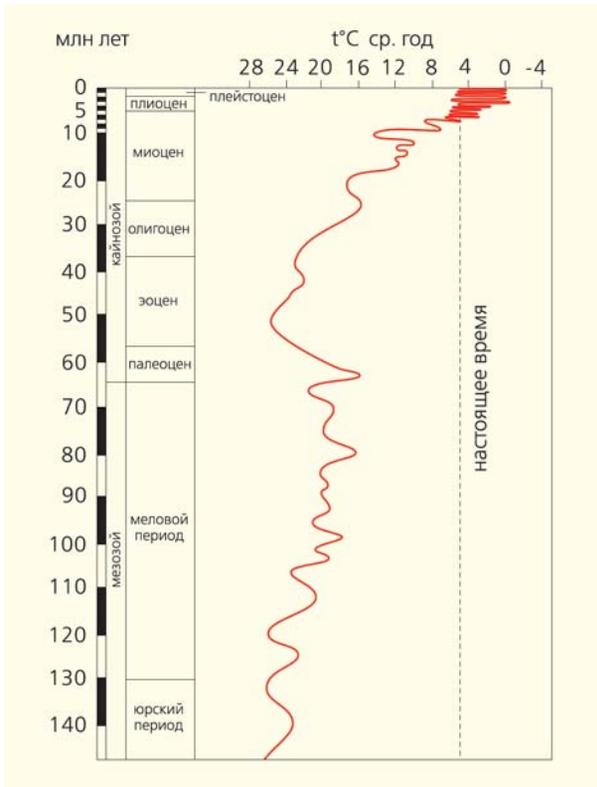


Рис.1. Температурная кривая мезозоя-кайнозоя для южной части Восточно-Европейской равнины [7].

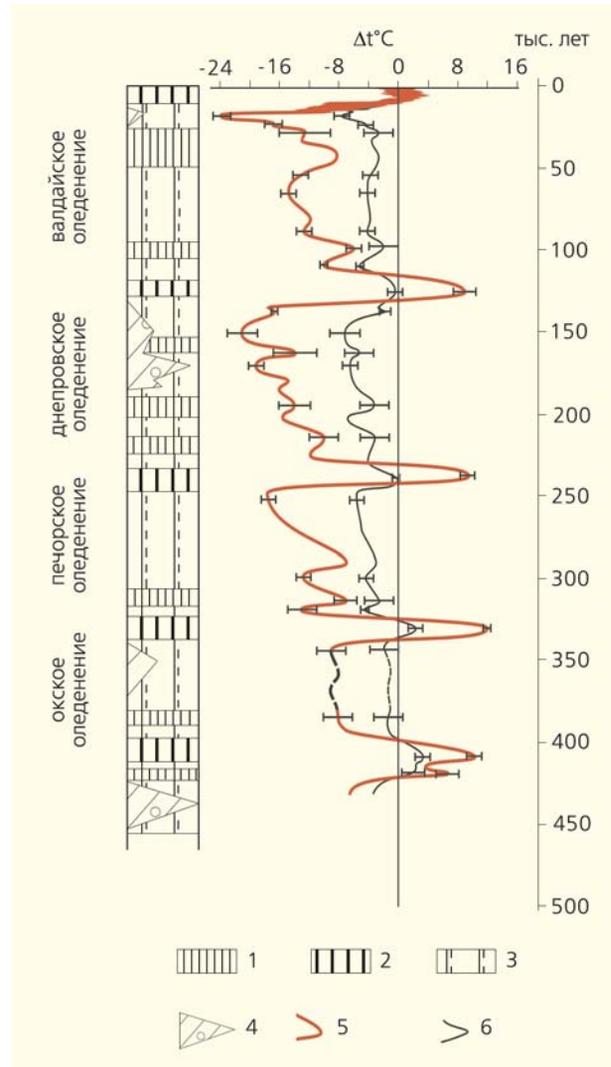


Рис.2. Изменения климата за последние 450 тыс. лет в центре Восточно-Европейской равнины. 1 — палеопочвы интерстадиалов, 2 — палеопочвы межледниковий, 3 — лессы, 4 — морены, 5 — отклонения температур января от современных значений, 6 — то же для июля.

од зафиксированы три отчетливых климатических оптимума, а переломы в сторону похолодания происходят в конце миоцена (так называемый мессинский кризис; ~6.0—5.5 млн лет назад) и на рубеже плиоцена и квартера (2.5—2.7 млн лет назад), когда в Скандинавии формируется покровное оледенение, а на северо-востоке Азии появляется обширная область развития многолетней мерзлоты.

Около 1 млн лет назад, в плейстоцене, колебания климата на территории северной Евразии приобретают вид регулярного чередования ледниковых и межледниковых эпох. Длительность каждого макроцикла — отрезка, включающего межледниковую и ледниковую эпохи, —

теперь лежит в пределах 200—100 тыс. лет, причем в целом длина макроциклов имеет тенденцию к сокращению с приближением к современности. Кроме того, выявляется отчетливая тенденция к понижению температуры очередного макроцикла. Об этом можно судить по температурам оптимумов четырех наиболее выраженных межледниковий последнего полутора миллиона лет (рис.2): оптимум каждого последующего приблизительно на 1°C холоднее предшествующего, причем эта тенденция имеет склонность к ускорению [2].

Последовательное снижение температуры внутри макроциклов привело к неравномерному соотношению длительности межледниковых и леднико-

вых фаз: межледниковья были продолжительнее в ранних макроциклах по сравнению с более поздними. Причина такой закономерности заключается в том, в чем: ранние межледниковья характеризовались высокой теплообеспеченностью, в них создавались условия, при которых увеличивалось число стадий развития ландшафтов от конца ледниковой эпохи до оптимума межледниковья и затем, при обратной смене стадий, к началу нового оледенения (рис.3). Так, например, в мучкапское межледниковье (~520—450 тыс. лет назад) изменение лесных ландшафтов от его начала до оптимума имело вид последовательности: таежные — широколиственные — теплоумеренные — теплоуме-

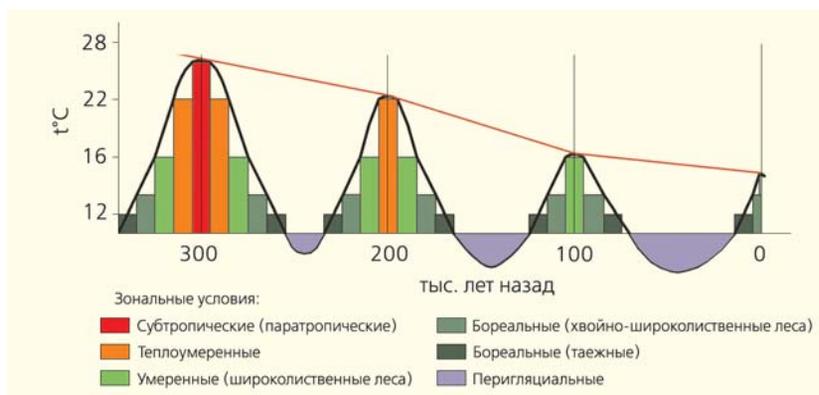


Рис. 3. Соотношение теплых (межледниковых) и холодных (ледниковых) интервалов в разновозрастных макроциклах плейстоцена.

ренные с участием субтропических элементов. В лихвинское межледниковье (~420–370 тыс. лет назад) оптимум достигался уже на стадии теплоумеренных, а в микулинское (~130–117 тыс. лет назад) — на стадии широколиственных лесов. Очевидно, что выпадение соответствующих стадий сокращало время достижения оптимумов и, следовательно, длительность всего межледниковья.

Сходная тенденция — но уже к росту суровости и продолжительности — отмечается и для ледниковых эпох. Так, если в холодные эпохи раннего плейстоцена формировались лишь морозобойные грунтовые жилы, то в среднем плейстоцене (преимущественно в его второй половине) впервые появляется многолетняя мерзлота. Однако максимального распространения и степени суровости она достигает лишь в позднеплейстоценовую ледниковую эпоху.

Реакция географической оболочки на изменения климата. Очевидно, что температурная кривая в масштабах мезо-кайнозоя отражает направленную смену колебаний — от медленных, относительно нерезких, «длинноволновых», колебаний в мезозое и начале кайнозоя к «средневолновым», ритмически упорядоченным колебаниям с возрастающей амплитудой в миоцене и плиоцене, а затем к быстрым, «коротковол-

новым», колебаниям циклического характера в плейстоцене.

Но возникает вопрос: не отражает такая схема колебаний просто различную степень изученности разных отрезков мезокайнозоя, и в частности возрастающую степень детальности наших знаний в отношении более молодых этапов геологической истории? Однако считается, что так называемые «коротковолновые» колебания могли происходить достаточно регулярно и на ранних этапах — в мезозое и раннем кайнозое [3]. Просто они начинали все отчетливее проявляться лишь по мере усиления общего охлаждения*.

На раннем отрезке общей температурной кривой, вплоть до середины эоцена, температуры соответствовали в основном внутритропическому пространству. При этом высокочастотные колебания даже с амплитудой в несколько градусов средних годовых температур также не выходили за пределы параметров, свойственных тропикам, и потому не могли отчетливо «записываться» в толщах геологических пород. Можно не сомневаться, что, если бы на данном интервале кайнозоя в регионе существовали устойчивые и частые эпохи резкого проявления криоаридных и гляциогенных условий, они обязательно

* Это явление было впервые отмечено В.М.Синицыным в 1980 г. [4].

но нашли бы отражение в формировании горизонтов лессов, морен и мерзлотных структур.

На следующем отрезке кривой (до неогена) температура снижалась, но в целом соответствовала условиям, свойственным субтропическим и теплоумеренным районам. Но здесь, по-видимому, уже начинали «записываться» наиболее значительные похолодания.

На самом холодном отрезке, отражавшем изменения режима от субтропического к умеренному и бореально-арктическому, реакция географической оболочки на мелкие колебания становилась все более отчетливой. А, как известно из общей климатологии [5] и из палеоклиматологии [6], наиболее чувствительны к колебаниям температуры природные компоненты именно холодных (высокоширотных) районов. Изменение средних годовых температур даже на 2–4°C здесь может означать смену условий на уровне природных зон.

Еще в 80-х годах прошлого века была установлена связь роста амплитуды высокочастотных климатических колебаний с «краевыми» низкотемпературными частями крупных циклов (так называемых мегациклов). Позднее она подтвердилась детальными палеорекострукциями на суше [7, 8] и в еще более отчетливой форме изотопно-кислородными кривыми, полученными по данным бурения донных отложений в Тихом океане [9], на которых ясно прослеживается постепенная смена высокочастотных колебаний с малой амплитудой в относительно теплый период геологической истории на значительно более контрастные колебания в холодный отрезок времени (рис. 4).

Более резкое проявление «высокочастотных» колебаний на общем низком температурном уровне связано и с тем, что похолодания здесь приобретают способность к самоусилению. В эпохи таких похолоданий на обширных площадях формируются ледниковые по-

кровы и морские льды. Это существенно (на несколько процентов) повышает альbedo Земли, что, в свою очередь, вызывает значительное дополнительное охлаждение. По данным для более древних ледниковых периодов (в частности, палеозойских) также установлено, что амплитуды «коротковолновых» колебаний начинают отчетливо возрастать именно в низкотемпературные периоды [10].

Макромасштабный климатический «сброс». Резкое усиление скорости похолодания в Северном полушарии согласуется с изменением температуры климатических оптимумов кайнозоя (рис.5, 6): в эоцене она была выше современной примерно на 6.5°C [1], в оптимуме плиоцена — на 4°C, в оптимуме микулинского межледниковья — на 2°C, а в оптимуме голоцена — на 1°C. Следовательно, в течение основной части кайнозоя продолжительностью почти 50 млн лет глобальная температура снизилась всего на 2–2.5°C, тогда как за последние 4 млн лет она упала на 3–3.5°C, т.е. на этом коротком отрезке скорость снижения температуры возросла более чем на порядок. Если сопоставить эту скорость со скоростью снижения температуры в интервале между микулинским межледниковьем и голоценом, то разница увеличивается на несколько (не менее пяти) порядков! При этом снижение среднелобальной температуры сопровождалось ростом различия среднегодовых температур приземного слоя воздуха между экватором и полюсом: от 10–12°C в начале кайнозоя до 40–42°C в голоцене.

Столь радикальные различия позволяют говорить о макромасштабном «сбросе» в режиме функционирования ландшафтно-климатической системы от высокотемпературного к низкотемпературному.

Мегациклы. Известно, что начиная с древнейших этапов истории Земли — с архея (~3 млрд лет назад) — формирование ее ландшафтной обо-

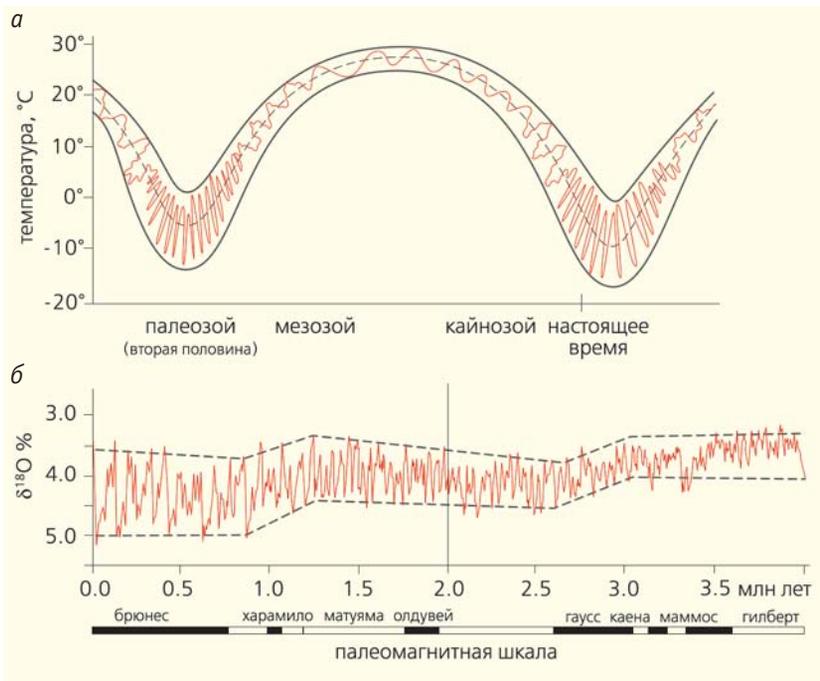


Рис.4. Характер колебаний в мегацикле: а — принципиальная схема [3], б — фрагмент изотопно-кислородной кривой для последних 4 млн лет по данным глубоководного бурения [9].

лочки происходило в условиях чередования гляциоэров и термоэров. Они образовывали так называемые мегациклы продолжительностью около 300 млн лет и более.

Считается, что последовательность событий внутри мега-

цикла начиналась с ледникового этапа — гляциоэры. Если так, то за последние 700 млн лет (конец протерозоя — фанерозой) выделяется три мегацикла: первый — вендская гляциоэра (конец протерозоя) и термоэра (кембрий — начало карбона),

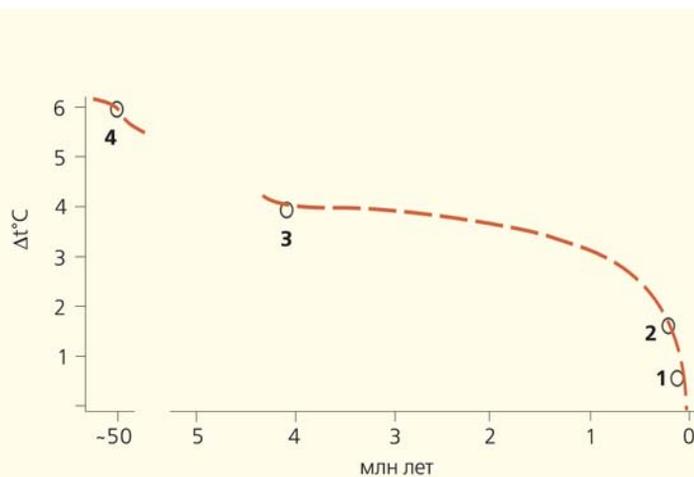


Рис.5. Среднелобальные изменения температуры в кайнозое [7]. Климатические оптимумы: 1 — голоцена, 2 — микулинского межледниковья, 3 — плиоцена, 4 — эоцена.

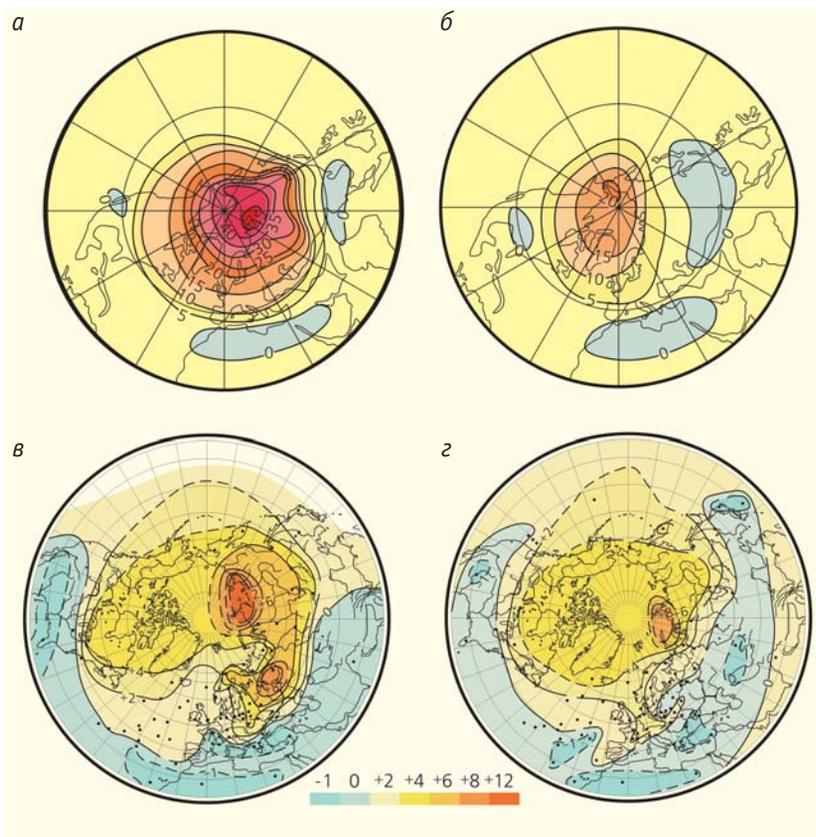


Рис.6. Реконструкция палеотемператур Северного полушария для эоценового оптимума (а — июль, б — январь) и микулинского межледникового (в — июль, г — январь) в отклонениях от современных значений (составители О.К.Борисова, А.А.Величко, Э.М.Зеликсон и Т.В.Светлицкая).

осложненная оледенением на рубеже ордовик—силур; второй — позднепалеозойская гляциоэра (карбон—пермь) и термоэра (триас—эоцен) и, наконец, третий, представленный только гляциоэрой, которая началась в олигоцене и продолжается до сих пор. Однако такая

интерпретация событий предполагает очевидную изолированность развития ландшафтной оболочки позднего кайнозоя (включая современность) от предшествующего мезо-кайнозойского интервала, хотя известно, что именно в нем заложены основные генетические

предпосылки, определяющие тренд формирования современной биосферы.

В связи с этим предложена «реверсивная» интерпретация мегацикла как межледниково-ледникового. В этом случае в фанерозойской истории будут выделяться всего два мегацикла (рис.7). Первый — палеозойский, включающий термоэру (кембрий — начало карбона) длительностью ~245—250 млн лет [11] и значительно более короткую гляциоэру (~70—65 млн лет; конец карбона — начало перми). Второй мегацикл — мезо-кайнозойский, состоящий из термоэры длительностью около 200 млн лет (мезозой — начало кайнозоя) и гляциоэры, начало которой отмечено развитием ледникового щита в Антарктиде 34.5—35.0 млн лет назад (олигоцен).

Современная ситуация.

Таким образом, современная ландшафтно-климатическая система Земли принадлежит к гигантскому мезо-кайнозойскому мегациклу и соответствует его холодному этапу — позднекайнозойской гляциоэре. Последний миллион лет характеризуется четко выраженным чередованием межледниковых и ледниковых периодов, которые также образуют циклы, но более низкого ранга — макроциклы. Современная ситуация отвечает теплой межледниковой фазе нового голоценового макроцикла. Эта фаза началась 10.3 тыс. лет назад (по радиоуглеродной

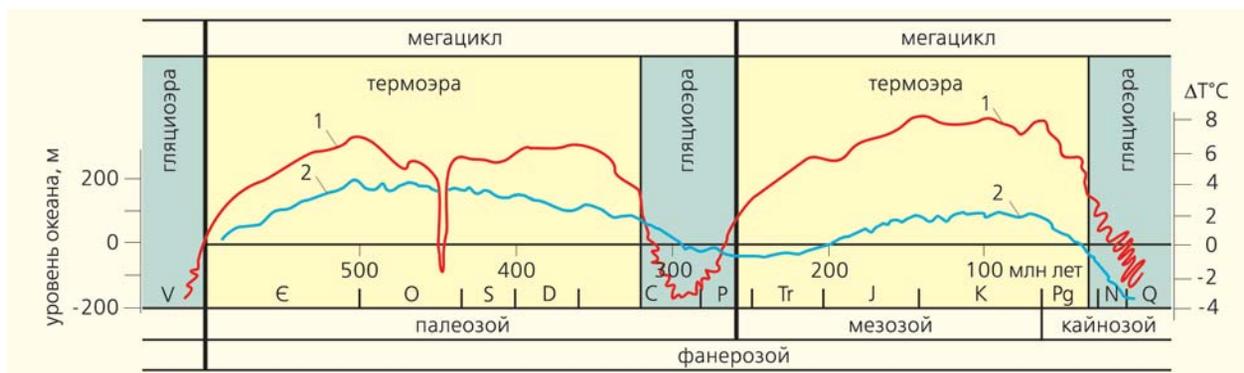


Рис.7. Структура мегациклов в фанерозое (1 — температурная кривая, 2 — изменение уровня океана).

шкале), а ее термический оптимум пройден 6.0–5.5 тыс. лет назад. Следовательно, современная ландшафтно-климатическая обстановка в рамках макроцикла приходится на вторую половину современного межледникового интервала, характеризующуюся тенденцией к похолоданию, связанному с приближением новой ледниковой фазы. Однако в настоящее время резкое антропогенное потепление может существенно повлиять на тренд естественного процесса (рис.8).

Динамика природной зональности

Имеющиеся на сегодняшний день ландшафтно-климатические реконструкции для северной Евразии позволяют проследить основные черты становления и развития зональной структуры этого обширного и разнообразного в природном отношении региона на протяжении кайнозоя [7, 12, 13].

В течение длительного этапа, вплоть до середины миоцена, вся территория северной Евразии находилась в пределах одной гигантской лесной зоны (рис.9). Однако внутренняя структура этой зоны испытывала с течением времени значительные перемены.

В палеоцене и первой половине эоцена, в эпоху теплового климата, на западе субконтинента были распространены субтропические вечнозеленые леса, в Сибири — леса теплоумеренных условий. На территории современных Казахстана и Центральной Азии была велика роль тропических элементов (возможно, здесь находилась особая паратропическая подзона). Северные районы были заняты подзоной листопадных теплоумеренных лесов с широким участием субтропических растений. Видно, что даже в этих условиях максимального выравнивания ландшафтных обстановок проявлялся, хотя и в очень

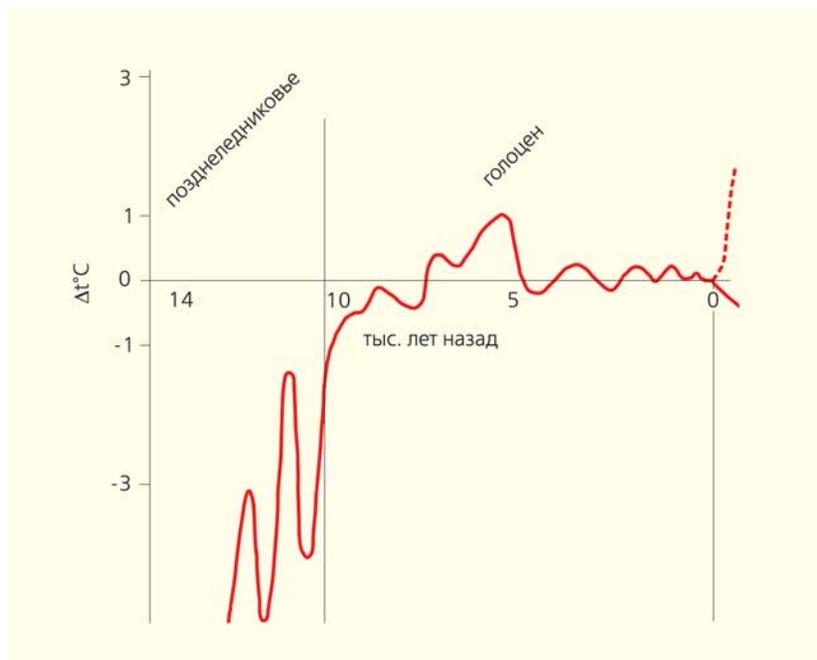


Рис.8. Изменения температуры за последние 14 тыс. лет (в позднеледниковые и голоцене). Пунктирной линией показан тренд, отражающий глобальное потепление климата за счет парникового эффекта.

ослабленном виде, эффект широтной асимметрии. Это указывает на существование западного переноса как главного фактора атмосферной циркуляции в северной Евразии. Возможно, немаловажную роль играла и область низкого давления в северной Атлантике — прототип исландского минимума.

Во второй половине эоцена и в олигоцене, при похолодании, на западе еще оставалась подзона субтропических лесов, но уже обедненного состава. Теплоумеренные леса с участием субтропических листопадных пород продолжали сохраняться только в средних и южных широтах. В Западной Сибири существовала подзона листопадных широколиственных лесов с участием мелколиственных пород. Сохранению здесь этой теплолюбивой растительности способствовало отепляющее воздействие обширного залива древнего моря Тетис [14]. На севере появились хвойно-широколиственные леса бореального типа с участием холодостойких видов.

В миоцене в средних широтах Восточной Европы и Сибири внутри единой обширной лесной зоны распространилась подзона теплоумеренных хвойно-широколиственных лесов, причем севернее в их составе отмечались и мелколиственные породы. На северо-востоке также выделились новые лесные подзоны, состоящие из хвойных, широколиственных и мелколиственных пород.

Интересно, что уже примерно к середине миоцена на территории современного Казахстана и на юге равнин Восточной Европы и Западной Сибири появляются ландшафты, в которых сочетаются травянистая и древесная растительность. Вскоре выделяется и новая зона — степи. При дальнейшем похолодании, уже **в плиоцене**, устанавливаются зоны тундр, полупустынь, а затем и пустынь.

Таким образом, в северной Евразии на протяжении палеогена и неогена происходит смена монозональной (господство лесной зоны) структуры на полизональную, когда за счет сужения

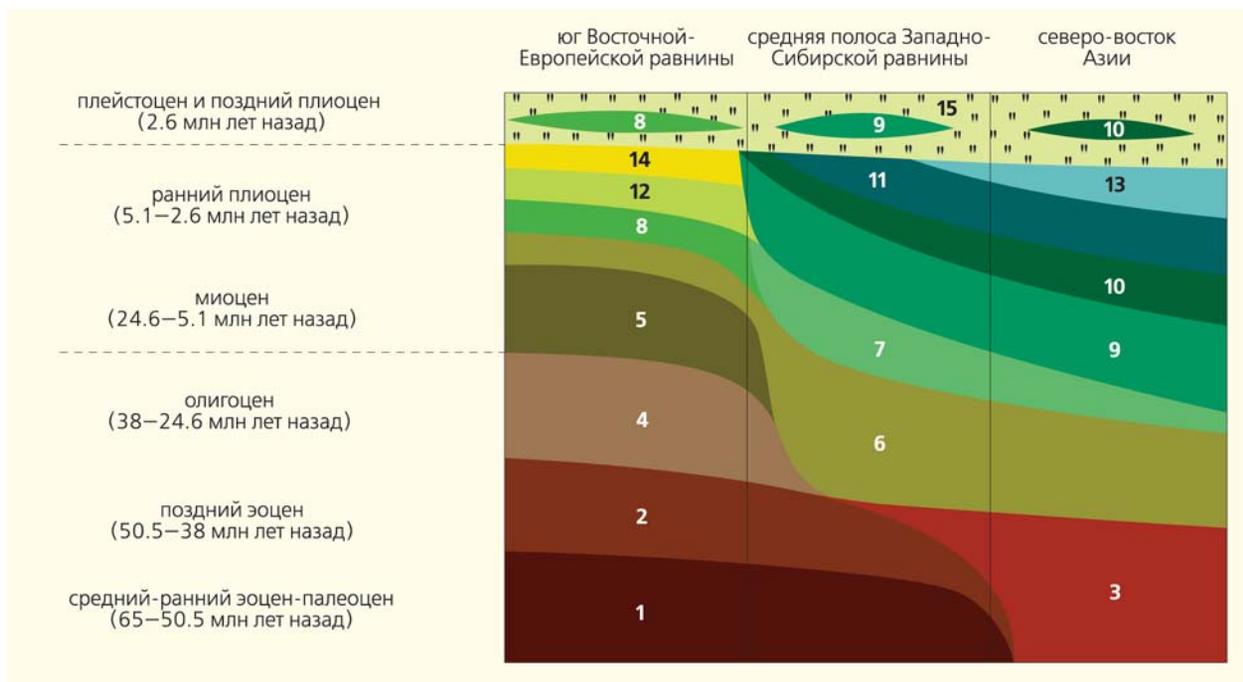


Рис.9. Смена типов зональности в кайнозойской истории северной Евразии. Лесные зоны (типы лесов): 1 — паратропические, 2 — субтропические с широким участием тропических элементов, 3 — субтропические, 4 — теплоумеренные с участием субтропических элементов, 5 — теплоумеренные, 6 — бореальные (смешанные хвойно-широколиственные с участием теплоумеренных элементов), 7 — бореальные (смешанные хвойно-широколиственные), 8 — бореальные (широколиственные), 9 — бореальные (хвойно-мелколиственные с участием широколиственных элементов), 10 — бореальные (темнохвойные). Безлесные и переходные зоны; типы ландшафтных систем: 11 — лесотундра, 12 — лесостепь, 13 — тундра, 14 — степь, 15 — перигляциальная растительность.

одной зоны образуются новые (рис.10). В этом состоит суть известной в палеоклиматологии концепции динамики общепланетарной зональной структуры [15]. Подобная смена происходит вплоть до позднего плиоцена в миграционном режиме, т.е. за счет смещения границ зон.

Совсем иной режим смены природных зон был характерен для **четвертичного периода**. В условиях постоянного чередования оледенений и межледниковий происходила многократная смена монозональной структуры холодных эпох, когда исчезала лесная зона и наступало господство открытых ландшафтов, полизональной структурой теплых периодов, когда лесная зона восстанавливалась (рис.11). Следовательно, динамика зональной структуры в этот период характеризовалась уже не миграционным, а пульсационным режимом (см. рис.10). Однако

при этом состав биоценозов внутри каждого макроцикла не был одинаковым. Прежде всего это относится к лесной зоне: даже в последнюю, микулинско-казанцевскую, межледниковую эпоху состав лесов отличался от современного.

Особое место занимает зона тундр. В термические оптимумы межледниковий она либо вообще не сохраняется (вплоть до среднего плейстоцена), либо протягивается лишь узким поясом на севере Сибири.

Таким образом, на территории северной Евразии структура природной зональности неоднократно претерпевала сложную перестройку. Кроме того, возраст отдельных зон различен, т.е. современная зональная структура полихронна (или гетерохронна).

Наряду с полихронностью со временем происходит увеличение широтных различий в со-

ставе биоценозов внутри зон (см. рис.9). Менее всего эти различия были выражены в начале кайнозоя, когда субтропическая лесная растительность была распространена как в Восточной Европе, так и в Сибири. Разница появляется во второй половине олигоцена и особенно возрастает с середины миоцена, когда на востоке и северо-востоке Евразии формируются ландшафты, значительно более приспособленные к условиям усиливающегося похолодания, а затем и к аридизации. В значительной степени это связано с новейшим горообразованием, начавшимся как раз в олигоцене. Его наиболее активная фаза наступила во второй половине миоцена и продолжалась в плиоцен-четвертичное время. Появившиеся высокогорья стали препятствием для теплых влагонесущих воздушных масс, приходящих с запада, а охлаждению способство-

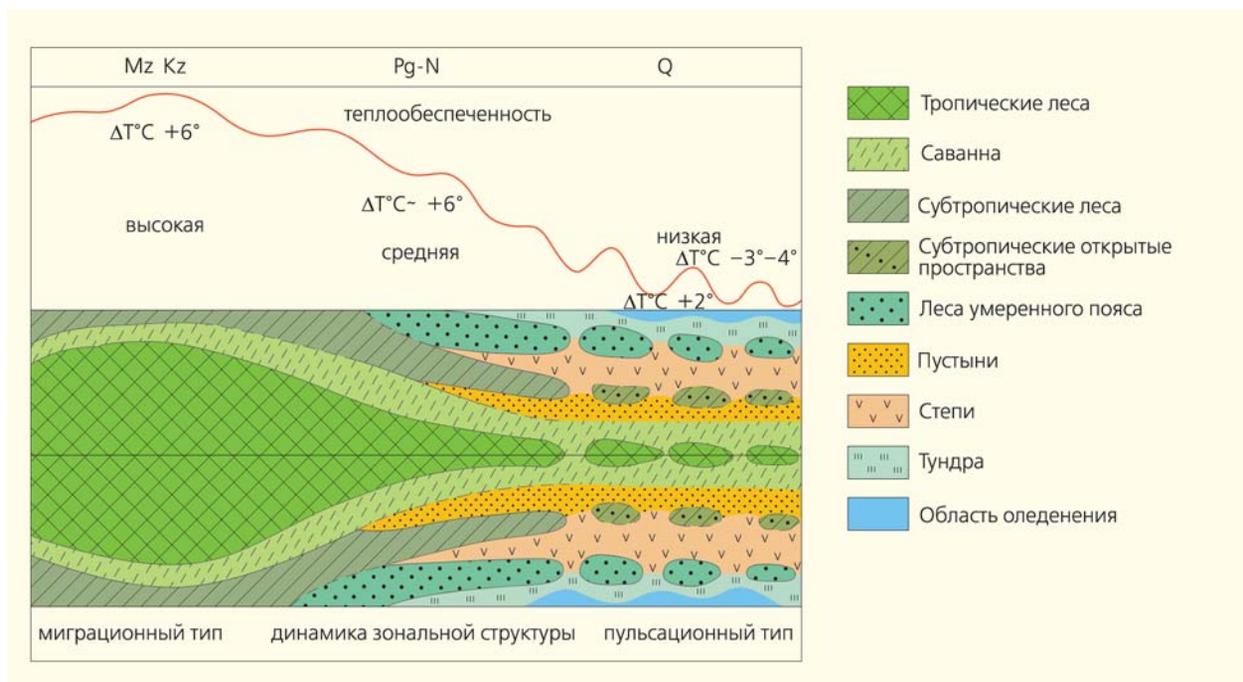


Рис.10. Трансформация широтной зональности ландшафтной оболочки Земли в мезо-кайнозое. Вверху показана условная термическая кривая.

вал замерзающий Полярный бассейн [13, 16, 17].

Но не только поднявшиеся на пути воздушных масс гигантские барьеры стали причиной масштабных изменений ландшафтов Сибири. В условиях усиливающегося глобального похолодания новая высокогорная страна стала центром формирования одного из важнейших современных центров действия атмосферы: области высокого давления на северо-востоке Азии — Сибирского антициклона. Его выхолаживающее воздействие постепенно распространялось все далее на запад Евразии (особенно в зимний период), а также само способствовало увеличению ледовитости Полярного бассейна.

В это же время (последние 14–15 млн лет) происходит формирование Гималайско-Тибетской высокогорной страны. С ней связано развитие другой области высокого давления — Центральноазиатского антициклона — еще одного важнейшего центра действия атмосферы глобального уровня [18].

Взаимодействие этих двух областей высокого давления с зоной западного переноса, арктическими холодными воздушными массами на севере, Алеутским минимумом на востоке, а также муссонными областями на юго-востоке во многом и определяет современную систему атмосферной циркуляции внетропической области Северного полушария.

Таким образом, в течение кайнозоя в северной Евразии произошла кардинальная перестройка климата. Можно с уверенностью говорить о возрасте современной климатической системы: она начала формироваться около 15 млн лет назад и установилась в параметрах, близких к современным, только в плейстоцене.

* * *

В заключение коснемся вопроса о причинах возникновения мегациклов. К сожалению, нужно признать, что мы имеем о них лишь общие представления. Установленное многими исследованиями чередование

гигантских волн — гляциоэр и термоэр — на протяжении более 3 млрд лет истории Земли позволяет говорить, что их последовательность носит системный характер. Попытки выявить наличие климатообразующего механизма, обладающего столь мощным энергетическим потенциалом, в пределах самой Земли малоперспективны. В частности, нет оснований использовать и так называемый механизм Миланковича, объясняющий формирование гляциоэр вариациями эксцентриситета земной орбиты и изменением наклонов эклиптики и оси вращения планеты. Для возникновения даже относительно кратковременных ледниковых эпох плейстоцена этих изменений было бы недостаточно без стимулирующей роли роста альбедо земной поверхности при похолоданиях [19]. К тому же этот механизм не способен объяснить возникновение термоэр.

Для объяснения эпох потеплений нередко обращаются к роли вулканизма как постав-

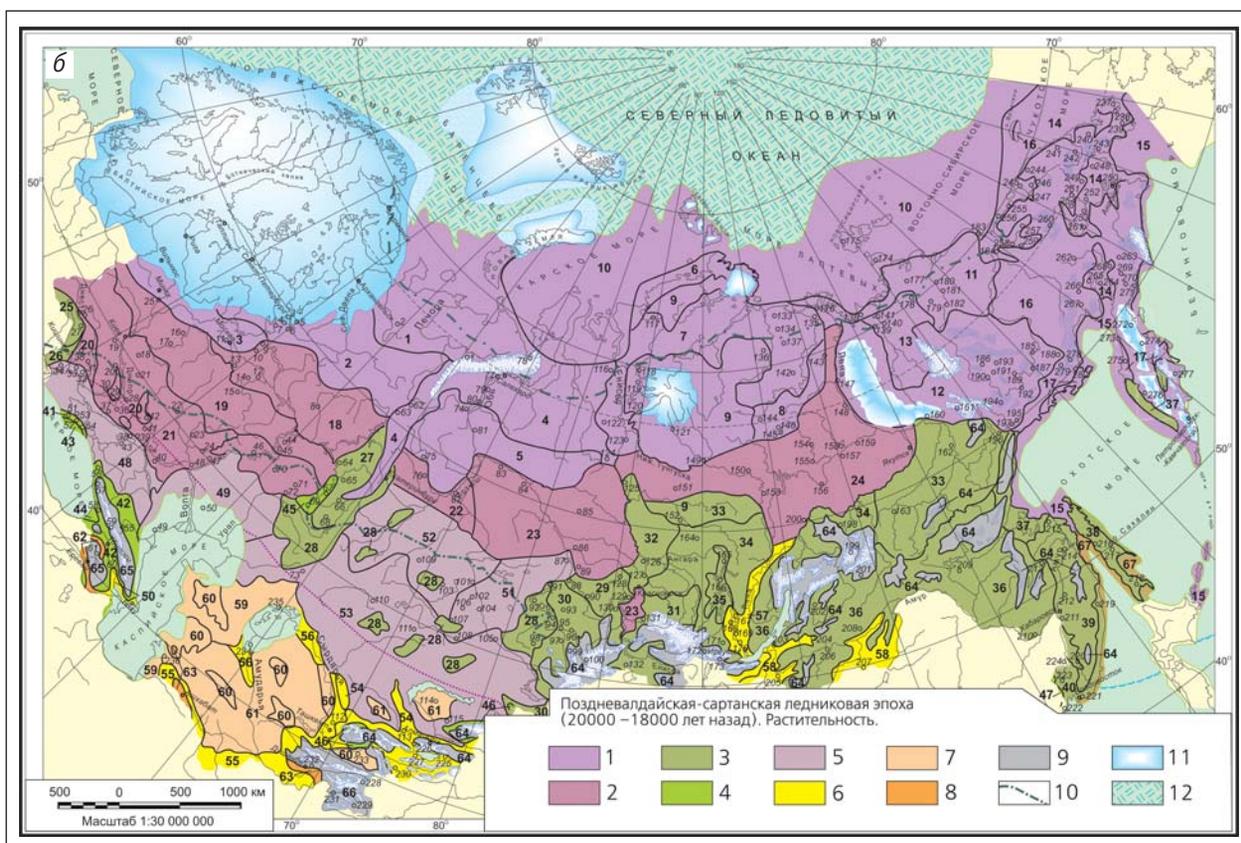
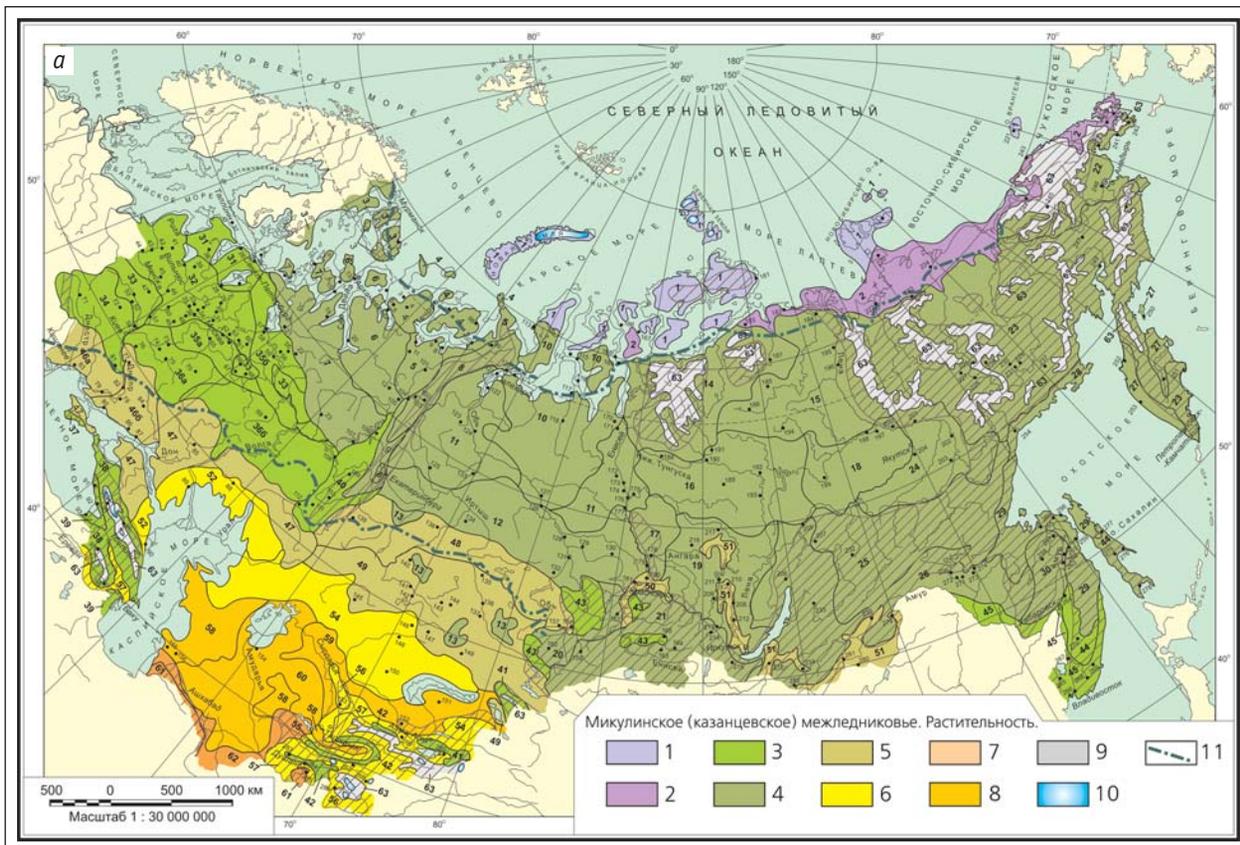


Рис.11. Примеры полизональной и монозональной ландшафтной структуры в плейстоцене: *а* — полизональная структура микулинского межледниковья (1 — тундра, 2 — лесотундра, 3 — таежные леса, 4 — широколиственные и смешанные леса, 5 — лесостепи, 6 — степи, 7 — пустыни, 8 — горные редколесья, 9 — высокогорная растительность, 10 — ледники, 11 — современные границы лесного пояса); *б* — монозональная структура поздневалдайской ледниковой эпохи (1 — тундра, 2 — перигляциальные степи, 3 — таежные леса, 4 — широколиственные и смешанные леса, 5 — степи на многолетнемерзлых грунтах, 6 — степи на сезонно промерзающих грунтах, 7 — пустыни, 8 — горные редколесья, 9 — высокогорная растительность, 10 — современные границы лесного пояса, 11 — ледники, 12 — постоянные морские льды).

щика углекислого газа в атмосферу Земли (охлаждающий эффект вулканизма за счет поступления пепла в атмосферу оказывается слишком кратковременным). Однако проведенные расчеты показали, что для достижения современного уровня антропогенной эмиссии углекислого газа необходимо «включение в действие» всех вулкано-магматических образований Земли,

при этом эмиссия углекислого газа должна будет достигать $850 \text{ км}^3/\text{год}$, что нереально [20].

Остается сделать допущение, как об этом говорилось и ранее, что наличие мегациклов в истории ландшафтной оболочки нашей планеты определяется ведущей ролью внешнего фактора. Масштабные климатические колебания могут быть связаны с длительным (около 200 млн

лет) ритмом, определяемым периодом вращения Солнечной системы вокруг центра Галактики. Нельзя исключить и предположение о макроколебаниях в излучении солнечной энергии. Принципиальная вероятность влияния этих факторов на климат Земли не исключена, поскольку их квазиритмичность, хотя и на несравнимо более низком уровне, существует. ■

Работа выполнена в рамках Программы РАН №4 (проект 3.4).

Литература

1. Величко А.А., Борисова О.К., Светлицкая Т.В. Климат безледной Земли (количественные реконструкции для оптимума эоцена) // Известия РАН. Сер. геогр. 1995. №1. С.31—41.
2. Величко А.А., Зеликсон Э.М., Борисова О.К. и др. Количественные реконструкции климата Восточно-Европейской равнины за последние 450 тыс. лет // Известия РАН. Сер. геогр. 2004. №5. С.7—25.
3. Величко А.А. Структура термических изменений палеоклиматов мезо-кайнозоя по материалам изучения Восточной Европы // Климаты Земли в геологическом прошлом / Под ред. А.А.Величко и А.Л.Чепалыги. М., 1987.
4. Синицын В.М. Природные условия и климаты территории СССР в раннем и среднем кайнозое. Л., 1980.
5. Бudyко М.И. Климаты в прошлом, настоящем и будущем. Л., 1980.
6. Величко А.А. К вопросу о последовательности и принципиальной структуре главных климатических ритмов плейстоцена // Вопросы палеогеографии плейстоцена ледниковых и перигляциальных областей / Под ред. А.А.Величко и В.П.Гричука. М., 1981.
7. Изменение климата и ландшафтов за последние 65 миллионов лет / Под ред. А.А.Величко. М., 1999.
8. Герман А.Б. Позднемеловой климат Сибири: геологические данные и компьютерные модели // Природа. 2010. №9. С.14—20.
9. Shackleton N.J. The deep-sea sediment record and the Pliocene-Pleistocene boundary // Quaternary International. 1997. V.40. P.33—35.
10. Fischer A.G. Long-term climatic oscillations recorded in stratigraphy // Climate in Earth history. Washington, 1982.
11. Fischer A.G. Climatic oscillations in biosphere // Biotic crises in ecological and evolutionary time / Ed. M.Nitecki. N.Y., 1980.
12. Криштофович А.Н. Палеоботаника. 4-е изд. Л., 1957.
13. Синицын В.М. Древние климаты Евразии. Ч.1. Л., 1965.
14. Akhmetiev A.M. Ecological crises of the Paleogene and Neogene in extratropical Eurasia and their putative causes // Paleontological Journal. 1996. V.30. №6. P.738—748.
15. Величко А.А. Эволюционная география: Некоторые вопросы теории // Известия АН СССР. Сер. геогр. 1985. №6. С.25—35.
16. Юрцев Б.А. Гипоарктический ботанико-географический пояс и происхождение его флоры. М., 1966.
17. Баранова Ю.П., Бискэ С.Ф., Гончаров В.Ф. и др. Кайнозой северо-востока СССР // Т-ды ИГТ СО АН СССР. 1968. Вып.38.
18. Li J. The uplift of the Qinghai-Xizang Plateau and its effect on environment // Quaternary geology and environment in China. Beijing, 1991.
19. Бudyко М.И. Эволюция биосферы. Л., 1981.
20. Gerlach T. Volcanic versus anthropogenic carbon dioxide // EOS. 2011. V.92. №24. P.201—208.

Борьба со старостью: надежда на разум

Полагаю самым главным делом: сохранение и размножение российского народа, в чем состоит величество, могущество и богатство всего государства, а не в обширности, тщетной без обитателей.

М.В.Ломоносов, 1761 г.

В.Н.Анисимов

За прошедшие 100 лет геронтология накопила множество сведений о возрастных изменениях в самых разнообразных организмах (от дрожжей до человека), о механизмах старения на всех уровнях (организменном, системном, тканевом, клеточном и молекулярном). Происходящая на наших глазах технологическая революция в молекулярной биологии, расшифровка генома самых разных организмов открывают новые возможности как для изучения генетических основ старения, так и для разработки средств, предупреждающих преждевременное старение и улучшающих качество жизни пожилых людей.

Казалось бы, столь значительный прогресс науки должен существенно приблизить нас к решению этой задачи. Однако мы все еще весьма далеки от заветной цели. В научных журналах идут дискуссии о различиях в старении *per se* и в изменениях организма, приводящих к возрастным патологиям, о правомерности использования полученных на лабораторных животных данных для понимания природы старения у человека. На фармацевтическом рынке сегодня активно пропагандируется большое количество средств так называемой «медицины антистарения», массовыми тиражами выходят многочисленные книги, содержащие рецепты омоложения и раскрывающие секреты вечной молодости.



Владимир Николаевич Анисимов, доктор медицинских наук, руководитель отдела канцерогенеза и онкогеронтологии Научно-исследовательского института онкологии им.Н.Н.Петрова (Санкт-Петербург), президент Геронтологического общества при РАН, член Совета Международной ассоциации геронтологии и гериатрии (МАГГ), главный редактор журнала «Успехи геронтологии». Научные интересы связаны с изучением взаимосвязи возникновения злокачественных опухолей и старения, разработкой мер их профилактики. Лауреат премии РАМН и премии Европейского отделения МАГГ «За выдающиеся достижения в изучении старения и вклад в развитие геронтологической науки в Европе».

Попытаемся ответить на вопрос: располагает ли современная наука средствами профилактики преждевременного старения и увеличения продолжительности жизни? Непосредственным поводом к написанию этой статьи послужила чудом сохранившаяся брошюра «Борьба со старостью»* приватдоцента Императорского Петроградского университета П.Ю.Шмидта, опубликованная в 1915 г. в серии «Знание для всех» [1]. В ней автор дает исчерпывающий обзор («очерк», как он его сам называет) тогдашних знаний о природе старения.

* Автор глубоко признателен врачу-гериатру кандидату медицинских наук А.Г.Захарчуку за щедрый дар и возможность ознакомиться с этой книгой.

Перспективы борьбы со смертью

В вводной части очерка Шмидт** обсуждает перспективы борьбы с болезнями и смертью. Он убежден в том, что «разум — самое мощное орудие человека,

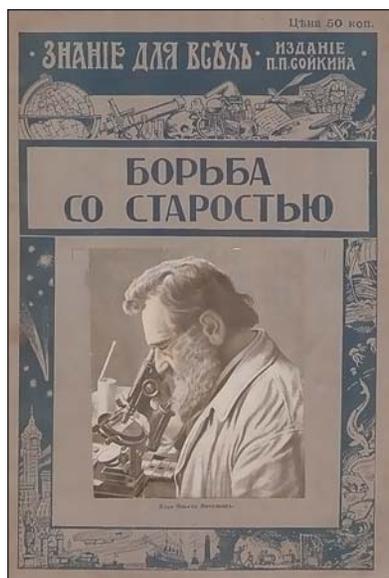
** Петр Юльевич Шмидт (1872—1949), выдающийся зоолог, ихтиолог. Руководитель зоологического отдела Камчатской экспедиции Ф.П.Рябушинского, много лет заведовал отделом ихтиологии Зоологического музея. С 1930 г. и до конца жизни — ученый секретарь Тихоокеанского комитета АН СССР, очень много сделавший для изучения ихтиофауны северной части Тихого океана и дальневосточных морей России. Открыл анабиоз дождевых червей при высушивании и способность переживания анабиоза у амфибий. Известен как переводчик и прекрасный популяризатор.

с помощью которого человек одержал блестящую победу над окружающим миром». Подчеркивает, что весь ход культурного развития человечества представляет собою *борьбу за жизнь, борьбу против смерти*. Верит, что постепенно человек научился бороться с болезнями, подтачивающими жизнь и ведущими к смерти: «Быть может, далеко еще впереди, но все же виднеется конечное торжество — полное одоление болезней и создание здоровой жизни!». Однако напоминает, что «победа над смертью не может даваться легко и быстро... Потребуется, быть может, еще века работы научной мысли, чтобы нанести удар страшному врагу».

Насколько соответствуют этим прогнозам современные оценки ситуации? Неисправимый оптимист и романтик из Кембриджа Обри Ди Грей настаивает на том, что уже родился человек, который проживет 150 лет [2]. Проведенные в США расчеты относительного риска смерти от разных причин у 77 782 медсестер в возрасте 30–55 лет за 24-летний период наблюдения позволили сделать вывод, что 55% всех причин смерти, 44% смертей от рака и 72% — от сердечно-сосудистых заболеваний могут быть устранены при отказе от курения, при поддержании нормального веса тела, умеренной физической активности, соблюдении здоровой диеты, ограниченном потреблении алкоголя (табл.1). Однако ожидаемое увеличение продолжительности жизни человека при устранении главных причин смерти оказывается довольно скромным (табл.2).

Бессмертие, старение и смерть

Вторая часть книги посвящена проблемам бессмертия в живой природе и сопоставлению «сомы» и половых клеток многоклеточных организмов. «Научный анализ показывает, что великое



Обложка книги П.Ю.Шмидта «Борьба со старостью». Петроград. 1915 г.

множество живых существ на Земле являются принципиально бессмертными». К таким существам принадлежат все одноклеточные организмы, как животные, так и растительные: инфу-

зории, амёбы, лучевики и солнечники, одноклеточные водоросли и др. Отмечен особый вид бессмертия у образующих колонии многоклеточных животных, размножающихся бесполом пу-

Таблица 1
Факторы риска преждевременной смерти у женщин в США*

Курение: > 1–14 сигарет в день
Индекс веса тела: > 25
Низкая физическая активность < 30 минут в день
Диета с избытком жира и с низким уровнем потребления фруктов и овощей, орехов, сои, рыбы, волокон, полиненасыщенных жирных кислот
Потребление алкоголя 0 и > 15 грамм в день

* Результаты 24-летних наблюдений за медсестрами (77 782 человека).
По: Dam R.M. // BMS. 2008. V.337. P.1440.

Таблица 2
Ожидаемое увеличение продолжительности жизни человека при устранении главных причин смерти

Причина смерти	При рождении	В 65 лет
Сердечно-сосудистые заболевания	10,9	10,0
Заболевания сердца	5,9	4,9
Инсульт	1,3	1,2
Рак	2,3	1,2
Несчастные случаи	1,2	0,2
Грипп и пневмония	0,5	0,2
Инфекционные заболевания	0,2	0,2
Диабет	0,2	0,2

По: Cutler R.G., Mattson M.P. // Ageing Res. Rev. 2006. V.5. P.221–238.

тем (например, актиний, коралловых полипов) и у древесных многолетних растений (драконова дерева, баобаба).

В современной геронтологии уживаются и глубокая убежденность в существовании бессмертных организмов, и полное отрицание такой возможности. У части геронтологов популярно понятие «несущественного», или «пренебрежимого», старения, когда не меняется темп размножения после достижения половой зрелости, с возрастом нет заметных ухудшений физиологических функций или снижения устойчивости к заболеваниям, а также заметных изменений смертности [3]. К таким видам относят гренландского кита, гигантскую черепаху, камбалу, осетра, омара, моллюска жемчужницу, а также некоторые виды крупных островных птиц, растений и др. [4, 5]. Большое внимание последнее время привлекают работы, посвященные исследованиям старения голого землекопа (*Heterocephalus glaber*). Этот социально высокоорганизованный и долгоживущий грызун размером с мышь обитает в засушливых регионах северо-восточной Африки, в лабиринтах подземных ходов, где живет до 28 лет. У него не бывает рака, сердечно-сосудистых заболеваний, сахарного диабета, чрезвычайно высоки иммунитет к инфекциям и устойчивость к окислительному стрессу в течение всей жизни, а у самок с возрастом не выключается эстральный цикл [6].

Однако, как справедливо замечает геронтолог И.Ю.Попов, прямых данных о возрастных изменениях в смертности крайне мало или же их в принципе нельзя получить [4]. Мнение о том, что вероятность смерти не меняется с возрастом, основывается на исследовании отдельных долгожителей, здоровье которых не отличается от здоровья молодых особей. Однако сведения о вероятности их гибели в естественных условиях, а также об изменении этого

параметра с возрастом отсутствуют. Попов полагает, что у большинства обитающих в дикой природе животных проследить старение трудно и большая часть таксономических групп не изучена в этом отношении. Вместе с тем есть все основания полагать, что по мере усиления отличий от простейшего предка растут и проявления старения. Вероятно, эта закономерность связана с тем, что в ходе эволюции у животных накапливались различные изменения, которые, накладываясь друг на друга, приводили к усложнению строения. По мнению А.В.Макрушина, первые на Земле *Metazoa* были, вероятно, бессмертными, но потеряли это свойство из-за усложнения своего строения, происходившего в ходе борьбы за ресурсы среды [5]. Чинить сложную конструкцию труднее, чем простую, а поскольку по мере жизни в организме неизбежно происходят повреждения, устранять их становится труднее. Значит, «опыт» медленно стареющих примитивных животных нельзя напрямую использовать для борьбы со старением менее примитивных организмов. Однако знание различий в проявлениях старения животных помогает понять суть процесса, хотя вряд ли оно приведет к открытию «эликсира долголетия». Искать, например, в двусторчатых моллюсках, погонофорах, акулах или губках средство отмены программы старения млекопитающих малоперспективно [4].

Шмидт отмечает: «Август Вейсманн первый обратил внимание на принципиальное различие в вопросе о смерти между низшими, одноклеточными, животными и высшими представителями животного царства, тогда как первые по существу бессмертны и гибнут лишь под влиянием неблагоприятных условий, вторые — с возрастом стареют и, без всякого вредного влияния внешних условий, погибают естественной смертью» [1].

Причины смерти

В III части своей работы Шмидт анализирует современные ему взгляды на причины смерти. По Вейсманну, смерть «сомы» после исполнения самками своей главной цели, т.е. после оставления потомства, должна рассматриваться как выгодное приспособление, способствующее выживанию вида. Один из главных признаков наступающей старости — замедление и полная остановка роста. Пока организм молод, он растет, по достижении зрелого возраста и порога старости рост прекращается. Шмидт упоминает работы американского биолога Дж.Майнота, установившего, что замедление роста, а вместе с тем и старение всецело зависят от дифференцировки клеток. Так, «клетки специализированные делятся медленнее, чем первоначальные (стволовые. — В.А.), а совершенно специализированные, например нервные клетки, и вовсе утрачивают способность делиться» [1]. Чем совершеннее организация многоклеточного организма, тем более он подвержен старению.

В наши дни эти воззрения находят свое отражение в теориях, рассматривающих старение как результат эволюционных компромиссов. Дж.Уильямс первым предложил теорию антагонистической плейотропии: гены, способствующие плодовитости и жизнеспособности организма в молодости, в старости могут участвовать в деградации, приводящей его к гибели [7]. Согласно теории «одноразовой сомы», выдвинутой Т.Кирквуд [8], такие жизненно важные функции организма, как размножение, иммунная защита, двигательная активность, работа мозга и нервной системы в целом, конкурируют за энергию. Поскольку каждая функция требует расхода энергии, ее на все не хватает, неизбежно будут накапливаться повреждения и нарушения функций, т.е. начнется старение организма.

Вполне современно воспринимаются слова немецкого зоолога Гертвига: «Под влиянием неизвестных еще причин иногда поработанные организмом клетки сбрасывают свои узы, упрощают свою организацию и начинают усиленно делиться. Это бывает при образовании *раковых опухолей*. Специализированные клетки как бы переходят в первобытное состояние и обнаруживают огромную способность к размножению. Замечательно, что при этом наблюдается известная степень бессмертия этих клеток» [1].

Следует подчеркнуть, что основные проявления канцерогенеза у человека и лабораторных грызунов имеют как много общего, так и некоторые различия [9]. У человека и животных частота злокачественных новообразований увеличивается с возрастом, но характер возрастного распределения опухолей в разных органах и тканях иной и зависит от типа новообразования. С возрастом чувствительность различных тканей к инициации опухолевого процесса может как уменьшаться, так и увеличиваться, однако старость обычно способствует прогрессии канцерогенеза. Установлено, что ряд общих генетических процессов (например, активация теломеразы) играет ключевую роль и в канцерогенезе, и в процессе иммортализации [10]. Есть три основные гипотезы, претендующие на объяснение связи рака и возраста:

— канцерогенез — это протяженный во времени процесс, поэтому его результат наиболее вероятно будет выявлен у пожилого индивидуума;

— при старении в тканях появляются молекулярные нарушения, аналогичные первым стадиям канцерогенеза, что увеличивает чувствительность этих тканей к действию канцерогенов;

— возрастные изменения внутренней среды организма, включая пролиферативную активность и иммуностарение, способствуют возникновению

и росту злокачественной опухоли.

Предполагается, что еще один вероятный фактор, связующий старение и рак — это нестабильность теломер. В пожилом возрасте и у животных, и у человека чувствительность к действию опухолевых промоторов повышена. Профилактика рака должна включать не только исключение канцерогенных факторов среды, но и нормализацию возрастных нарушений внутренней среды организма. Воздействия, увеличивающие продолжительность жизни (генетические модификации, геропротекторы) могут либо замедлить старение, увеличив при этом латентный период развития опухолей, либо уменьшить смертность среди долгоживущих индивидуумов, снизив риск развития рака. Наконец, некоторые геропротекторы могут повысить выживаемость индивидуумов с относительно короткой продолжительностью жизни, что может увеличить частоту развития новообразований в популяции в целом [10, 11].

«В нормальных условиях специализированные клетки (мышечные, нервные) не делятся, поэтому, не обладая способностью деления, они не могут восстанавливаться (заменяться молодыми), и если погибают от каких-нибудь внешних причин, то оказываются уже безвозвратно утраченными для организма. Между тем на этих клетках зиждется главнейшая, наиболее интенсивная деятельность организма — все движение и вся психическая жизнь» [1]. Как утверждает Шмидт, ослабление деятельности клеток вследствие изнашивания ведет к нарушению правильного действия всех органов, что и служит основной причиной старости и смерти. Трудно не согласиться с этим положением.

«Новейшие исследования указывают путь, следуя по которому, быть может, удастся достигнуть если не бессмертия,

то значительного продления жизни», — так открывает Шмидт IV раздел своей работы. «Оказалось, что целый ряд различных неблагоприятных факторов может вызывать омоложение клеток: холод и голод, неблагоприятная среда, поранение, обнажение тканей».

Непредвзятый читатель, хотя бы немного знакомый с современной литературой по геронтологии, сможет провести параллель между этими наблюдениями и работами по гормезису при воздействии стрессоров и ограничению калорийности питания [11, 12].

Далее Шмидт отмечает: «В самое последнее время наука обогатилась совершенно новым методом, который может в будущем получить очень широкое применение. Мы говорим о методе искусственного культивирования тканей, открытом американским исследователем А.Каррелем. Он показал, что почти каждая ткань, извлеченная из организма и перенесенная в искусственную среду, содержащую необходимые пищевые вещества и все нужное для жизни, может не только долго существовать, но и размножаться и расти. <...> Мало того, оказалось, что и в этих неблагоприятных условиях ткань молодеет, клетки ее утрачивают свою специализированность, становясь как бы зародышевыми, и начинают быстрее размножаться. Надо все же сознаться, что пока этот новый путь борьбы со смертью только слабо намечается впереди и трудно сказать, куда он приведет — к победе или... к разочарованию!» [1].

И в этом случае Шмидт оказался провидцем. Спустя более полувека установили, что описанный Каррелем феномен — артефакт: из-за несовершенных методов культивирования при каждом их пересеве в культуры попадали свежие клетки.

В начале 60-х годов прошлого века Л.Хейфлик показал, что даже в идеальных условиях культивирования фибробласты эмб-

риона человека способны делиться только ограниченное число раз (50 ± 10). Феномен назвали лимитом Хейфлика. С увеличением возраста донора число удвоений, которые были способны совершить клетки организма, существенно уменьшается. Это привело к представлению о существовании гипотетического счетчика делений, ограничивающего общее их число [13].

Клеточное (репликативное) старение наблюдается не только у человеческих фибробластов, но и в культурах клеток цыплят, черепах и многих клеток млекопитающих. В настоящее время принято считать, что, в отличие от половых и стволовых клеток, *in vitro* пролиферативный потенциал большинства типов соматических клеток ограничен. Наряду с фибробластами, этот феномен наблюдается и в глиальных клетках, кератиноцитах, гладких мышцах сосудистой стенки, клетках хрусталика, эндотелиальных клеток и лимфоцитов.

Стареющие клетки хуже отвечают на ростовые факторы микроокружения из-за возникающих у них дефектов передачи регулирующих сигналов. Об этом свидетельствует, в частности, тот факт, что инфицирование стареющих фибробластов вирусом SV-40 приводит к репликации ДНК, т.е., несмотря на неспособность стареющих фибробластов отвечать на сывороточные ростовые факторы, сама система репликации вполне сохранна [14]. Более того, получены данные, свидетельствующие, что в старом организме микроокружение угнетает регенеративный и пролиферативный потенциал эмбриональных клеток человека [15].

Хирургически объединив кровеносные системы молодых и старых мышей, ученые Стэнфордского университета обнаружили в крови старых мышей вещества, которые вызывают в мозге молодых животных изменения, свойственные мозгу старых. По мнению авторов, эти

вещества, уровень которых повышается с возрастом, подавляют способность мозга производить новые нейроны, играющие важную роль в формировании памяти и в способности к обучению [16].

Более того, введение плазмы крови от старых мышей молодым вызвало в их мозге такие же негативные изменения, как если бы у подопытных животных было общее кровообращение. Молодые мыши, получившие плазму старых, хуже решали пространственно-навигационные задачи, чем животные, получившие плазму более молодых мышей. Чтобы выявить циркулирующие в крови специфические факторы, связанные со старением, исследователи проанализировали 66 различных белков иммунной системы. Содержание шести из них оказалось повышено и у обычных старых мышей, и у молодых, но «состаренных» животных. Первый в списке хемокин CCL11, известный также как эотаксин — небольшой белок, привлекающий определенный тип иммунных клеток в области, где он секретируется другими типами клеток. Тесты крови и спинномозговой жидкости здоровых людей в возрасте от 20 до 90 лет выявили аналогичный подъем уровня эотаксина. Таким образом, американские исследователи подтвердили наблюдения российских ученых, которые в 2000—2005 г. впервые обнаружили накопление в сыворотке крови и в мозге мышей и человека фактора, ускоряющего старение нервной системы и организма в целом [17].

С увеличением числа пассажей клетки становятся более чувствительными к внешним стрессорам, что частично обусловлено изменениями в экспрессии генов. Вероятно, клеточное старение возникает как результат воздействия постоянного умеренного стресса на клеточную популяцию, тогда как более интенсивный стресс индуцирует апоптоз, а слиш-

ком сильный может прямо приводить к некрозу [11, 13].

Установлено, что при серийных трансплантациях некоторых нормальных соматических тканей (кожи или молочной железы) от старых доноров молодым сингенным мышам пролиферативная активность в пересаживаемой ткани постепенно снижается [11].

В 1971 г. А.М.Оловников предложил гипотезу маргинотомии, объясняющую работу счетчика делений клетки. По его мнению, ДНК-полимераза при матричном синтезе полинуклеотидов не в состоянии полностью воспроизвести линейную матрицу, в ее начальной части реплика получается всегда короче. Таким образом, при каждом делении клетки ее ДНК укорачивается, что ограничивает пролиферативный потенциал клеток и, очевидно, служит тем «счетчиком» числа делений и, соответственно, продолжительности жизни клетки в культуре.

Открытие в 1985 г. теломеразы — фермента, который дотраивал укороченную теломеразу в половых и опухолевых клетках, обеспечивая их бессмертие, вдохнувшее новую жизнь в гипотезу Оловникова, в 2009 г. было увенчано Нобелевской премией. Ее получили американские исследователи, но, увы, не наш соотечественник [18].

Шмидт приводит ряд предположений о причинах старения, сформулированных в начале прошлого века, которые не выдержали проверки временем. Так, он полагал, что червеобразный отросток слепой кишки в организме человека не играет полезной роли, а служит источником заболеваний аппендицитом, который в 8—10% случаев приводит к смертельному исходу. В наши дни антибиотиками и лапароскопической хирургии минимизировали летальность от аппендицита, а выявление роли злополучного отростка как важного звена в системе иммунитета позволило присвоить ему звание «кишечной миндалины».

Основоположник научной геронтологии И.И.Мечников, предложивший в 1903 г. этот термин, считал, что другой совершенно ненужный орган для человека — толстая кишка, которая служит питомником болезнетворных микробов и источником продуктов гнилостного разложения, вызывающих самоотравление организма и преждевременное старение. Следуя за Мечниковым, Шмидт прямо пишет, что человек, как и все млекопитающие, мог бы жить гораздо дольше, если бы не отравлялся ядами кишечника.

Еще один «рудимент», по иронии судьбы, чуть не вычеркнули из приоритетов геронтологии. Как считал крупнейший отечественный геронтолог А.А.Богомолец, «пинеальная железа лишена всякого физиологического значения и представляет рудимент, пестротой своего морфологического состава уже в норме являющийся тератоидным образованием». Сегодня гормон пинеальной железы мелатонин и пептидные препараты, увеличивающие продукцию мелатонина (эпиталамин, эпиталон), также признаются многообещающими геропротекторами (табл.3).

Пределы жизни

Есть ли предел человеческой жизни? Этой проблеме посвящена V часть книги. Человек редко достигает столетнего возраста, замечает Шмидт — хотя известны старики и старухи 110, 120 и даже 150 лет. Действительно, до середины XX в. число долгожителей, особенно столетних, было весьма невелико. Полагают, что до 1800 г. людей, перешагнувших этот рубеж, не было вовсе, а начиная с 1950 г. в странах с низкой смертностью их число удваивается каждые 10 лет. По некоторым оценкам, к середине нынешнего века в США число столетних может достигнуть 1 млн человек.

Таблица 3
Наиболее перспективные геропротекторы

Геропротектор	ПЖ	Устойчивость к стрессу	Репродуктивная функция	Частота опухолей
Ограниченная калорийно диета	+ 40%	↑	↑	↓
Метформин	+ 10—38%	↑	↑	↓
Рапамицин	+ 16—20%	↑	↑	↓
Мелатонин	+ 10—30%	↑	↑	↓
Эпиталамин	+ 10—25%	↑	↑	↓
Эпиталон (Ala—Glu—Asp—Gly)	+ 10—25%	↑	↑	↓

По: Анисимов В.Н. Молекулярные и физиологические механизмы старения. Т.1. СПб., 2008.

В 1997 г. в возрасте 122 лет 164 дней умерла француженка Жанна Кальман, зарегистрированная Книгой рекордов Гиннеса как самый старый человек. Существует довольно устойчивое мнение, что в некоторых регионах мира, например в горах Кавказа или Эквадора, проживают люди с исключительным долголетием (до 140 и более). Тщательные исследования не смогли обнаружить ни в Азербайджане, ни в других таких местах примеров исключительного долголетия. Обычно столетними себя называли лица, использовавшие свидетельства о рождении или церковные сертификаты, принадлежащие старшим родственникам (дядьям или теткам) и имевшим одинаковое со своим имя. Современная геронтология придает большое значение изучению медико-социальных аспектов долгожительства. Ведь люди, прожившие 100 и более лет, служат прекрасным примером успешного старения, поскольку у них практически отсутствуют основные ассоциированные со старением заболевания или они развиваются значительно позднее [11].

Анализируя причины долголетия, Шмидт указывает, что Вейсманн пытался связать продолжительность жизни с плодовитостью: чем плодовитее животные, тем меньше оно живет. Однако такая зависимость не

всегда совпадает с действительностью. Среди птиц встречаются примеры сравнительно большой плодовитости и одновременно долгожительства. Так, утки откладывают много яиц и в то же время живут 20—30 лет. Еще менее оправдывается это правило на рыбах, которые чрезвычайно плодовиты и, пожалуй, живут дольше из всех позвоночных.

Рассматривая процессы, развивающиеся при старении в различных органах организма человека, Шмидт указывает, что в основе их атрофии лежит не только ослабление деятельности клеток, но нередко и полное исчезновение некоторых типов клеток и замена их клетками соединительной ткани. Аналогичный феномен наблюдал Мечников, показавший, что при фагоцитозе деятельные клетки стареющих тканей замещаются соединительной тканью. Процесс этот наиболее выражен в нервной ткани, которая «заведует и управляет» всеми другими. То же происходит и в мышечных волокнах стариков и старых животных. Особенно значительные и опасные изменения претерпевают стенки кровеносных сосудов: они утрачивают свою эластичность (так как в них погибают гладкомышечные волокна), становятся хрупкими, в них отлагается известь — т.е. развивается обычный для старости атеросклероз.

роз. Отвечая на заданный себе вопрос, почему такие изменения не происходят в молодости, когда блуждающие клетки (фагоциты) наличествуют даже в еще большем количестве, Шмидт поясняет: в молодом состоянии клетки организма выделяют вещества, противодействующие ядам и защищающие от нападения фагоцитов. С возрастом эта сопротивляемость ядам слабеет.

Преждевременная старость. Борьба со старостью

«Основным и главным результатом продолжительных и обширных исследований профессора И.И.Мечникова, — так начинает Шмидт заключительный раздел книги, — является тот вывод, что старость и смерть человека — *преждевременны*». Что же предлагала наука столетие назад для решения этой грандиозной задачи? «Ослабление гнилостных процессов в кишечнике и уменьшение количества ядов, выделяемых толстыми кишками, должно отражаться благоприятно на здоровье и на продлении жизни», — таков основной вывод наблюдений Мечникова. Поэтому, не сомневается Шмидт, самый верный путь — оперативный.

Однако сегодня хирурги-онкологи, которым приходится выполнять такие операции при заболеваниях толстой кишки, могут многое рассказать о незавидном качестве жизни своих удачно прооперированных пациентов.

«Второй путь — это борьба против вредных гнилостных микробов с помощью микробов же». Широко известны болгарская палочка, мечниковские простокваша и кефир. Шмидт рассказывает, что в Болгарии, в тех местностях, где молочнокислые продукты (йогурт) составляют главную пищу, много столетних. Но как быть со столетними жителями Окинавы,

которые предпочитают рис, рыбу, побеги бамбука, овощи, фрукты и соевые бобы, в отличие от молочнокислых продуктов, подверженные гниению в толстой кишке?

Тем не менее второй путь борьбы со старостью, рациональное питание, без сомнения, может содействовать окончательной победе над этим нашим исконным врагом. С этим, безусловно, согласятся как почитатели кефира, так и любители риса. Подсчитано, что средний житель Японии с пищей потребляет 2761 ккал в день, что на 17% меньше, чем жители экономически развитых стран Европы (3314 ккал/день) и на 27% меньше, чем жители США (3774 ккал/день). Значит, жители Японии, имеющие наибольшую продолжительность жизни в мире, придерживаются низкокалорийной диеты [17, 19]. В префектуре Окинава, отличающейся самой большой ожидаемой продолжительностью жизни в Японии и самой высокой частотой столетних в мире (~50/100 тыс. человек, что в четыре-пять раз выше, чем в индустриальных странах), ежедневное потребление калорий существенно ниже, чем в целом по стране [11, 17]; на Окинаве меньше смертность от инсульта, рака и сердечно-сосудистых заболеваний.

Но так уж устроен человек, что он не любит отказываться от своих привычек. Риску предположить, что среди наших читателей лишь единицы устоят перед соблазном поужинать в хорошем ресторане и предпочтут ограничиться кефиром с крекером из отрубей. Поэтому одна из горячих точек геронтологии — поиск миметиков низкокалорийной диеты. Антидиабетический бигуанид метформин наряду с гипогликемическим действием способен снижать использование организмом жирных кислот в качестве энергетического субстрата, угнетать неогликогенез, уменьшать концентрацию в крови хо-

лестерина, триглицеридов и инсулина, а также массу тела. Эти свойства метформина, а также способность устранять метаболическую иммунодепрессию, послужили основанием для его применения как геропротектора и в онкологической клинике для нормализации некоторых нарушений обмена и иммунитета [11, 20].

В серии приоритетных исследований установлена способность метформина и других антидиабетических бигуанидов (фенформина и буформина) увеличивать продолжительность жизни у крыс и мышей [11, 21]. А обширные клинические наблюдения показали, что метформин и другие бигуаниды более чем на треть снижают смертность — общую, от инфарктов миокарда и от осложнений сахарного диабета, улучшают выживаемость онкологических больных и снижают риск возникновения рака молочной железы у больных сахарным диабетом 2-го типа [20]. В настоящее время метформин можно рассматривать как наиболее перспективный геропротектор [21].

«Главнейшей целью мы должны себе поставить создание рациональной гигиены, которая дала бы возможность человеку прожить полный и счастливый цикл жизни, заканчивающийся естественной смертью». Нельзя не согласиться со Шмидтом, написавшим эти строки почти 100 лет назад — вслед за И.И.Мечниковым, который сформулировал концепцию ортобиоза — правильного, здорового образа жизни.

Сегодня к реальным мерам для продления жизни человека, относят адекватную физическую активность, диету, богатую антиоксидантами и сбалансированную по незаменимым пищевым компонентам и калориям, а также осознание того, что жизнь продлевается каждый раз, когда предотвращается возможность смерти — что подразумевает профилактические меди-

цинские осмотры и своевременное лечение выявленных заболеваний.

Очень интересна работа, проведенная в Институте демографических исследований Общества им.Макса Планка (Германия). Было показано, что если до объединения Германии смертность в бывшей ГДР была намного выше, чем в ФРГ, то спустя 10 лет после разрушения Берлинской стены показатели ожидаемой продолжительности жизни в обеих частях воссоединенной страны сравнялись. Более того, восточные земли по темпу прироста числа столет-

них жителей обгоняют западные регионы [22]. Этот уникальный эксперимент на людях говорит, что при заинтересованности государства в здоровье и долголетию своих граждан и соответствующей организации системы здравоохранения и социального обеспечения всего за 10—15 лет можно увеличить продолжительность жизни и снизить смертность уже у нынешнего поколения.

Что может человек предпринять против смерти и ее предтечи, старости? Единственным его оружием может быть только разум в его высшем проявлении —

в науке, так Шмидт заключает свою брошюру. Исследования последних лет полностью подтвердили и этот тезис нашего соотечественника. Доказано, что умные живут дольше и меньше болеют. Чем выше уровень интеллекта (IQ) у ребенка, тем больше шансов у него прожить дольше. Смертность людей с высоким уровнем образования в четыре раза ниже, чем у малообразованных. Оказывается, мозг без нагрузки стареет гораздо быстрее. Итак, наши рекомендации: хотите жить долго — с юных лет тренируйте не только тело, но и мозг! ■

Литература

1. Шмидт П.Ю. Борьба со старостью. Пг., 1915.
2. De Grey A.D. Premature deaths close to home // *Rejuvenation Res.* 2011. V.14. P.1—2.
3. Finch C.E. Longevity, Senescence, and the Genome. Chicago; L., 1990.
4. Попов И.Ю. Распределение разных вариантов старения в системе животного мира // *Успехи геронтол.* 2011. Т.24. С.179—188.
5. Макрушин А.В. Гипотеза о возникновении механизма старения // *Успехи геронтол.* 2010. Т.23. С.346—348.
6. Мил Дж., Эндрей Й., Люис К., Баффенштейн Р. Механизмы старения голого землекопа: случай запрограммированного старения // *Рос. хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им.Д.И.Менделеева).* 2009. Т.53. №3. С.64—72.
7. Williams G.C. Pleiotropy, natural selection and the evolution of senescence // *Evolution.* 1957. V.11. P.398—411.
8. Kirkwood T.B.L. The evolution of ageing and longevity // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* 1997. V.B352. P.1765—1772.
9. Anisimov V.N., Ukraintseva S.V., Yashin A.I. // *Cancer in rodents: does it tell us about cancer in humans?* // *Nature Rev. Cancer.* 2005. V.5. P.807—819.
10. Anisimov V.N. Carcinogenesis and aging 20 years after: Escaping horizon // *Mech. Ageing Dev.* 2009. V.130. P.105—121.
11. Анисимов В.Н. Молекулярные и физиологические механизмы старения: В 2 т. 2-е изд., перераб. и доп. СПб., 2008.
12. Голубев А.Г. Биология продолжительности жизни и старения. СПб., 2009.
13. Hayflick L. Biological aging is no longer an unsolved problem // *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 2007. V.1100. P.1—13.
14. Cristofalo V.J., Lorenzini A., Allen R.G. et al. Replicative senescence: a critical review // *Mech. Ageing. Dev.* 2004. V.125. P.827—848.
15. Carlson M.E., Conboy I.M. Loss of stem cell regenerative capacity within aged niches // *Aging Cell.* 2007. V.6. P.371—382.
16. Villeda S.A., Luo J., Mosher K.I. et al. The ageing systemic milieu negatively regulates neurogenesis and cognitive function // *Nature.* 2011. V.477. P.90—94.
17. Зуев В.А., Игнатова Н.Г., Автандилов Г.Г. Накопление фактора старения в организме млекопитающих, включая человека // *Успехи геронтол.* 2005. Т.17. С.108—116.
18. Вершинин А.В. Лауреаты Нобелевской премии 2009 года. По физиологии или медицине — Э.Блэкберн, К.Грейдер, Дж.Шостак // *Природа.* 2010. №1. С.78—82.
19. Willcox B.J., Willcox D.C., He Q. et al. They really are that old: a validation study of centenarian prevalence in Okinawa // *J. Gerontol. Biol. Sci.* 2006. V.61A. P.345—354.
20. Берштейн Л.М. Бигуаниды: экспансия в практическую онкологию (прошлое и настоящее). СПб., 2010.
21. Anisimov V.N. Metformin for aging and cancer prevention // *Aging (Albany, N.Y.).* 2010. V.2. P.760—774.
22. Gjonca A., Brockmann H., Maier H. Old-age mortality in Germany prior to and after reunification // *Demographic Res.* 2000. V.3. P.1—29.

Роль русских ученых в открытии дифракции рентгеновских лучей кристаллами

Академик В.С.Урусов

Московский государственный университет им.М.В.Ломоносова

В июле 2012 г. исполняется 100 лет со времени одного из наиболее выдающихся событий в богатом на научные открытия XX в. Мюнхенский профессор Макс фон Лауэ предположил и вместе со своими учениками (В.Фридрихом и П.Книппингом) экспериментально доказал, что пучок рентгеновских лучей, проходя через кристалл, испытывает дифракцию (отражение от атомных плоских сеток). На фотографической пластинке, помещенной за кристаллом, возникала картина, состоящая из закономерно расположенных темных пятен, образованных в результате интерференции отраженных кристаллом волн [1]. Лауэ дал первое теоретическое объяснение этим фактам. Он принял во внимание тогда еще гипотетические представления о внутреннем строении кристалла, в котором атомы занимают строго регулярные позиции в трехмерной пространственной решетке. Измерения положений дифракционных пятен Лауэ и его ученики проводили на кристалле цинковой обманки (сфалерита) высшей кубической симметрии. Из него были вырезаны пластинки параллельно граням куба и октаэдра. В первом случае пятна образовали картину с симметрией, в которой отчетливо проявились ось четвертого порядка и четыре плоскости (симметрия квадрата), во втором — ось третьего порядка и три плоскости (симметрия равностороннего треугольника). Оба изображения ясно

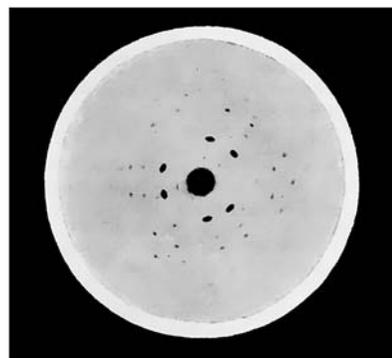
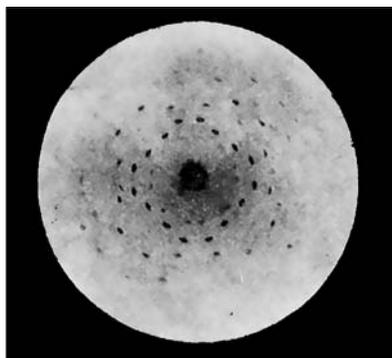
свидетельствовали о том, что рентгеновские лучи дают правильное представление о реальной картине трехмерного пространственного размещения атомов в структуре кристалла.

Вполне закономерно, что открытие, всколыхнувшее весь научный мир и положившее начало рентгеновской кристаллографии и кристаллохимии (науки о законах атомного строения кристаллов), было сделано в Мюнхенском университете. Именно здесь Вильгельм Рентген открыл в 1895 г. новое коротковолновое излучение, впоследствии получившее его имя. Именно здесь работал самый известный кристаллограф того времени Пауль Грот, который основал в 1876 г. первый международный кристаллографический журнал «Zeitschrift für Kristallographie und Mineralogie»*. Одним из наиболее

активных его авторов с 1891 по 1915 г. был наш великий ученый Евграф Степанович Федоров, опубликовавший в нем 115 статей. Среди них встречались и работы монографического характера. Немецкого и русского кристаллографов связывали не только профессиональные, но и дружеские отношения. Грот представлял Федорова в 1896 г. к избранию членом-корреспондентом Баварской академии наук**. Издана их переписка [2], содержащая 196 писем Федорова Гроту и 27 избранных писем Грота Федорову. Грот глубоко усвоил и убежденно разделял взгляд Евграфа Степановича на

** В 1901 г. Е.С.Федоров был избран адъюнктом Императорской Академии наук по кафедре минералогии. Однако отказ Академии от организации Минералогического института заставил Федорова через несколько лет уйти из Академии, о чем он и сообщил в резком письме на имя ее президента, великого князя К.К.Романова.

* «Zeitschrift für Kristallographie» существует до сих пор, и сейчас (в 2011 г.) выходит его 226-й том.



Черные пятна представляют следы рентгеновских лучей, рассеянных кристаллом цинковой обманки: слева — пластинкой, вырезанной параллельно кубической грани; справа — параллельно грани октаэдра. Снимок сделан в лаборатории Мюнхенского университета. 1912 г. [10].

внутреннее строение кристаллов, основанный на федоровской теории 230 пространственных групп симметрии. Легко понять, что Грот, а значит, и Федоров оказали решающее влияние на постановку опытов Лауэ и последовавшее за ними открытие.

Сам Лауэ в своей «Истории физики» [3] писал: «Особенное значение для меня имело то, что в Мюнхене была еще жива традиция исследования пространственной решетки кристаллов... В коллекциях университетского института можно было видеть модели решеток. Большая роль принадлежит также минералогу Паулю Гроту, который в своих лекциях постоянно говорил о решетках». О впечатлении, которое открытие дифракции рентгеновских лучей произвело на Федорова, тот написал в письме от 2 октября 1912 г. революционеру, ученому и поэту Н.А.Морозову: «Для нас, кристаллографов, это открытие первоклассной важности, потому что теперь впервые с полной наглядностью воспроизведено то, что нами лишь теоретически клалось в основу представления о структуре кристаллов, на чем, в частности, основан и кристаллохимический анализ» [4].

Чуть позже, в 1914 г., в статье, опубликованной по-русски [5] и по-немецки [6], Федоров подчеркивает значение открытия Лауэ и говорит о развитии этого нового направления в работах английских физиков — Генри Брэгга и его сына Уильяма Лоуренса Брэгга: «Применение рентгеновских лучей дало в руках У.Л.Брэгга (и его отца) средства привести к заключениям, чрезвычайно важным для теории структуры кристаллов. Отчасти эти заключения неожиданны, по крайней мере в том отношении, что ожидалось видеть в точках правильных систем центры химических частиц, тогда как опыты названного ученого привели к выводу, что это центры атомов». Далее Федоров указывает на приоритет своего вывода пространственных

групп: «Не могу воздержаться от заявления, что я никак не думал дожить до действительного определения расположения атомов, предусмотренных в указанных мной сочинениях. В письме к проф. Гроту я писал, что, пожалуй, детальные применения [этих] систем... начнут совершаться через 100 лет».

В протоколе заседания Минералогического общества от 11 февраля 1914 г. сообщается: «Проф. Е.С.Федоров, указав на огромные заслуги М.Лауэ и У.Л.Брэгга в деле изучения кристаллического строения вещества с помощью рентгеновских лучей, предложил собранию избрать названных ученых почетными членами Общества... Оба ученых, М.Лауэ и У.Л.Брэгг, *par acclamation* избраны почетными членами Общества» [4]. Сохранилось письмо У.Л.Брэгга от 17 февраля 1914 г. [4], где он выражает признательность Федорову за его замечания и советы: «Я очень благодарен Вам за письмо, в котором Вы даете рекомендации относительно способов описания пространственного расположения точек. Я с тем большим интересом рассмотрел Ваш метод, что для меня бывает весьма трудно описать структуру, после того как я ее надлежащим образом изучу. Если уже существует признанный способ определения положений атомов в кристаллах, я был бы Вам весьма обязан, если бы Вы согласились сообщить мне его. Я попытаюсь описывать при помощи Вашего способа все те многочисленные кристаллы, с которыми мне приходится иметь дело, хотя они могут оказаться и чересчур сложными». Почти через полвека в письме от 14 мая 1958 г. к историку науки Г.Н.Кованько [4] У.Л.Брэгг так вспоминал о начале рентгеноструктурного анализа: «Федоров был в то время для меня почти легендарной личностью, разработавшей 230 классов кристаллов. Тот интерес, который существовал в то время, был интересом к внешней форме кристаллов, а не к их внутренней

структуре. Когда я начал анализировать кристаллы X-лучами, я ничего вообще не знал об их геометрии. Для нас было поистине удивительным открытием, что великие люди, подобные Федорову и Барлоу, которого я тоже знал, изучили внутреннюю геометрию кристаллов и дали твердое обоснование нашей работе».

В указанных выше [5, 6] работах Федорова, точнее, в русской и немецкой версиях одной работы он обратил внимание на то, что уже в первых рентгеноструктурных определениях были найдены структуры кристаллов (пирита, алмаза, корунда), которые описываются асимметричными пространственными группами. Федоров в своих ранних работах считал их маловероятными, поскольку они содержали плоскости скольжения вместо обычных плоскостей отражения и винтовые оси вместо осей вращения, т.е. элементы симметрии, включающие в себя одновременное отражение или вращение и перенос (трансляцию) в пространстве. Таким группам симметрии не соответствуют структуры в виде заполняющих пространство без промежутков параллельных укладок многогранников, названных им параллелоэдрами. Именно на таких правильных укладках Федоров и его ученики строили свой «дорентгеновский» кристаллохимический анализ. Первые успехи рентгеноструктурного анализа заставили Федорова отказать от столь ортодоксальной точки зрения. Сейчас же мы знаем, что кристаллические структуры неорганических веществ и минералов с такими асимметричными пространственными группами, как $P2_1/c$ и $Pnma$ — лидеры по распространенности: к ним относится почти 12% всех изученных структур [7]. Еще более широко распространены асимметричные пространственные группы в молекулярных органических кристаллах. Около 2/3 всех структурно изученных кристаллов описываются несколькими (около десятка) такими группами, а на

одну группу $P2_1/c$ приходится почти 29% всех структур [8].

Наиболее подробный анализ первых достижений рентгеноструктурного анализа кристаллов Федоров дал в статье, опубликованной в мартовском номере журнала «Природа» за 1915 г. [9]. В начале статьи он пишет: «Нельзя не считать великим завоеванием человеческого ума то обстоятельство, что он и до открытия этих способов привел к перечислению всех возможных расположений; но то, что было сделано до сих пор, было лишь введением в новую область, экспериментальным методом которой теперь положено прочное обоснование. Однако, как это почти всегда и бывает, вводная часть новой науки, ясно поставив ближайшие вопросы и задачи, само собой наталкивала на открытие новых методов, когда это оказалось вообще возможным по ходу развития физических наук».

На следующих страницах Федоров подробно разъясняет читателю основные геометрические принципы строения кристаллов, которые были рентгенографически изучены к тому времени Брэггами: среди них кристаллы типа поваренной соли (NaCl), флюорита (CaF₂) и сфалерита (ZnS). Евграф Степанович делает это путем заполнения пространства такими параллелоэдрами, как кубы и ромбодекаэдры, и последующего заселения части (или всех) вершин этих многогранников атомами разного сорта. Он отдает должное вкладу в общую работу Брэгга-отца, который предложил заменить «белый» рентгеновский луч, состоящий из волн разной длины, на монохроматический, полученный от Pd-антикатада, что значительно упростило интерпретацию результатов эксперимента. За этим следует объяснение принципов дифракции и интерференции рентгеновских лучей, отраженных плоскими атомными сетками в кристаллах. Федоров по существу повторяет вывод знаменитой фор-

мулы Брэгга-сына — основной формулы рентгеноструктурного анализа: $n\lambda = 2d_{hkl}\sin\theta$ (λ — длина волны рентгеновского излучения, d_{hkl} — межплоскостное расстояние для плоскостей с индексами hkl , n — порядок, θ — угол отражения).

Значительное внимание на последних страницах статьи в «Природе» Федоров (вероятно, впервые в отечественной литературе) уделяет вопросу об относительных интенсивностях измененных рентгеновских отражений разного порядка. Он связывает их с отношениями атомных весов и числом входящих в химическую формулу атомов. Это было вполне логично для того времени, когда только начинала создаваться квантовая теория атомной структуры в трудах Нильса Бора (1913), Генри Мозли (1913) и др. Например, в структуре KCl (тип галита — поваренной соли) интенсивности отражений первого порядка от граней куба (100) очень слабые из-за интерференции (погашения) отражений от соседних сеток, заполненных ионами K⁺ и Cl⁻ со сдвигом друг относительно друга (ион K⁺ над ионом Cl⁻ и наоборот), что связано с их соседством в Периодической системе элементов и близостью их атомных весов (Cl — 35.5, K — 39). В то же время отражения второго порядка отличаются наибольшей интенсивностью из-за наложения отражений от одинаково заселенных плоскостей, расположенных в этой ориентации через один друг от друга. Аналогичным образом для флюорита почти полностью погашаются отражения первого порядка от граней куба, на которых чередуются плоскости, заполненные ионами Ca²⁺ (ат. вес 40), с вдвое большим количеством ионов F⁻ (ат. вес 19). В сфалерите же эти отражения еще достаточно сильные из-за значительного различия атомных весов (Zn — 65, S — 32), но отражения третьего порядка почти полностью погашаются.

Сейчас мы знаем, что связь интенсивности отражений с

атомными весами является не прямой, а опосредованной. На самом деле рентгеновские лучи отражаются от электронной плотности атомных сеток, т.е. дифракция связана с числами электронов в оболочках атомов (в рассматриваемых выше случаях — ионов). Они равны 18 для K⁺ и Cl⁻ (электронная оболочка инертного газа аргона), 18 — для Ca²⁺ и 10 — для F⁻ (оболочка инертного газа неона). Именно этот факт приводит к почти полному погашению отражений первого порядка от плоскостей куба и удвоению отражений второго порядка для KCl и CaF₂. Очевидно, что Федоров был недалек от правильного ответа на эту задачу рождавшегося на его глазах рентгеноструктурного анализа. Однако полное понимание этих фактов потребовало еще некоторого времени, когда квантовая теория атомной структуры оказалась в состоянии решить данную проблему.

Почти немедленно на открытие Лауэ с большим энтузиазмом откликнулся другой выдающийся русский кристаллограф, Георгий (Юрий) Викторович Вульф. Уже в январе 1913 г., т.е. через полгода после открытия нового явления, он опубликовал в «Природе» статью [10], в которой подробно описал и проиллюстрировал опыты Лауэ с учениками и первые попытки теоретического объяснения полученных ими результатов. Его оценка этого события дана в следующих словах: «В июле прошлого года в физической лаборатории Мюнхенского университета была сделана замечательная работа, давшая блестящее подтверждение гипотезы о сетчатом строении кристаллов, такое блестящее, что при некотором преувеличении можно было бы, пожалуй, сказать, что теперь мы увидели решетчатое строение кристаллов не только нашим умственным, но и материальным взором». Заканчивает Вульф свою статью следующими словами: «Открытие действия кристаллов на рентгеновские лучи принадлежит к одним

из самых блестящих открытий последнего времени и замечательных по простоте идеи, лежащей в его основе. Недаром оно овладело вниманием всех физиков и кристаллографов. Теперь во всех научных центрах мира повторяют и видоизменяют опыты Лауэ, Фридриха и Книппинга, и мы, по всей вероятности, скоро услышим вести о многих интересных работах и открытиях, порожденных замечательным открытием мюнхенских физиков. Уже мы читаем известия, что английский физик Брэгг получил подобное же явление, отражив пучок рентгеновских лучей от листочка слюды».

Действительно, события стали развиваться стремительно, и У.Л.Брэгг, параллельно с Вульфом, быстро продвигался к цели. Очень скоро, уже в июне 1913 г., в «Природе» появилась вторая статья Вульфа [11], в которой тот подробно объяснил происхождение пятен на рентгенограммах Лауэ, используя законы отражения света от атомных плоскостей (сеток) в кристаллической структуре. Он выводит формулу, связывающую длину волны, угол отражения и межплоскостное расстояние. В заключение Вульф пишет: «Статья эта представляет пересказ исследования, опубликованного автором в немецком физическом журнале (*Physikali-*

sche Zeitschrift»). В то время как статья уже заканчивалась, автор получил от английского физика Брэгга письмо и отдельный оттиск его работы, опубликованной в трудах Кембриджского философского общества. В этой работе Брэгг приходит совершенно к тем же выводам, как и автор этой статьи. Кроме того, в английском журнале «Природа» (*Nature*) появилась заметка японского физика Терада, в которой он также приходит к тем же самым результатам, но особый интерес его заметки заключается в том, что он наблюдал отражение рентгеновских лучей не на фотопластинке, а непосредственно на флюоресцирующем экране, так что, вращая кристалл, он мог непосредственно наблюдать изменения в расположении светлых пятен, вызываемых этим вращением. Все это показывает, с одной стороны, как велик интерес, возбужденный вновь открытыми явлениями отражения рентгеновских лучей на молекулярных плоскостях кристаллов, с другой же стороны, это указывает на правильность полученных результатов». Добавим, что в том же 1913 г. Вульф опубликовал еще пять статей на ту же тему в различных немецких научных журналах, в том числе в *«Zeitschrift für Kristallographie»* [12], а также

в отечественном журнале «Физика» [13].

Заканчивая эту заметку, посвященную 100-летию одного из самых замечательных открытий в истории науки, без которого нельзя себе представить развитие и современное состояние физики, химии, минералогии, молекулярной биологии и других отраслей естествознания, уместно снова обратиться к словам его автора М.Лауэ [3]: «История физики постоянно дает нам все новые примеры того, как две совершенно независимые, развитые различными школами, теории, например оптика и термодинамика или волновая теория рентгеновских лучей и атомная теория кристаллов, неожиданно сходятся и свободно соединяются друг с другом. Кто мог испытать в течение своей жизни подобное в высшей степени поразительное событие или по крайней мере в состоянии мысленно его испытать, тот не сомневается больше в том, что сходящиеся теории содержат если не полную истину, то все же значительное ядро объективной, свободной от человеческих прибавлений, истины. Иначе надо было бы рассматривать соединение этих теорий как чудо. Идеалом для истории физики должно быть стремление как можно яснее показать подобные события». ■

Литература

1. *Laue M.* Interferenzerscheinungen bei Röntgenstrahlen. Leipzig, 1913.
2. Научное наследство. Евграф Степанович Федоров. Переписка. Неизданные и малоизвестные работы. Л., 1991.
3. *Laue M.* Geschichte der Physik. Bonn, 1950. (Имеется русский перевод: *Лауэ М.* История физики. М., 1956.)
4. *Шафрановский И.И.* История кристаллографии. XIX век. Л., 1980.
5. *Федоров Е.С.* Первое констатирование опытным путем ассиморфной правильной системы // Зап. Горн. ин-та. 1914. Т.5. Вып.1. С.68.
6. *Fedorow E.* Die erste experimentale Feststellung eines asymmorphen regelmässigen Punktsystem // Z. Krist. und Miner. 1914. Bd.54. H.2. S.163–165.
7. *Урусов В.С., Надежина Т.Н.* Частотное распределение и «селекция» пространственных групп в неорганической кристаллохимии // Ж. структ. химии. 2009. Т.50. Приложение. С.26–43.
8. *Зоркий П.М.* Симметрия молекул и кристаллических структур. М., 1986.
9. *Федоров Е.С.* Первые шаги в деле распознавания расположения атомов в кристаллах // Природа. 1915. Март. С.76–81.
10. *Вульф Г.В.* Прохождение рентгеновских лучей через кристаллы // Природа. 1913. Январь. С.27–38.
11. *Вульф Г.В.* Рентгеновские лучи и кристаллы // Природа. 1913. Июнь. С.667–680.
12. *Wulff G.V.* Über die Krystallröntgenogramme // Phys. Zs. 1913. Bd.14. S.217–220.
13. *Вульф Г.В.* Интерференция рентгеновских лучей и теория строения кристаллов // Физика. 1913. №1. С.10–13.

Микробиология как центральная биологическая дисциплина

Г.А.Заварзин

Представленная здесь лекция академика Г.А.Заварзина (1933–2011) должна была быть прочитана осенью 2009 г. перед первокурсниками биологического факультета Московского государственного университета им.М.В.Ломоносова. Именно ею планировали открыть цикл публичных лекций по важнейшим направлениям биологии. Лекция могла стать важным событием для ищущих свое место в жизни молодых людей и помочь им сделать выбор своего пути в науке. Но по досадному недоразумению она не состоялась.

Прочитал эту лекцию Георгий Александрович лишь в феврале 2011 г. — как вводную часть курса природоведческой микробиологии (он более 15 лет читал этот курс на кафедре микробиологии МГУ) перед немногочисленной группой студентов-микробиологов 4-го курса. Это напутствие молодому поколению стало последней лекцией Заварзина.

Напомним читателю, что перед ним расширенные тезисы, конспект лекции, рассчитанной на устную речь и на живое общение со слушателями. Текст приводится с небольшими сокращениями, исправлениями мелких неточностей и добавлением ссылок на упоминаемые работы. Для нашего журнала — это последняя публикация нашего постоянного автора и члена редколлегии.

Область биологии стоит на трех китах: зоологии, ботанике и микробиологии. Остальные биологические дисциплины — лишь приложение к этим базовым наукам, приоритеты в которых распределяются по взаимозависимости: зоология вторична по отношению к ботанике, первоисточнику органического вещества, но обе дисциплины вторичны по отношению к микробиологии, поскольку бактерии создали биосферу, где и появились объекты ботаники и зоологии.

Приоритеты определяются: универсальностью, масштабностью, элементарностью, первичностью происхождения и повсеместностью. Альтернативой им может служить антропоцентрическая система, в которой приоритеты определяются благодеянием человека. А это лишь частично совместимо с биологией как составной частью естествознания.

В биологии в наибольшей степени проявляется идея эво-

люционизма, т.е. последовательности происхождения от простого к сложному. Бактерии — простейшие организмы, способные к самовоспроизведению. У микроорганизмов система ДНК ↔ РНК обеспечивает существование организма как системы. Вирусы и эгоистические генетические элементы не являются организмами: они не способны к размножению вне организма, в нем они размножаются путем самосборки, а не самовоспроизведения. Первые организмы на Земле — бактерии, и с их появлением возникает биосфера. Нет биосферы без населяющих ее организмов [1].

По **масштабу** бактерии современной биосферы продолжают составлять ее количественно определяющую часть. Консервативная оценка их численности в деятельном слое биосферы составляет, по моим приблизительным расчетам, 10^{29} клеток. Общая численность бактерий на Земле, по оценке Витмана [2], равна $4-6 \cdot 10^{30}$, т.е. выше на порядок — за счет «невидимой» глубинной биосферы при ее

крайне малой скорости размножения. При этом бактерии разделены примерно поровну между толщей океана и почвой. Упоминание о деятельном слое биосферы предполагает, что численность живых активно метаболизирующих клеток в ней вряд ли больше 10% от общего числа обнаруживаемых, поэтому 10^{28} клеток можно принять как ориентировочную оценку общей численности деятельных бактерий на Земле.

Бактерии существуют в форме планктонной **взвеси** (10^5-10^6 клеток/мл) и **биопленки**, которая образуется на поверхности раздела фаз. Практически все влажные поверхности покрыты бактериальными пленками разной степени плотности: вода/воздух — монослоем бактериального нейстона; слою отмерших популяций как твердая фаза — очень толстой пленкой, называемой матом (0.1–10 мм). Маты включают разные функциональные группировки микроорганизмов, каждая из которых представлена несколькими видами, с ведущим доминантом —

эдификатором (строителем). В матах имеется очень строгая структурная организация для обмена метаболитами [3].

Биоразнообразие. В культуре получено менее 10 тыс. видов бактерий. По оценке Амана, некультивируемых видов в 100 раз больше, т.е. всего существует 1 млн видов бактерий. Их идентифицируют и классифицируют по нуклеотидным последовательностям гена 16S рРНК, а также некоторых функциональных генов*. В настоящий момент известны последовательности геномов более 2 тыс. видов бактерий. Вероятно, в ближайшие 5–10 лет для описания вида организмов потребуются его полный геном, подобно тому как в предшествующие 20 лет была необходима последовательность 16S рРНК. Нуклеотидную последовательность полного генома можно получить и для некультивируемых организмов. Принципиальная трудность состоит в том, что разные гены у бактерий имеют разную филогению. Выбор ведущего гена определяется соглашением, а не смыслом, поэтому таксономия бактерий имеет конвенциональный характер.

Первичность происхождения. Происхождение жизни на Земле имеет определенные временные рамки: в первых осадочных породах, образовавшихся 3.6 млрд лет назад, обнаруживаются остатки организмов и следы их жизнедеятельности, прежде всего в виде органического углерода с изотопным фракционированием, свойственным живым существам [4].

Образование Солнца имело место 5 млрд лет назад. Возраст Солнечной системы с планетами составляет 4567.5 ± 0.5 млн лет по изотопии включений Са и Al в углистых хондритах. В таких метеоритах много углерода, в том числе органических соединений, гидросиликатов, кар-

бонатов и их элементный состав ближе всего к космическому. Они представляют продукт агломерации пылевой части межзвездной газопылевой туманности, коллапс которой сформировал Солнце. Возраст Земли 4.567 млрд лет принимается исходя из допущения, что метеориты и Земля сформировались одновременно. Обстановку на поверхности Земли в первые 0.5 млрд лет ее существования из-за отсутствия вещественного материала реконструируют на основе моделей, исключающих некоторые сценарии.

Для биологии важно время появления *географической оболочки* Земли, которая включает взаимодействующие слои нижней атмосферы, гидросферы и верхние слои литосферы и служит вмещением биосферы. Согласно господствующим сейчас представлениям, наиболее древние минералы на Земле, цирконы (возраст около 4.2 млрд лет), сформировались в условиях изотопного обмена кислорода с водой, и, следовательно, в это время на Земле уже была гидросфера со всеми вытекающими последствиями, т.е. с температурой ниже 100°C.

О путях образования первичной атмосферы имеется ряд гипотез, которые можно сгруппировать по возможным ведущим процессам. По первой группе гипотез, «летучие», как условно называют сумму воды и газов, поступили с космической пылью. Эти субмикронные частицы твердого материала с оболочкой из льда и клатратов газов выделяются в поверхностный слой планеты при ее аккреции. Согласно второй группе гипотез, летучие образовались при ударной дегазации крупных тел во время их соударения. Для этого и для удержания газовой оболочки летучих планета должна была достигать более 90% своей современной массы. В третьей группе гипотез формирование оболочки летучих приписывается процессам дифференциации на ядро и мантию, продолжаю-

щейся и сейчас в виде вулканических эксгаляций. Наконец, по последней группе гипотез, водная оболочка Земли возникла в результате захвата кометного тела. Наиболее предпочтительна гипотеза космического «грязного льда» — ударная дегазация с продолжающейся и сейчас дегазацией при дифференциации планеты на ядро и мантию. Для биолога стартовой точкой служат возникновение географической оболочки и вероятный состав гидросферы и атмосферы. Все, что было до того, к истории биосферы не относится.

Следующий вопрос — происхождение жизни на Земле. Существует молчаливое согласие, что первыми обитателями географической оболочки, создавшими биосферу, были бактерии. Соотношение существующих гипотез можно схематизировать: а) возникновение жизни на Земле; б) возникновение жизни на ином космическом теле; в) транспорт и адаптация к земным условиям (панспермия). Два последних варианта относятся к астробиологии. Происхождение жизни на ином космическом теле и ее перенос не решает проблемы ее возникновения, но вносит большое разнообразие возможных условий. Существенно, что о биосфере можно говорить лишь после появления первых организмов (рис.1). «Предбиосфера» без организмов фальсифицирует само понятие. Появление микроорганизмов на Земле есть датированный экспериментальный факт, после которого можно обсуждать эволюцию биосферы [5, 6].

Элемент биоты — организм, его разделение на части приводит к потере свойств живого тела. Простейший организм — бактериальную прокариотную клетку — можно представить как внутреннюю (центростремительную) сферу «домашнего хозяйства» и внешнюю (центробежную) сферу контакта со средой обитания. Внутренняя действует в соответствии с центральной догмой: ДНК →

* Результаты сведены в GenBank (<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/rdp.cmc.msu.edu>) и Ribosomal Database Project (RDP, <http://rdp.cmc.msu.edu>).

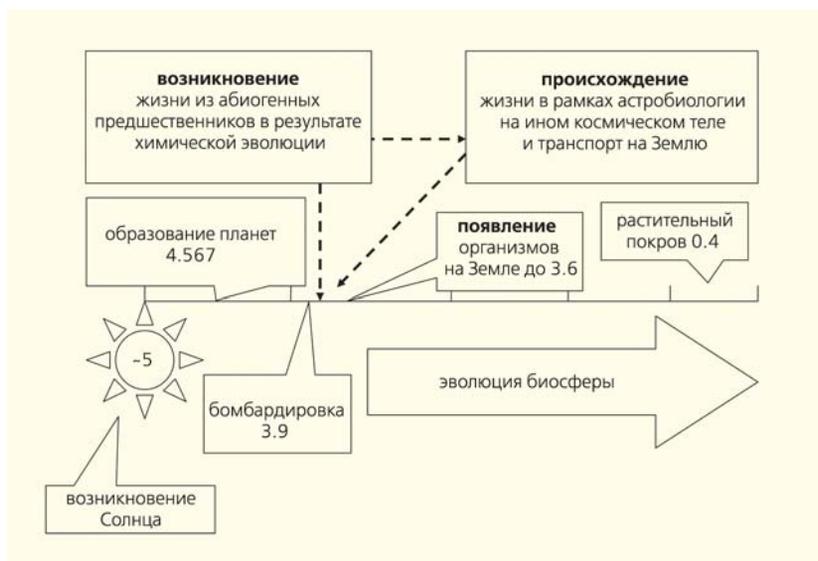


Рис.1. Происхождение биосферы (млрд лет). Земля образовалась примерно 4.5 млрд лет назад (видимо, как и другие планеты). Говорить об эволюции биосферы можно лишь после появления первых организмов.

→ РНК → белок. Для внешней важны энзиматические белки, обеспечивающие поступление во внутреннюю сферу энергии и предшественников конструктивных компонентов (рис.2). Система самовоспроизведения универсальна для всех клеток, но различается в деталях. Набор ферментов, обеспечивающих жизнедеятельность за счет взаимодействия со средой, представляет спектр функционального биоразнообразия микроб-

ного мира. Существование живого организма определяется его взаимодействием со средой обитания согласно термодинамике. Попытки рассматривать организм вне взаимодействия со средой обитания, как изолированную систему, представляют ошибочное упрощение.

Филогенетическая систематика, созданная Вузом и Фоксом в 1977 г., основана на реконструкции последовательного происхождения организмов по гену

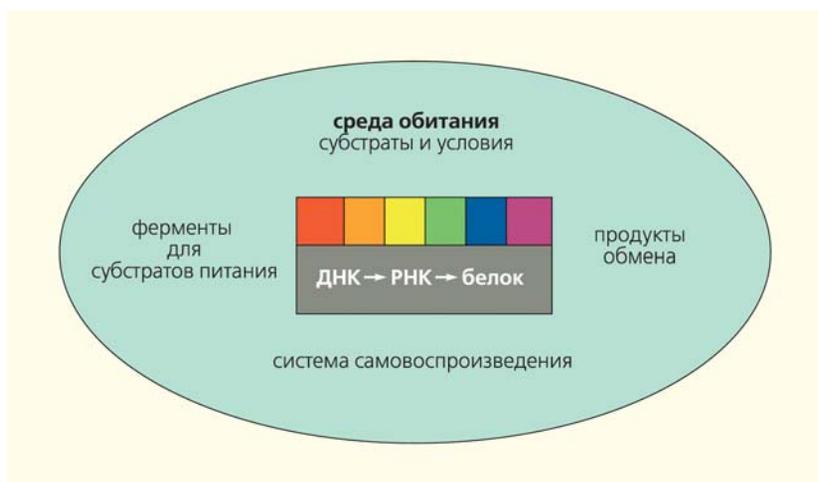


Рис.2. Схема устройства бактериальной клетки: внутренняя сфера «домашнего хозяйства» и внешняя сфера контакта со средой.

малой рРНК. В этой системе вместо пяти царств — животных, растений, протист, грибов и монер (бактерий) — выделено три домена: бактерий, архей, эукариот. Крупные таксоны (фили, классы, порядки, вплоть до рода) в этой системе определяются *количественно* процентом сходства в одном гене рРНК. Новая таксономическая система показывает, что на высших уровнях в разнообразии биоты доминируют микробные таксоны. По «молекулярным часам» (средней скорости мутаций в этом гене) можно вычислять время происхождения таксона. Однако прямого перехода от филогении к эволюции нет. Сейчас уже признано, что скорость эволюции в разных ветвях различна и «молекулярные часы» показывают биологическое время. Кроме того, упорядочение разнообразия по одному гену не несет достаточной информации о системе, поскольку исключает метаболизм [7]. Из-за латерального переноса генов филогении отдельных генов плохо согласуются между собой, причем несогласование больше для генов, взаимодействующих с внешней средой, а филогении генов «домашнего хозяйства» имеют лучшее соответствие. Поэтому навязывание филогении по одному гену вызывает сильный скепсис. С другой стороны, сходство генов внутреннего направления поддерживает идею об общем предке с 500—600 сердцевинными генами [8].

В организме различают core genes, или сердцевинные гены, условно обозначаемые как «гены домашнего хозяйства», которые универсальны и минимально участвуют во взаимодействии со средой обитания. Поэтому в биосферной микробиологии о них можно было бы и не думать. Обычное сравнение: вы хотите приобрести автомобиль, а вам вручают комплект технической документации; перевозки с ней не организуешь. Как выйти из этого противоречия, поскольку основной источник

знаний в современной микробиологии — генетическая информация о микроорганизмах из среды обитания? Она делится на два сорта: о филогенетическом (таксономическом) положении и о функциональных генах. В ДНК содержится информация о всех генах. Трудность в том, чтобы определить, какая информация реализуется в данных условиях в данное время.

Организм в единстве со средой обитания образует элементарную экосистему. Ее простейшая модель — чистая культура микроорганизма в пробирке. Вне экосистемы организм не способен к жизнедеятельности. Экосистема подчиняется правилам термодинамики: в ней происходит перераспределение энтропии между средой и организмом. Организм получает энергию из среды, а среда переходит на более низкий уровень. Регенерация среды осуществляется за счет притока энергии извне, в общем случае солнечной, которая трансформируется в энергию химических окислительно-восстановительных реакций с переносом электрона (протона). Бактериальная клетка — это простейшая, элементарная, система и простейший организм, который обладает автономным самовоспроизведением.

Часть экосистемы, в которой развивается вид микроорганизмов, называется его экологической нишей, с особенностями которой согласуются функциональные характеристики микроорганизма. Экологическая ниша для микроорганизмов — это открытая химическая система с притоком питательных веществ и стоком продуктов обмена. Функциональная систематика микроорганизмов, выработанная при осознании их роли в природе после работ Пастера, основана на ключевых реакциях энергетического обмена. Традиционная систематика групп микроорганизмов исходит из идеи, что функциональный род микроорганизмов катализирует

определенные химические реакции, например нитрификацию, окисление соединений серы, образование и окисление метана, гидролиз целлюлозы, разложение азотистых органических веществ с выделением аммиака или ассимиляцию атмосферного азота. Биоразнообразие бактерий описывали по осуществляемым ими функциям как «физиологические группы». Эти представления позволили построить целостную картину биогеохимии планеты, т.е. понятие биосферы.

Функциональные группы микроорганизмов и осуществляемые ими реакции были описаны благодаря изучению чистых культур их типичных представителей. Чистая культура стала ультимативным требованием в микробиологии. Некультивируемые микроорганизмы игнорировали даже при их массовом развитии. Требование чистой культуры связано с именем Коха и оказалось важным ограничением в познании реального мира. Современная микробиология ориентирована на изучение микробной жизни прямыми методами, обходя их культивирование. Молекулярные методы позволили изучать микроорганизмы, не культивируя их, но они не дают знаний о вызываемых ими изменениях

в среде, лежащих в области биогеохимии. Для перехода от организма к экосистеме необходимо знать физиологию организма как целостной системы. Биогеохимия требует представления о скоростях происходящих химических реакций.

Упрощение крайне сложной природной системы достигается благодаря системному анализу. В простейшей форме рассматриваются резервуары и потоки между ними — аналогично задаче о бассейнах. Потоки разделяются на приток и сток. Резервуар — это динамическое понятие, характеризующееся не только массой вещества в нем, но и временем пребывания. Динамические резервуары с малой массой могут поддерживаться благодаря быстрому обороту вещества в них из-за большой реакционной способности. Живая микробная клетка представляет именно такой динамический резервуар. Системный анализ основан на иерархии, в которой последовательно рассматриваются система и ее подсистемы, обозначаемые как компоненты. В свою очередь, компонент, разложение которого нецелесообразно, обозначается как элемент. В природоведческой микробиологии таким элементом служит организм [9].

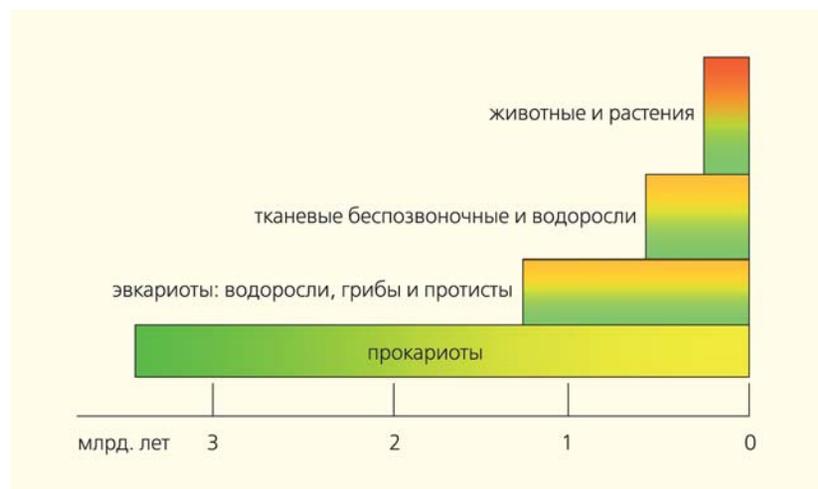


Рис.3. Эволюционная лестница появления организмов на Земле. Она складывается в результате взаимодействия новых, более совершенных, организмов со старыми.

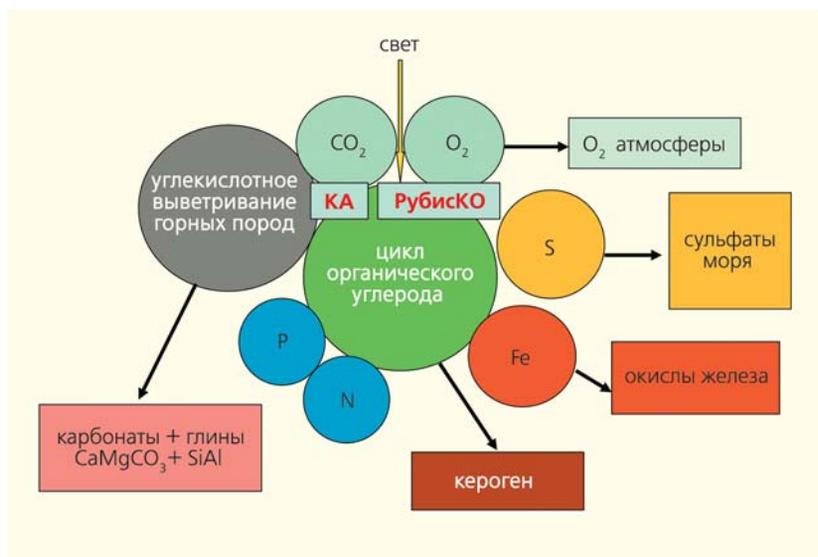


Рис.4. Схема сопряжения биогеохимических циклов. Ведущий — цикл C_{орг} с ассимиляцией CO₂ и органотрофной деструкцией. С ним сопряжены анаболические циклы азота и фосфора и катаболические циклы серы и железа. Химическое выветривание опосредовано участием CO₂. Эта биохимическая машина циклов действует и в планетарном масштабе, и в конкретных экосистемах. КА — фермент карбоангидраза, регулирующий равновесие неорганического углерода. РубисКО — рибулозобифосфаткарбоксилаза, фермент, катализирующий присоединение CO₂ к рибулозо-1,5-бифосфату в цикле Кальвина. Это один из самых распространенных и важнейших ферментов, участвующих в поступлении C_н в биологический круговорот.

В основе биогеохимии лежит представление о биогеохимических циклах (рис.3, 4). Центральное место в них занимает цикл органического углерода (C_{орг}). Его можно рассматривать как количественную химическую меру жизни, включающую потоки и резервуары, динамические и инертные. Цикл состоит из ветви первичной продукции C_{орг} при автотрофной ассимиляции CO₂ и ветви деструкции гетеротрофными организмами. Первичная продукция получается путем фотосинтеза или хемосинтеза. С циклом органического углерода сопряжены циклы серы, азота, железа. Осуществляют их только микроорганизмы, причем в каждом из циклов есть окислительная и восстановительная ветви [3, 10]. Представление о биогеохимических циклах крайне важно для понимания природных явлений. Только циклические динамические системы устойчивы, а функцио-

нальное разнообразие микроорганизмов необходимо и достаточно для их осуществления. Отсюда следует, что микробная система прокариот полноценна и самодостаточна. Она не нуждается в дополнительных внешних факторах биологической природы [11, 12]. Современный цикл включает величину порядка 100 млрд т C_{орг} в год. На уточнение этой цифры затрачены в последние годы очень большие усилия из-за оценки парникового эффекта, главным образом путем моделирования газообмена в биосфере. Более точные обобщенные цифры получены на основе изотопных оценок, которые дают возможность оценить цикл в прошлом.

Замкнутость циклов в отношении потоков веществ обеспечивает устойчивость системы. Если цикл не замкнут, то накопление продуктов переводит систему в иное состояние. Закономерность такой смены в биоло-

гических системах называется сукцессией — последовательностью. Эволюция биосферной системы обусловлена биогеохимической сукцессией. В ней существенную роль играют не только прямые, но и опосредованные реакции. Микробиота участвует в глобальном процессе выветривания — седиментогенеза, определяющем состояние поверхности Земли, ее ландшафтную оболочку.

Поскольку работа циклов требует противоположно направленных реакций, то они могут осуществляться только сообществом разных микроорганизмов, т.е. кооперативной системой из разнокачественных компонентов, объединенных функциональными связями, среди которых первостепенные — пищевые, или трофические, связи. Продукты обмена одних организмов служат субстратами для других, а исходным субстратом — мертвая биомасса (мортмасса) первичных продуцентов. Для микроорганизмов работает правило Виноградского: каждый природный продукт имеет своего специфического микробного деструктора. Трофическая система описывается графом потоков между членами сообщества. В результате граф разложения мортмассы сообществом представляет дерево, сходящееся к корню — исходным минеральным веществам CO₂, NH₃, PO₄³⁻, появляющимся в среде обитания. Напротив, при первичной продукции все эти простые вещества поступают внутрь клетки, и весь набор составных частей клетки синтезируется внутри нее за счет поступающей извне энергии, наиболее наглядно, — солнечной. Таким образом, два дерева — биосинтеза органических веществ биомассы в клетке и разложения мортмассы в сообществе — стыкуются своими корнями, замыкая цикл. Пути метаболизма в клетке и метаболизма в сообществе аналогичны, но не идентичны.

Аддитивная эволюция микробиоты основана на том, что

для своего существования новый возникший вид организмов должен быть согласован с уже имеющейся системой, в более узком смысле — сообществом, в которое он входит. Значит, сохранение старого сообщества — необходимое условие для существования своих новых компонентов. Отсюда вместо традиционного представления о конкурентном вытеснении новыми, «более совершенными», организмами старых обязательным становится их взаимодействие и вписывание нового в имеющуюся систему [13]. Поэтому существующее разнообразие организмов отражает эволюционную лестницу без исключения главных представителей старых, более примитивных, групп (рис.5). В недавнем прошлом для обоснования идеологических конструкций требовалось революционное отрицание прошлого: «Старый мир разрушим до основания, а затем мы наш, мы новый мир построим. Кто был ничем, тот станет всем!» В действительности происходит дополнение предыдущего с включением нового в старый мир и проникновение старого в новое.

Новый компонент ведет себя как вид-вселенец в существующую экосистему. Однако на следующем этапе компоненты старой системы используют пришельца как свою среду обитания — как в прямом смысле, так и опосредованно, через использование его продуктов. Например, развитие многоклеточных водорослей создает новый источник мортмассы, развитие сосудистых растений — новую среду обитания для мицелиальных грибов; животные представляют собой движущиеся ферментеры для микробиоты пищеварительного тракта. Значит, сохранение старого есть условие эволюционного развития. Это и наблюдается в эволюции биосферной системы, где сосуществуют организмы самого различного филогенетического уровня.

Биосфера вложена в географическую оболочку, но их совместное развитие привело к частому смешению этих понятий. Основные этапы эволюции биосферы включают последовательно: формирование географической оболочки с первичными гидросферой и атмосферой, трансформацию атмосферы биотой с заменой эндогенной CO_2 на O_2 ; исчерпание закисного железа в географической оболочке; развитие серного цикла в океане; формирование внутриклеточной скелетной функции в кембрии, образование субаэрального растительного покрова в девоне (рис.5).

Географическая оболочка включает в качестве поверхности раздела рельеф, покрытый в субаэральных условиях *почвой*, а в субаквальных — *илом*. Первую изучает биология почв, вторую — гидробиология. Находящаяся на границе фаз (в общем случае твердой и жидкой) *биопленка* создает «нанорельеф», в характерном случае представленный кочкой. Масштабирование процесса в течение времени приводит к формированию рифов в океане, карбонатных платформ, органогенному рельефу на суше.

В рельефе следует различать коренной, определяемый состоянием коры, и изменяющийся с характерным временем ~200 млн лет. Это объект геологии. Строем земной коры в планетарном масштабе включает три основных слоя на континентах: базальтовую кору на магматическом основании толщиной 5—10 км; континентальную гранитную кору (в среднем 40 км); покров осадочных пород (от 0 до 25 км). Океаническая кора лишена гранитного слоя и составляет 5—10 км, со слоем осадков в сотни метров, лежащем на подущечных базальтовых лавах, где, как утверждается, обитает микробиота, видимо, используя эндогенный приток субстратов питания.

На коренных породах лежит верхний слой рельефа, изме-

ненного экзогенными факторами. Именно он есть основноеместилище биосферы. Осадочные породы (это нижний слой географической оболочки планеты с прорывами в нее гранитной и/или базальтовой кор) образовались в результате серии выветривания — седиментогенез. В этих процессах значительная роль принадлежит биоте живой пленки, покрывающей твердые поверхности.

Физическое выветривание определяется климатическими факторами, в первую очередь — воздействием воды. Измельченные физическим выветриванием породы перемещаются под действием силы тяжести вниз по склону. Эти процессы дают основу для формирования отложений в ходе физического этапа седиментогенеза. При перетолжении материала его тонкие фракции перемещаются на большее расстояние. Участие биоты, формирующей бронирующий слой дерна в физическом выветривании, второстепенно. Микробный «дерн» (маты) действует на низшем, «наноуровне».

Химическое выветривание основано на взаимодействии вода—порода. Его можно представить как обменную реакцию минералов коренной породы с H^+ -ионом. В результате протонирования на поверхности выщелачиваемого минерала создаются щелочные условия. Основным источником H^+ -ионов служит гидролиз CO_2 , ведущий к углекислотному выветриванию: в результате разрушается исходная кристаллическая решетка, катионы и некоторые анионы в определенном порядке переходят в раствор. Остающиеся алюмосиликаты перестраиваются в устойчивые глинистые минералы как конечные продукты выветривания и SiO_2 . Катионы раствора нейтрализуются бикарбонат-ионом. Бикарбонаты при разложении и выделении CO_2 образуют нерастворимые карбонаты, прежде всего кальция. Существенная роль в химическом выветривании

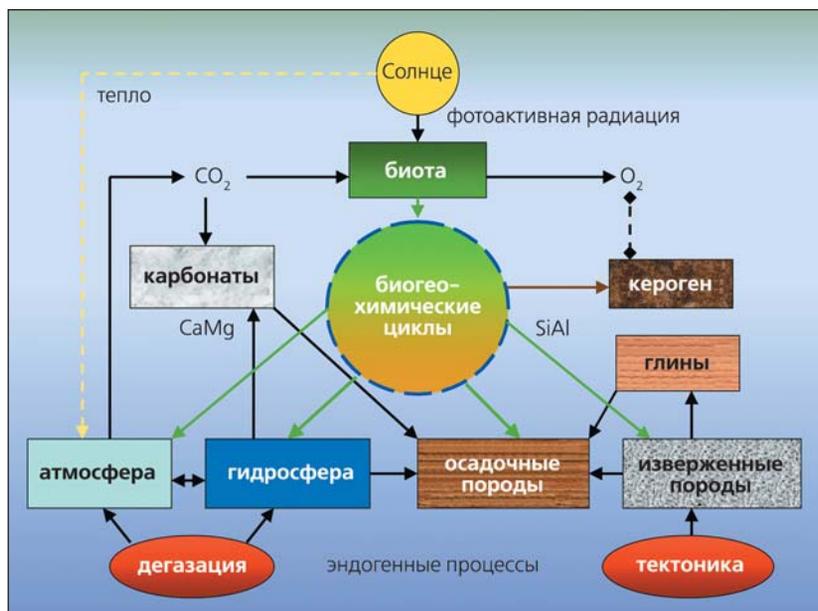


Рис.5. Система связей в географической оболочке, вмещающей биосферу. Микробиота влияет на географическую оболочку через биогеохимические циклы.

принадлежит микробиоте как поставщику H^+ -ионов. Они образуются при разложении органического вещества с локальным повышением кислотности и концентрации CO_2 в почвенном воздухе. Химическое выветривание в аноксической обстановке отличается от выветривания в присутствии O_2 поведением переходных металлов, прежде всего Fe — как типоморфного элемента. В отсутствие O_2 образуются сероцветные осадки с Fe(II), а в присутствии кислорода железо окисляется с образованием красноцветных осадков с Fe(III). Это вторая особенность опосредованного влияния биоты на выветривание.

В седиментогенезе ранние этапы трансформации осадков в диагенезе происходят с участием микробиоты. Очевидную роль в диагенезе играет цикл серы с образованием нерастворимых сульфидов при прямом воздействии специфической микробиоты. Менее ясна, но значительно по масштабу роль микробиоты при стабилизации карбонатов с циклом кальция как ведущим процессом [14]. Опосредованная роль микробиоты

в седиментогенезе связана с ее неспецифическим функционированием как возобновляемой поверхности для реакций сорбции. Другой неспецифический процесс — это образование слоя органических коллоидов слизи микробиоты, обволакивающей минеральные частицы, со всем набором явлений коллоидной химии. Осадочный слой можно считать коренным веществом, прошедшим трансформацию микробиотой.

В преобразовании состояния вещества следует различать три этапа: раствор, аморфные коллоиды, кристаллы. Для перехода между ними важное значение имеет гетерогенный катализ, определяемый реакцией на поверхности. Вследствие своей численности, размеров, соотношения поверхность/объем бактериальные клетки (живые и мертвые) служат центром гетерогенного катализа превращений между состояниями. В этом случае их роль опосредована. Однако поверхность клетки несет как электростатический заряд, так и специфические химические группы для избирательного связывания. Химическое

взаимодействие продолжается и после отмирания клетки, и в этом отношении различие между иловыми частицами органического вещества и клетками составляет ряд переходов.

Участие микробиоты в формировании осадочных отложений связано с взаимодействием бактериальной клетки (как частицы органического вещества) с высокодисперсными минеральными веществами (в диапазоне коллоидов и мелких кристаллов субмикронного размера). Такое взаимодействие в первую очередь определяется электростатическими силами, обусловленными зарядом на поверхности клетки и коллоидных мицеллах. Живые клетки способны избежать погружения в минеральный саркофаг, а мертвые сорбируют коллоиды. Наиболее важно взаимодействие с типоморфными компонентами, в первую очередь с железом, алюминием, глинистыми минералами. Первые два образуют аморфные гидроокислы. Взаимодействие с железом связано с окислительно-восстановительным переходом Fe^{2+}/Fe^{3+} , используемым бактериями либо как донор, либо как акцептор электрона в биогенном цикле железа. Возможна и неспецифическая сорбция гидроокислов на внеклеточных структурах. Гидроокислы алюминия сорбируются на частицах, в том числе и на клетках. На этом основана очистка воды сернокислым алюминием, который в воде образует коллоидную гидроокись алюминия, обволакивающую клетки. В отстойнике алюминий с клетками оседает, осадок собирают и растворяют в серной кислоте для повторного использования. Аналогично сорбируются глинистые минералы на клетках бактерий. Коагуляция коллоидов при изменении ионной силы раствора и нейтрализации отрицательного заряда происходит в устьях рек. При их выносе в море формируются осадочные отложения в эстуариях, конусах выноса в так на-

зывается маргинальным фильтре — особом роде геохимического барьера. Менее отчетливы описанные закономерности для кальция и кремния, хотя роль бактерий как центров концентрации карбонатов и опала наглядно иллюстрируется во втором случае образованием кремнистых микрофоссилий.

Один из факторов мозаичности географической оболочки — почва. Она, в отличие от коры выветривания, есть биогенное образование с устойчивым органическим веществом, гумусом, на поверхности минеральных частиц. Почва — это трансформируемая биотой самоподдерживающаяся мощная (порядка 1 м) пленка на поверхности рельефа с интенсивным развитием биохимических процессов. В биосферном масштабе ее можно рассматривать в терминах гетерогенного катализа как каталитическую поверхность.

Принципиальная проблема перехода от бактериальной биосферы к миру многоклеточных — транспорт внутри организма. Для бактерий вследствие их размеров важна молекулярная диффузия через погранич-

ный слой, лишенный турбулентности. Если оставить транспорт внутри более крупной эукариотной клетки, решаемый ее компартиментализацией, то впервые транспорт на значительное расстояние осуществляют осмотронные мицелиальные организмы — грибы. Они формируют наземную микосферу, которая просуществовала со времени образования кислородной атмосферы (около 2 млрд лет) и вплоть до появления наземных сосудистых растений с полным развитием транспортной системы (в конце силура — девоне). Наличие восходящего транспорта у растений знаменует выход в аэротоп — воздушное пространство от поверхности грунта вплоть до вершин стеблей. В микосфере выход в аэротоп решают симбиотические ксерофитные лишайники с внешним транспортом влаги.

В биогеохимии центральное место принадлежит микроорганизмам — они формируют и поддерживают геохимический барьер с резким градиентом физико-химических условий при переходе от одной среды к другой. Понятие геохимического барьера не равнозначно поня-

тию экотона, которым пользуются за рубежом для обозначения переходной зоны между ландшафтами. Экотон популярен у ботаников: так определяют, например, опушку леса. Микробиологи понятием геохимического барьера широко пользуются, употребляя термины «хемоклин», «оксиклин» и т.д. в озероведении, упуская при этом значение транспортных процессов для формирования динамического барьера: без постоянного физического притока, хотя бы за счет диффузии, барьер не образуется. А без бактерий он становится размытым, как при смешении двух инертных веществ, из-за меньшей скорости термодинамически вероятных реакций. С другой стороны, биогеохимический барьер разрушается избыточным транспортом при турбулентном переносе вещества.

Таким образом, микроорганизмы есть необходимое и достаточное условие для формирования и для поддержания существования биосферы [15]. Все остальные существа, возникшие в результате усложнения, суть лишь дополнение к микробной биосфере. ■

Литература

1. Заварзин Г.А. Становление биосферы // Микробиология. 1997. Т.66. №6. С.725—734.
2. Whitman W.B., Coleman D.C., Wiebe W.Y. Prokaryotes: the unseen majority // PNAS on line. 1998. V.95. №12. P.6578—6583.
3. Zavarzin G.A. Diversity of cyanobacterial mats // Fossil and recent biofilms. A natural history of life on Earth / Eds W.E.Krumbein, D.M.Paterson, G.A.Zavarzin. Dordrecht, 2003. P141—150.
4. Schidlowski M. Search for morphological and biogeochemical vestiges of fossil life in extraterrestrial settings: Utility of terrestrial evidence // Astrobiology: The quest for the conditions of life. В. Heidelberg, 2002. P.373—386.
5. Заварзин Г.А. Становление биосферы: Доклад на Президиуме РАН // Вестник РАН. 2001 Т.71. №11. С.988—1001.
6. Zavarzin G.A. Microbial biosphere // Paleontological Journal. 2006. V.40. Suppl.4. P.S425—S433.
7. Doolittle W.F. Lateral genomics // Trends Cell Biol. 1999 V.9. №12. P.M5—8.
8. Koonin E.V. Horizontal gene transfer: the path to maturity // Mol. Microbiol. 2003. V.50. №3. P.725—727.
9. Заварзин Г.А. Лекции по природоведческой микробиологии. М., 2004.
10. Zavarzin G.A. Microbial cycles // Global ecology. Encyclopedia of Ecology. V.3 / Eds S.E.Jorgensen, B.D.Fath. 2010. P.2328—2335.
11. Zavarzin G.A. Recent Microbiology and Precambrian Paleontology // Perspectives in Astrobiology. NATO Sci.Series / Eds R.B.Hoover, A.Yu.Rozanov, R.Paepe. Amsterdam, 2005. P.201—216.
12. Заварзин Г.А. Прокариотная биосфера // Вестн. Моск. Ун-та. Сер.16. Биология. 2007. №4. С.3—15.
13. Заварзин Г.А. Недарвиновская область эволюции // Вестник РАН. 2000. Т.70. №5. С.403—411.
14. Заварзин Г.А. Микробный геохимический цикл кальция // Микробиология. 2002. Т.71. №1. С.5—22.
15. Заварзин Г.А. Эволюция прокариотной биосферы: микробы в круговороте жизни. 120 лет спустя. Чтения им.С.Н.Виноградского. М., 2011.

ЛАУРЕАТЫ НОБЕЛЕВСКОЙ ПРЕМИИ 2011 ГОДА

По физике — С.Перлматтер, Б.Шмидт и А.Райсс

Лауреатами Нобелевской премии по физике стали в 2011 г. астрономы-наблюдатели Сол Перлматтер, Брайан Шмидт и Адам Райсс. Премия присуждена «за открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения далеких сверхновых звезд». Это открытие, сделанное в 1998—1999 гг., признается сейчас (почти единодушно) одним из крупнейших за всю историю физики и астрономии, считая от Галилея и Ньютона. Подобно ряду других замечательных достижений физической науки XX в., оно стало подтверждением фундаментальных научных идей Эйнштейна.

Сол Перлматтер (Saul Perlmutter) родился в 1959 г. в Шампейн-Эрбана (штат Иллинойс, США). В 1981 г. окончил Гарвардский университет, в 1986 г. защитил диссертацию в Калифорнийском университете в Беркли. Дальнейшая научная деятельность профессора Перлматтера вплоть до сегодняшнего дня связана с Калифорнийским университетом в Беркли и входящей в его структуру (и расположенной здесь же) Национальной лабораторией им. Э.Лоуренса. Он руководитель международного научного проекта Supernova Cosmology Project, нацеленного на изучение Вселенной с помощью наблюдений сверхновых звезд определенного типа (Ia) на больших космологических расстояниях.

Австралиец, имеющий и американское гражданство, Брайан Шмидт (Brian P.Schmidt) родился

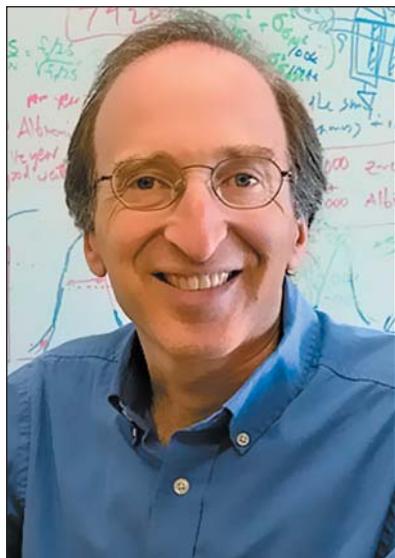
в 1967 г. в США, в Мизуле (штат Монтана). Вскоре семья переехала на Аляску. Там, в Анкоридже, Брайан в 1985 г. окончил школу; затем он поступил в Аризонский университет. В 1989 г. получил диплом, а спустя четыре года защитил диссертацию в Гарвардском университете. В 1993—1994 гг. молодой ученый работал в Гарвард-Смитсоновском центре астрофизики, а в 1995 г. уехал в Австралию, в обсерваторию Маунт-Стромло близ Канберры, где работает и сегодня. Шмидт — профессор Австралийского национального университета и руководитель международного космологического проекта High-z Supernova Search Team по обнаружению и изучению далеких сверхновых звезд типа Ia.

Американец Адам Райсс (Adam G.Riess), самый активный участник группы Шмидта, родился в 1969 г. в Вашингтоне (округ Колумбия). Окончил Массачусеттский технологический институт в 1992 г., в 1996 г. защитил диссертацию в Гарвардском университете. После этого работал в Калифорнийском университете в Беркли, а в 1999 г. продолжил астрономические наблюдения в Научном институте космического телескопа при университете им.Дж.Хопкинса в Балтиморе (штат Мэриленд). Профессор Райсс работает там и сегодня.

Два названных выше научных проекта осуществлялись независимо друг от друга на протяжении доброго десятка лет и были нацелены на изучение физических свойств Вселенной, расма-

триваемой в глобальных пространственных масштабах. Самое важное из этих свойств — космологическое расширение. Оно проявляется себя в наблюдаемых движениях далеких галактик: все они удаляются от нас, так что расстояния до галактик (и между самими галактиками) все время увеличиваются. Характерное время, за которое расстояния заметно (скажем, вдвое) возрастают, составляет миллиарды лет. Самые далекие галактики видны на расстояниях в несколько гигапарсек; они имеют скорости, которые лишь в два-три раза уступают скорости света. Эти «истинно космологические» расстояния и скорости стали доступными для измерений только в последние 15—17 лет, когда в распоряжении астрономов-наблюдателей оказались самые мощные телескопы, включая космический телескоп «Хаббл», и новейшие, исключительно эффективные, светоприемники — матрицы с зарядовой связью, а также быстродействующая вычислительная техника. Тогда же впервые появилась возможность измерять не только расстояния и скорости галактик, но и испытываемое ими ускорение. Ускорение, если его найти в наблюдениях, может указать нам на силу, которая управляет движением разбегающихся галактик. Эта задача и была решена в 1998—1999 гг. нынешними нобелевскими лауреатами и их коллегами по научным проектам.

Вопрос о силе, что движет мирами, был поставлен еще Ньютоном 300 с лишним лет на-



Сол Перлматтер



Брайан Шмидт



Адам Райсс

зад. Открыв всемирное тяготение, он тем самым нашел и ответ на него. Следующий шаг был сделан Эйнштейном. В 1915 г. он опубликовал общую теорию относительности, а в 1917 г. дополнил и развил ее, положив тем самым начало современной теории пространства, времени и тяготения. Спустя всего несколько лет, в 1922 г., петербургский математик А.А.Фридман (тогда уже автор концепции расширяющейся Вселенной) счел возможным написать: «Теория Эйнштейна в своих общих чертах блестяще выдержала экспериментальное испытание, не только объяснив многое, казавшееся необъяснимым, но и предсказав по примеру классических теорий ряд новых явлений». Среди предсказаний Эйнштейна одно — самое удивительное из всех — оставалось к концу XX в. не проверенным ни в физическом эксперименте, ни в астрономических наблюдениях. Это была идея всемирного антитяготения. В работе 1917 г. Эйнштейн выдвинул и точно сформулировал представление о том, что наряду с ньютоновым всемирным тяготением в природе существует и универсальное отталкивание, всемирное антитяготение.

Заметим, что слова «антитяготение» и «антигравитация» нередко использовали и до сих пор продолжают использовать по большей части в научно-фантастической, а не научной литературе, не говоря уже о разнообразных псевдонаучных и вовсе антинаучных писаниях и высказываниях. Этими терминами сам Эйнштейн, насколько известно, не пользовался. Он предпочитал говорить о предсказанном им феномене несколько формально, ссылаясь на произведенную им в 1917 г. «модификацию» уравнений общей теории относительности, которая состояла в том, что в эти уравнения была добавлена постоянная величина, получившая впоследствии название космологической константы.

Мы можем лишь гадать, как у Эйнштейна возникло представление о всемирном антитяготении и почему он решил описать его с помощью космологической константы. Для этой идеи определенно не было никаких эмпирических оснований. Ничто из того, что в те времена было достоверно известно о большом мире, в котором мы живем, не давало на этот счет никаких намеков или наводящих соображений. Судя по все-

му, в своих космологических размышлениях Эйнштейн руководствовался некоторыми общими мировоззренческими установками. В те годы он видел Вселенную как единую физическую систему, у которой не было «начала» и не будет «конца». Его привлекала идея неизменной, неподвижной, статической Вселенной, которая не предполагала никакого «акта Божественного творения», а существовала вечно в одном и том же состоянии. Но как представить себе Вселенную неизменной и неподвижной, если со времен Ньютона известно, что все тела природы притягиваются друг к другу? Чтобы нейтрализовать всемирное тяготение, Эйнштейну пришлось ввести в общую теорию относительности новую мировую силу — силу всеобщего отталкивания. Отталкивание представлено и описано в этой теории уже упомянутой космологической константой — таков ее смысл и предназначение у Эйнштейна. При наличии антитяготения уравнения общей теории относительности действительно допускали статическое космологическое решение. И Эйнштейн построил на этой основе свою первую физико-математическую модель Вселенной.

Вскоре, однако, выяснилось, что неподвижная, вечная и неизменная Вселенная Эйнштейна неустойчива — стоит ее слегка «подтолкнуть», и она начнет сжиматься или расширяться как целое. Общая теория относительности (даже модифицированная) не допускает, как оказывается, устойчивого покоя в масштабе всей Вселенной. Это неожиданное для Эйнштейна обстоятельство немало его озадачило и разочаровало: зачем тогда было придумывать всеобщее отталкивание?...

Но, раз высказанная, идея космического антитяготения начала уже самостоятельную жизнь в науке, не зависящую от воли ее автора. На смену статической, но неустойчивой модели Эйнштейна пришла модель нестатической расширяющейся Вселенной, предложенная Фридманом в 1922—1924 гг. Новая модель учитывала как ньютоново тяготение, так и эйнштейновское антитяготение. Она описывала Вселенную, в которой космические тела удаляются друг от друга, испытывая, вообще говоря, как их собственное притяжение друг к другу, так и взаимное отталкивание, обязанное космическому антитяготению. Космологическое расширение, понимаемое как всеобщее разбегание тел природы, имело свое начало: Вселенная возникла и все ее тела получили начальные скорости разлета примерно 10 млрд лет назад, согласно приближенной (по порядку величины) оценке Фридмана. Его нисколько не смущало то обстоятельство, что его Вселенная не существовала вечно, а родилась в какой-то момент в прошлом сама собой или же была создана какими-то внешними по отношению к ней силами. Он не имел ничего против космического «акта творения» и в своей научно-популярной книге упомянул к слову об индийских космогонических мифах. Но он понимал происхождение Вселенной и ее первоначальный «разгон» отнюдь не в духе мифов и религий; Фрид-

ман видел в этом новую принципиальную проблему фундаментальной науки. Так это понимают и теперь, в начале XXI в.; проблема «космологической сингулярности», т.е. экстремального состояния мира в момент его возникновения, до сих пор остается полностью открытой, несмотря на усилия, предпринятые лучшими теоретиками разных стран в течение нескольких десятилетий после Фридмана.

Что же касается космологической константы, то она содержалась в модели Фридмана в качестве эмпирического параметра, подлежащего измерению в астрономических наблюдениях. Ее численное значение заранее не фиксировано. Не исключалось, в частности, что она может быть просто равна нулю; в этом случае никакого космического антитяготения в природе не существует. Если же космологическая константа отлична от нуля, она может быть в принципе и положительной, и отрицательной по величине. При отрицательной константе антитяготение не возникает, но появляется дополнительное тяготение, которое, однако, не описывается законом Ньютона. Антитяготение возникает только при положительной космологической константе. В этом случае антитяготение может быть и сильнее, и слабее взаимного притяжения населяющих Вселенную тел. Когда преобладает тяготение, разбегание тел происходит с замедлением — тяготение стремится его остановить и обратить расширение в сжатие. Когда же преобладает антитяготение, оно «подгоняет» разбегание галактик, ускоряет его. Чтобы узнать, действительно ли во Вселенной присутствует антитяготение, нужно измерить в наблюдениях испытываемое галактиками ускорение. Если ускорение окажется положительным, это станет прямым наблюдательным указанием в пользу идеи Эйнштейна. Теперь мы знаем, что так оно и оказалось. Измеренное в 1998—1999 гг. ускорение оказалось положитель-

ным, так что эйнштейновское всемирное антитяготение действительно существует в масштабе Вселенной как целого и притом именно в том виде и обличии, как это описано у Эйнштейна с помощью космологической константы.

Этот успех стал возможен, как уже сказано выше, благодаря решительному усовершенствованию астрономических средств наблюдения. Но даже и новейшие инструменты были бы бесполезны, если бы во Вселенной не существовало сверхновых звезд — мощных, хотя и кратковременных, источников света, которые видны и неподалеку от нас, и почти что у самого края наблюдаемой области мира.

Все слышали, вероятно, что звезды «падают», «вспыхивают» и «взрываются». Первое к звездам вообще не относится, а вот вспышки и взрывы как раз для них характерны. Самые мощные вспышки, когда на пустом месте появляется новая звезда, астрономы называли сверхновыми. При этом никакая звезда на самом деле не появляется, а наоборот — гибнет.

В 1938 г. американский астроном Вальтер Бааде обратил внимание на то, что среди всех сверхновых можно выделить такие, которые очень похожи друг на друга по своему поведению. Под поведением астрономы понимают характер изменения блеска со временем — так называемую «кривую блеска». Физическая причина такой «похожести» до сих пор остается предметом исследований. Но сама одинаковость, сходство сверхновых звезд дают астрономам отличную «линейку» для измерения расстояний во Вселенной. Подобно «стандартной свече» из школьного учебника физики, сверхновые данного типа (по современной классификации это тип Ia — читается «один а») можно использовать для определения расстояния до них: чем дальше свеча, тем слабее она выглядит для нас. Правда, при более детальном рассмотрении

оказалось, что сверхновые типа Ia, хотя и похожи друг на друга, но все же не совсем близнецы. Например, в максимуме блеска они могут отличаться друг от друга по блеску почти в два раза. Так что свеча в действительности не вполне стандартна: ошибка в определении расстояния может достигать 40%.

Ситуацию спас в 1977 г. астроном ГАИШ МГУ профессор Юрий Павлович Псковский. Он обратил внимание на то, что более слабые сверхновые типа Ia гаснут быстрее. Таким образом, чем круче кривая падения блеска, тем слабее сверхновая в максимуме ее блеска. Почему так происходит, не очень ясно и до сих пор. Кстати, многие критики работы нобелевских лауреатов часто говорили о том, что, мол, толком не известно, что за физика стоит за сверхновыми типа Ia, непонятно, почему в их поведении наблюдаются те или иные особенности. Однако возражение это не имеет принципиальных оснований. Ведь когда продавец взвешивает килограмм яблок, он не обязан действительно знать молекулярную структуру гирь.

Эффект Псковского особенно ценен тем, что, как правило, астрономы открывают сверхновую позже самой вспышки (ее блеск спадает дольше, чем растет). И тогда для определения мощности сверхновой в максимуме достаточно измерить скорость последующего падения ее блеска. При этом хотелось бы иметь побольше таких кривых блеска, да и чтобы сверхновые были бы подальше — там эффект ускорения легче измерить (как это ни покажется на первый взгляд странным).

Первая группа наблюдателей (ею руководил Шмидт), сообщившая о своих результатах в 1998 г., располагала данными о всего двух десятках сверхновых нужного типа на более или менее подходящих расстояниях,

но уже и этого было достаточно, чтобы заметить искомый эффект. Оказалось, что в среднем убывание видимой яркости с расстоянием происходит быстрее, чем это ожидалось по космологической теории, которая до того считалась стандартной. Другими словами, имело место избыточное потемнение звезды. Но это означало, что космологическое расширение происходит с положительным ускорением. Космическое ускорение направлено в ту же сторону, что и скорости движения галактик, и оно заставляет галактики удаляться от нас все быстрее и быстрее.

Дальнейшие наблюдения группы Шмидта и независимые результаты группы Перлматтера вскоре подтвердили этот вывод. Со временем астрономы смогли дать ясные и убедительные ответы на все вопросы (в том числе и весьма тонкие), которые возникали как у их критиков, так и у их сторонников. В частности, наблюдаемое ослабление мощности сверхновых с расстоянием критики пытались объяснить наличием пыли, количество которой в более далеких и, следовательно, более молодых галактиках могло бы быть выше, чем сейчас. Но здесь на помощь астрономам пришли телескопы-роботы — это позволило в десятки раз увеличить скорость открытия сверхновых звезд. Свой вклад в решение вопроса внесла и сеть российских телескопов-роботов «МАСТЕР», разработанных в ГАИШ МГУ. С помощью этих инструментов астрономы ГАИШ недавно показали*, что если взять только «чистые» сверхновые (они располагаются очень далеко от центра родительских галактик, где никакой пыли не бывает), то окажется, что проблема пыли сни-

мается и ускорение Вселенной необходимо признать!

В итоге в космологической науке сформировалась новая картина мира, согласно которой космологическое расширение происходит с положительным ускорением, и это ускорение создается эйнштейновским всемирным антияготением. Многое в космологии стало теперь на свои места. Получила разрешение, в частности, давно беспокоившая космологов проблема возраста мира. Теория без эйнштейновского антияготения давала для этой величины слишком малое значение, так что Вселенная как целое оказывалась моложе самых старых астрономических объектов, чего, разумеется, не должно быть. Кстати, это обстоятельство справедливо рассматривалось в разные годы как весомый (хотя и косвенный) аргумент в пользу космологической постоянной. В стандартной космологической модели сегодняшнего дня современный возраст мира составляет 13.7 млрд лет, и это снимает все противоречия с возрастом звезд и галактик.

Вместе с тем открытие космологического ускорения ставит перед современным естествознанием новые проблемы невиданной ранее сложности и важности. Главные из них — физическая природа космического антияготения и микроскопическая структура темной энергии как динамического «агента», создающего всеобщее отталкивание во Вселенной. Такова загадка, заданная Эйнштейном фундаментальной физике XXI в.

© **В.М.Липунов,**
А.Д.Чернин,

доктора физико-математических наук
Государственный
астрономический институт
им.П.К.Штернберга
МГУ им.М.В.Ломоносова

* *Pruzhinskaya MV, Gorbousoy ES, Lipunov VM. // Astronomy Letters. 2011. V.37. №10. P.663—669.*

По химии — Д. Шехтман

Нобелевская премия по химии за 2011 г. присуждена израильтянину Д. Шехтману «за открытие квазикристаллов».

Даниэль (Дан) Шехтман (Daniel Shechtman) родился 24 января 1941 г. в Тель-Авиве. Высшее образование получил в Израильском технологическом институте (Технионе). В 25 лет стал бакалавром, в 27 — магистром, а в 31 — доктором наук. Практически сразу после получения докторской степени Шехтман уезжает в США, где занимается изучением сплавов, применяемых в авиации. В 1975 г. он возвращается в Технион, где начинает работу на факультете материаловедения. В 1981 г. Шехтман отправляется в творческий отпуск в Университет Джона Хопкинса (с этим университетом связана деятельность более чем 30 нобелевских лауреатов) и Национальный институт стандартов и технологий — известное в научных кругах заведение. Он занимается изучением быстроохлажденных сплавов алюминия. В то время интересы Шехтмана были связаны с исследованием процессов неравновесной растворимости элементов друг в друге в условиях скоростной закалки расплавов. И вот, изучая быстроохлажденный сплав алюминия и марганца, он обнаружил, что структура сплава не вписывается в классическую схему кристаллической решетки.

Что же необычного в открытии Шехтмана?

Атомы, из которых состоят газы, жидкости и твердые вещества, имеют разную степень упорядоченности. Большинство твердых веществ — это кристаллы. Любой из них представляет собой правильную трехмерную решетку, составленную из атомов или молекул. Именно это упорядоченное трехмерное расположение, характерное для кристаллов, и отличает их от других твердых веществ. У каж-

дой частицы вещества (атома или молекулы), находящегося в кристаллическом состоянии, окружение точно такое же, как и у любой другой частицы того же типа во всем кристалле. Структура кристалла — это пространственное расположение его атомов (или молекул).

В течение долгих столетий геометрия кристаллов казалась таинственной и неразрешимой загадкой. В 1619 г. великий немецкий математик и астроном Иоганн Кеплер обратил внимание на шестерную симметрию снежинок. Он попытался объяснить ее тем, что кристаллы построены из мельчайших одинаковых шариков, теснейшим образом соединенных друг с другом (вокруг центрального шарика можно плотно разместить только шесть таких же). Впоследствии многие великие умы (Роберт Гук, Михаил Ломоносов, Рене Жюст Гаюи, Огюст Браве и др.) приложили немало усилий для раскрытия тайны кристаллов. Итогом этих изысканий было установление важнейшего закона кристаллографической симметрии, согласно которому для кристаллов возможны оси симметрии лишь первого, второго, третьего, четвертого и шестого порядков. Следовательно, на кристаллических фигурах никогда не бывает симметрии пятого порядка, а также осей симметрии выше шестого. Так был найден важнейший закон, проводящий разницу между симметрией кристаллов и симметрией в мире растений и животных (живым организмам свойственна в основном симметрия пятого порядка).

В соответствии с классической кристаллографией одинаковые точки с одним и тем же окружением каждая могут располагаться 14 способами, т.е. образовывать 14 пространственных решеток. Это в 1848 г. доказал французский ученый Браве, его имя и носят кристаллические ре-



Даниэль Шехтман

шетки. Необходимость одинакового атомного окружения для каждого узла решетки налагает ограничения на сам основной элемент структуры кристаллов. При повторении такой элемент (его называют элементарной ячейкой) должен заполнять все пространство, не оставляя пустых узлов. В этом случае применяются понятие трансляционной симметрии. Периодичность и полное заполнение пространства допускают существование в кристаллах только поворотных осей симметрии второго (поворот на $360^\circ/2$), третьего (на $360^\circ/3$), четвертого (на $360^\circ/4$) и шестого (на $360^\circ/6$) порядков. Поворотом вокруг этих осей решетка полностью совмещается сама с собой. Это так называемый ориентационный дальний порядок. Было установлено, что существует лишь 32 варианта расположения объектов вокруг некоторой точки (например, атомов вокруг узла решетки), удовлетворяющих этому требованию. Это так называемые 32 пространственные группы. В сочетании с 14 пространственными решетками они дают 230 возможных вариантов расположения объектов в пространстве, называемых пространственными

группами. Поскольку структура кристалла определяется не только пространственным расположением атомов, но и их типом, число структур очень велико. Наиболее часто информацию о строении кристаллов получают с помощью дифракции рентгеновских лучей или электронов на кристаллической решетке.

Для кристаллов оси пятого порядка и оси порядка выше шестого категорически запрещены. Таковы были каноны традиционной кристаллографии до открытия Шехтмана. Кристаллография считалась устоявшейся наукой, и ничто не предвещало революцию. Открытие Шехтманом в 1982 г. квазикристаллов и первая публикация о них в 1984-м поколебали эти устоявшиеся представления. Интересно отметить, что известна точная дата открытия — 8 апреля 1982 г. В этот день Шехтман исследовал с помощью электронного микроскопа структуру сплавов алюминия с 25% марганца. Они были получены при сверхбыстром охлаждении расплава со скоростью миллион градусов в секунду. Он хотел сравнить фазы, возникающие в этом сплаве при быстрой закалке, со структурой фаз в сплаве алюминия с железом. При исследовании Шехтман обнаружил картины электронной дифракции, которые свидетельствовали о наличии в решетке исследуемого материала поворотной оси симметрии 5-го порядка. Как уже отмечалось, это было невозможно в рамках классической кристаллографии. В тот поздний вечер Шехтман провел ряд электронномикроскопических экспериментов, которые исчерпывающе свидетельствовали о том, что он имеет дело с необычной структурой, а не с комбинацией известных факторов, в сочетании дающих необычную картину дифракции.

Если для простоты рассмотреть двумерную решетку, то осью симметрии пятого порядка обладают правильные пятиугольники. Но они не могут быть элементарными ячейками кри-

сталла, потому что их нельзя подстроить друг к другу без зазоров и, следовательно, такими фигурами плотно упаковать пространство невозможно. Но наличие на картине дифракции электронов резких регулярных максимумов свидетельствовало об упорядоченном расположении атомов в структуре (что характерно для кристаллов). Однако присутствие оси симметрии 5-го порядка противоречило фундаментальным представлениям классической кристаллографии. Следовательно, исследуемое вещество не могло быть кристаллом.

Первые попытки опубликовать полученные результаты окончились неудачей; статьи, как писал Шехтман, «отражались редакцией обратно, как теннисный мяч на корте». Только в 1984 г., т.е. спустя два года после наблюдения, появилась первая публикация*. Статья содержала как экспериментальные факты, так и теорию, их объясняющую. Сначала научный мир принял сообщение в штыки. Достаточно сказать, что один из крупнейших авторитетов в области химии, дважды нобелевский лауреат Лайнус Полинг, бросил в лицо Шехтману: «Не бывает квазикристаллов, а бывают квазиученые».

Как бы то ни было, статья вызвала большой резонанс. Количество публикаций по этой тематике стало расти как снежный ком. Дальнейшие исследования показали, что в подобных материалах наблюдается новый тип порядка — не кристаллический и не аморфный. Такие материалы получили названия квазикристаллических. В настоящее время существуют несколько моделей, описывающих структуру и расположение атомов в таких материалах. Двумерной моделью квазикристаллов служат упаков-

ки («паркет») ромбов с углом при вершине $360^\circ/5 = 72^\circ$, а промежутки заполняются другими ромбами — с углом при вершине $360^\circ/10 = 36^\circ$ (покрытие Пенроуза). Угловая ориентация всех элементов повторяется на всей плоскости, но истинно традиционного дальнего порядка нет. Кстати, подобные мозаичные покрытия использовались в изобразительном искусстве исламских стран. «Квазикристаллические» орнаменты есть в средневековых мечетях Ирана. Европейские математики придумали такое мощение на полтысячелетия позже — в 1976 г., когда Роджер Пенроуз предложил «квазикристаллическое» мощение, получившее название «мозаики Пенроуза», или «покрытия Пенроуза».

Упаковку атомов в трехмерном пространстве можно описать на основе многогранников (икосаэдров), содержащих оси 5-го порядка. Как и правильные пятиугольники, икосаэдры невозможно упаковать на плоскости так, чтобы они плотно, без зазоров, заполнили все пространство, поэтому они не могут служить элементарными ячейками кристаллов. В то же время конструкции именно такого типа объясняют четкие дифракционные картины от квазикристаллов.

Научный мир согласился с Шехтманом только через несколько лет, когда квазикристаллы были получены другими учеными в других сплавах. В настоящее время известно несколько сотен квазикристаллических сплавов, свойства которых активно исследуются. Квазикристаллы часто получают при кристаллизации аморфных сплавов в качестве метастабильных фаз. В то же время в системе Al–Cu–Ni (и других) квазикристаллы могут быть устойчивы вплоть до температуры плавления.

В последние годы появились сообщения об обнаружении природных квазикристаллов, в том числе и в России. В 2009 г. на Корякском нагорье, у р.Ха-

* *Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J.W.* Metallic phase with long-range orientational order and no translational symmetry // *Physical Review Letters*. 1984. V.53. P.1951–1953.

тырки, найден минерал хатыр-кит, в котором обнаружены квазикристаллы, структурой в точности повторяющие образцы, которые ранее получали в лабораториях. Эти естественные квазикристаллы, достигающие в размерах 200 мкм, состоят из атомов железа, меди и алюминия, имеют сложную структуру с несколькими (до шести штук) осями пятого порядка. Редкий минерал до сих пор встречался ученым лишь в одном месте — в триасовых вулканических породах на Корьякском нагорье.

Квазикристаллы в большинстве случаев представляют собой сплавы металлических элементов. Однако физические и химические свойства таких необычных материалов отличаются от характерных свойств металлов. Вот некоторые примеры. Электросопротивление металлов увеличивается при повышении температуры, а квазикристаллов — наоборот, уменьшается. Чем совершеннее структура квазикристаллов, тем выше их электросопротивление, т.е. оно возрастает при уменьшении количества дефектов, что противоречит всему опыту физики металлов. По упругим свойствам квазикристаллы ближе к аморфным сплавам, чем к кристаллам, уступают последним по пластичности и мо-

гут использоваться в качестве упрочняющих добавок в сплавы.

Квазикристаллы обладают высокими антифрикционными свойствами и применяются для создания соответствующих покрытий, сухих пар трения для подшипников скольжения, работающих при повышенных температурах, в качестве добавок в легко прирабатываемые износостойкие резиновые манжеты и армирующего наполнителя для металлических композиционных материалов.

Материалы, содержащие квазикристаллы, перспективны для употребления в качестве антикоррозионных и антиприхватывающих покрытий, ультратонких антифрикционных присадок в масла для двигателей внутреннего сгорания и т.д. В настоящее время зарегистрировано несколько патентов, на рынок «вышли» сковороды с таким покрытием.

Итог любой научной работы — это достижение, совершенное в процессе познания природы. Но особого внимания достойны результаты, способные перевернуть наши представления о природе и материи. Таковыми были теория относительности Эйнштейна, неевклидова геометрия Лобачевского и ряд других. Открытие Шехтманом ква-

зикристаллов имеет принципиальное значение сразу для разных областей знания: физики, химии, биологии, материаловедения, металлургии. Квазикристаллы — вещества и с совершенно необычной структурой, и с уникальными свойствами. А это, помимо большого научного интереса к столь странному объекту, открывает новые направления в создании пока не существующих материалов с требуемым комплексом физико-химических свойств.

Наука о квазикристаллах — истинно междисциплинарная наука. Сейчас в этой области работают многие, но заложил ее основу один человек — Даниэль Шехтман. В настоящее время он профессор факультета технологии материалов в Израильском институте технологий в Хайфе, а также Университета штата Айова (США). В 1996 г. Шехтман был избран членом Израильской академии наук, в 2000 г. — Национальной технической академии США, в 2004 г. — Европейской академии наук. Так что ошибся Полинг: есть и квазикристаллы, и настоящие ученые.

© Аронин А.С.,

доктор физико-математических наук

Институт физики твердого тела РАН

Черноголовка

По физиологии или медицине — Ж.Хоффманн, Б.Бойтлер и Р.Штайнман

Нобелевская премия 2011 г. по физиологии или медицине присуждена за открытия в области иммунологии: Ж.Хоффманну (Франция) и Б.Бойтлеру (США) «за открытия, касающиеся активации врожденного иммунитета» и Р.Штайнману (США) «за открытие дендритных клеток и их роли в активации адаптивного иммунитета».

Этим решением отмечено важнейшее направление имму-

нологии — интереснейшей и актуальнейшей ветви современной биомедицинской науки. Более того, премия (точнее, ее половина) вручена за очень недавние, по меркам Нобелевского комитета, открытия — статьи двух из трех лауреатов вышли в 1996 и 1998 гг. [1, 2]. Возраст лауреатов: Бойтлеру чуть больше 50, Хоффманн только что отпраздновал 70-летие, а Штайнман на 69-м году жизни... умер,

еще до присуждения премии, и в этом трагический подтекст нобелевской саги 2011 г.

Я хорошо знаком с Ж.Хоффманном и Б.Бойтлером, знал и Р.Штайнмана, поэтому позволю себе прокомментировать не только научные достижения лауреатов.

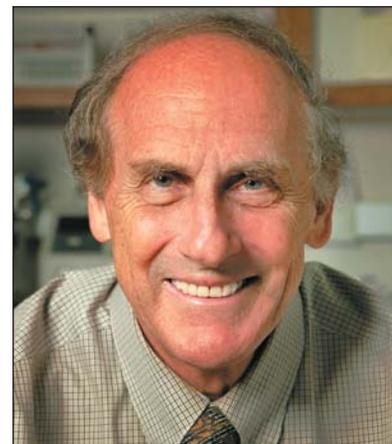
Жюль Альфонс Хоффманн (Jules Hoffmann) родился в 1941 г. в Люксембурге. Отец — профессор энтомологии. Учил-



Жюль Альфонс Хоффманн



Брюс Бойтлер



Ральф Штайнман

ся в Университете Страсбурга, в этом городе провел практически всю свою профессиональную жизнь. С 1964 г. занимался биологией насекомых в Институте системы CNRS, позднее сфокусировался на механизмах врожденной защиты дрозофилы. В начале 90-х годов с Б.Лёметром сделал работу, приведшую к Нобелевской премии. Член французской Академии наук, в 2007—2009 гг. — ее президент, с 2006 г. — иностранный член Российской академии наук, с 2009 г. — США.

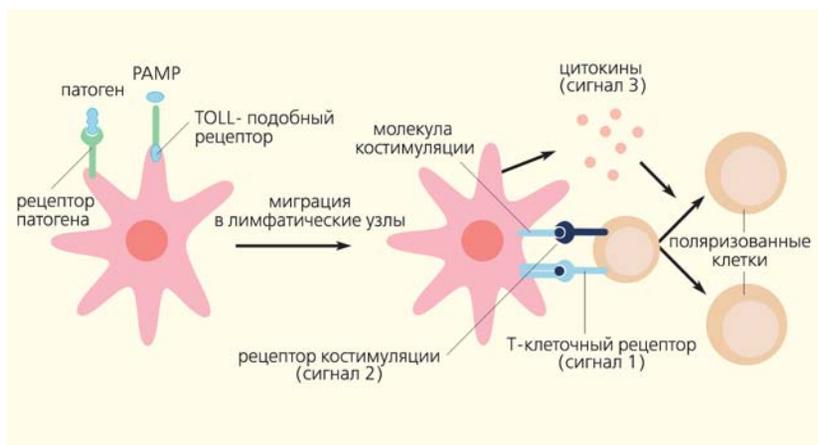
Брюс Бойтлер (Bruce Beutler) родился в 1957 г. в США. Окончил Калифорнийский университет в Сан-Диего, затем — медицинский факультет Чикагского университета. Исследовательскую работу начал в Рокфеллеровском университете (Нью-Йорк), в лаборатории А.Церами, где проклонировал ген фактора некроза опухолей (ФНО) и одним из первых сформулировал идею о терапевтической блокировке ФНО. Генетическую работу, приведшую к Нобелевской премии, развернул в Юго-Западном медицинском центре (Даллас), затем в Институте Скриппса (где работал его отец Е.Бойтлер — крупный ученый в области медицины). В настоящее время Б.Бойтлер связан с обоими этими институтами. Член Академии наук США (с 2009 г.).

Ральф Штайнман (Ralph Steinman) родился в 1943 г. в Монреале (Канада). Окончил Университет Мак-Гилла в Монреале и медицинский факультет Гарвардского университета. Большую часть жизни проработал в Рокфеллеровском университете, где и сделал свои основные открытия. Член Академии наук США с 2001 г., удостоен главной «преднобелевской» награды — премии Альберта Ласкера (2007). Скончался в Нью-Йорке 30 сентября 2011 г., за несколько дней до присуждения Нобелевской премии.

Почти 40 лет назад Штайнман, работая в лаборатории З.Кона (США), открыл в лимфоидных органах мышей новый вид клеток, которым впоследствии предстояло заполнить брешь в клеточной теории иммунитета и «поженить» врожденную и адаптивную ветви иммунной системы [3]. В упрощенном виде современные представления о работе иммунной системы выглядят так: дендритная клетка встречается с патогеном, потенциально опасным для организма, в одной из барьерных тканей (например, в коже), распознает его (как чужого), активизируется, получает способность мигрировать по лимфатическим сосудам в лимфоузел, там встречает Т-лимфоциты — клетки адаптивной ветви иммунитета — и передает им две важнейших «дипе-

ши». Смысл первой — на периферии организма обнаружен потенциально опасный агент, суть второй — агент идентифицирован (вирус, или конкретный вид бактерий, или какой-то паразит). После этого директорат адаптивной части иммунитета не просто посылает в очаг инфекции (вокруг него развивается воспалительная реакция) эффекторные Т-клетки и дает инструкции В-клеткам, но и отвечает пропорционально угрозе — т.е. той комбинацией и концентрацией лимфоцитов, которая оптимальна для иммунного ответа. Слишком сильный иммунный ответ так же плох, как и его отсутствие, — он может даже убить организм!

Что же сделали для развития этой стройной картины активации иммунитета два других лауреата, Хоффманн и Бойтлер? Они в ходе очень разных экспериментов выявили часть молекулярных механизмов того, что происходит на самом первом этапе, когда иммунная система только распознает патоген. Этим я хочу подчеркнуть то обстоятельство, что полная стройная схема базируется на десятках принципиальных открытий, причем некоторые из них — вполне Нобелевского уровня; т.е. премии по иммунологии еще будут. И уже были: за концепцию иммунологического распознавания Т-лимфоцитами Нобелев-



Упрощенная схема активации иммунного ответа. Патоген распознается дендритными клетками (ДК) на периферии через рецепторы врожденного иммунитета (поверхностные или внутриклеточные). В результате ДК начинает экспрессировать на поверхности так называемые коstimуляторные молекулы. Интернализация патогена, кроме того, приводит к его деградации и процессингу белков, с последующей презентацией чужеродных для организма пептидов в комплексе с собственными молекулами МНС (major histocompatibility complex — главный комплекс гистосовместимости). Активированная ДК мигрирует с лимфой в лимфатический узел, где встречает именно ту (случайно образованную!) Т-клетку, которая способна распознать конкретный пептид патогена в комплексе с МНС. Таким образом, Т-лимфоцит получает «сигнал 1». «Сигнал 2» получается от другого рецептора Т-клетки, который распознает коstimуляторную молекулу. Наличие двух сигналов достаточно для пролиферации необходимого клона Т-лимфоцитов. Кроме того, «сигнал 3» в виде цитокинов помогает направить дальнейшую дифференцировку («поляризацию») Т-клеток в оптимальный вид Т-хелперов. Без сигнала 2 активации адаптивного иммунного ответа не происходит. RAMP (pathogen-associated molecular pattern) — термин из теории Джейнуэя.

скую премию 1996 г. получили П.Догерти и Р.Цинкернагель*.

Принципиальным теоретическим вкладом в современные концепции иммунологии следует считать эссе Чарльза Джейнуэя** [4]. Наиболее «чистым» экспериментальным открытием, связанным с премией 2011 г., я считаю элегантную генетическую работу лаборатории Хоффманна в Страсбурге, выполненную на классическом объекте, бесконечно далеком от медицины, — плодовой мушке [1]. Хоффманн и его сотрудники изучали системы врожденной

иммунной защиты дрозофилы, у которой отсутствуют многие клеточно-органные компоненты иммунной системы — в частности, нет тимуса, нет периферических лимфоидных органов, нет лимфоцитов. Иными словами, система адаптивного иммунитета, которым так гордится человечество, у дрозофилы отсутствует как класс. Может, у нее просто нет таких же врагов, как у млекопитающих? Нет, оказалось, что и мухи подвержены вредоносному действию патогенов — бактерий, вирусов, грибов. Поскольку генетика дрозофилы хорошо развита и геном расшифрован, легко представить, что генетическими методами можно определить гены дрозофилы (и их продукты), связанные с системой защиты (предположительно очень примитивной). Так вот, оказалось, что од-

ним из защитных эффекторных механизмов служит продукция довольно коротких пептидов, которые собирательно называют дефензинами (они есть и у нас). Часть таких пептидов, согласно правилам молекулярной биологии, — продукты экспрессии генов, а сами эти гены контролируются сигналами (неизвестными в начале 90-х годов), как-то связанные с распознаванием инфекции. Хоффманн и соавторы нашли мутантных мух, которые избирательно теряли защиту от определенного (не всех!) вида патогенов — грибковых инфекций. Более того, они знали, в каком гене произошла инактивирующая мутация. Ген этот был открыт раньше и назван *toll*, причем ему приписывалась конкретная функция в эмбриогенезе. Продукт гена Toll является трансмембранным клеточным рецептором, который активируется внеклеточным каскадом, очевидно, запускаемым грибковой инфекцией. Был известен и внутриклеточный сигнальный каскад, который мог привести к активации защитных генов у мух (он затрагивал сигнальные киназы и аналог транскрипционного фактора NF- κ B). Интересно, что у дрозофилы имеется около 10 генов, похожих на *toll*, и все они принимают участие в программах эмбрионального развития, причем только один участвует (в дополнение к эмбриогенезу) в молекулярной регуляции защиты от патогенов.

Не прошло и двух лет, как подобные гены были найдены у организмов с адаптивным иммунитетом — человека и мыши. У человека их впервые выделил и частично охарактеризовал наш соотечественник Р.Меджитов, работавший постдоком в лаборатории Джейнуэя в Йельском университете (США), а у мыши — сотрудники лауреата премии этого года Бойтлера, причем первым автором «нобелевской» статьи, опубликованной в последнем номере журнала «Science» в 1998 г., был наш дру-

* Подробнее см.: Апт А.С., Литвинов В.И. Лауреаты Нобелевской премии по физиологии или медицине 1996 г. // Природа. 1997. №1. С.100—102.

** Подробнее см.: Лебедев А.А., Понякина И.Д. Новый этап развития иммунологии // Природа. 2006. №4. С.3—10.

гой соотечественник А.Полторак [2]. В ходе этой работы прямым генетическим подходом (так называемым «позиционным клонированием») у мышей была локализована мутация, делающая их невосприимчивыми к бактериальному полисахариду, ЛПС, — компоненту клеточной стенки грамотрицательных бактерий. Теория Джейнуэя постулировала, что молекулярные активаторы системы врожденного иммунитета как раз и надо искать среди уникальных химических компонентов патогенов. Следует подчеркнуть, что исследования структуры и физиологических эффектов ЛПС проводились во многих лабораториях мира безотносительно теории Джейнуэя. В частности, во Фрайбурге (Германия) по этой проблеме в течение десятков лет работал целый институт.

Так вот, продуктом гена, который «реагировал» на ЛПС, оказался Toll-подобный рецептор, получивший название TLR4. Это был тот же самый ген, который проклонировал Меджитов годом раньше [5], только тогда никто еще не знал, что это — рецептор ЛПС.

Интересно, что и у нас с вами имеется около 10 Toll-подобных рецепторов (и их генов), связанных с распознаванием бактериальных, вирусных, грибковых и паразитарных патогенов. Все они участвуют в регуляции врожденного иммунитета, и ни один (насколько мы знаем сегодня) не связан с программой

развития, как у дрозофилы. Кроме того, у млекопитающих есть еще несколько семейств других рецепторов для распознавания патогенов, которые не имеют отношения к Toll-подобным молекулам.

Не нам учить Нобелевский комитет, кому присуждать премии. Но наивно полагать, что премию автоматически получают все те, кто ее заслуживает. Конечно, надо сделать крупное научное открытие или иметь к такому прямое отношение. Но этого явно недостаточно: в течение многих лет надо проводить хорошо оркестрированную пиар-компанию — как самими потенциальными кандидатами (которые начинают все чаще и чаще навещаться в Стокгольм), так и «группами поддержки», в том числе влиятельными учеными, которых ежегодно просят номинировать на Нобелевские премии.

Джейнуэй умер в 2003 г. Дать эту премию до 2003 г. было бы невозможно по неписаным правилам Нобелевского комитета. Даже за структуру ДНК премию дали только через 10 лет. Штайнман давно заслуживал премии, один или в комбинации с другими учеными (про Занвила Кона, в лаборатории которого было сделано открытие, давно никто не вспоминал — тем более, что тот умер в 1993 г.). Дотянули до того, что и Штайнман умер. Насчет Хоффманна я лично никогда не сомневался, что он должен получить Нобелевскую премию

(конечно, если не будут тянуть с решением еще 20 лет). А вот насчет выбора третьего кандидата мнения научной общественности разошлись (блогосфера бурлит). Многие справедливо считают, что вклад Меджитова в науку о врожденном иммунитете достоин Нобелевской премии не меньше вклада Бойтлера. Другие напоминают, что Руслан сделал эти открытия, будучи постдоком Джейнуэя (как будто Штайнман в 1973 г. не был постдоком Кона). Разумеется, после смерти Джейнуэя Меджитов выполнил блистательные самостоятельные работы в области иммунологии.

Кроме того, Хоффманн, Бойтлер, Меджитов и Ш.Акира (Осака, Япония) были удостоены в последние годы целого букета премий, в том числе тех, которые считаются «преднобелевскими». Получается, что если бы Нобелевский комитет лучше следил за Интернетом, то он не проспал бы смерть Штайнмана (который, повторяю, и 10 лет назад однозначно заслуживал эту премию) — и тогда была бы еще одна вакансия. Но история не любит сослагательного наклонения.

Нобелевская премия 2011 г. по физиологии или медицины запомнится как неоднозначная и к тому же формально нарушившая волю А.Нобеля, знаменитого изобретателя динамита.

© Член-корреспондент РАН

С.А.Недоспасов

МГУ им.М.В.Ломоносова

Литература

1. *Lemaitre B., Nicolas E., Michaut L., Reichhart J.M., Hoffmann J.A.* The dorsoventral regulatory gene cassette *spätzle/Toll/cactus* controls the potent antifungal response in *Drosophila* adults // *Cell*. 1996. V.86. №6. P.973—983. (Эта статья процитирована в мировой литературе 1600 раз.)
2. *Poltorak A., He X., Smirnova I., Liu M.Y., Van Huffel C., Du X., Birdwell D., Alejos E., Silva M., Galanos C., Freudenberg M., Ricciardi-Castagnoli P., Layton B., Beutler B.* Defective LPS signaling in C3H/HeJ and C57BL/10ScCr mice: mutations in *Tlr4* gene // *Science*. 1998. V.282. №5396. P.2085—2088. (Прочитирована 3900 раз.)
3. *Steinman R.M., Cohn Z.A.* Identification of a novel cell type in peripheral lymphoid organs of mice. I. Morphology, quantitation, tissue distribution // *J. Exp. Med.* 1973. №137. P.1142—1162. (Прочитирована 940 раз.)
4. *Janeway C.A.* Approaching the asymptote? Evolution and revolution in immunology. Cold Spring Harb. Symp. // *Quant. Biol.* 1989. V.54. P.1—13. (Прочитирована 1000 раз.)
5. *Medzhitov R., Preston-Hurlburt P., Janeway C.A.* A human homologue of the *Drosophila* Toll protein signals activation of adaptive immunity // *Nature*. 1997. V.388. №6640. P.394—397. (Прочитирована 2300 раз.)



ПРИРОДА.

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
ПОПУЛЯРНЫЙ ЕСТЕСТВЕННО - ИСТОРИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛЪ ДЛЯ САМООБРАЗОВАНІЯ

ПОДЪ РЕДАКЦІЕЙ

проф. В. А. Вагнера и проф. Л. В. Писаржевскаго.

Философія естествознанія. Астрономія. Физика. Химія. Геологія съ палеонтологіей. Минералогія. Общая біологія. Зоологія. Ботаника. Человѣкъ и его мѣсто въ природѣ.

Я Н В А Р Ъ .

МОСКВА.

1912 г.

Последние успехи в физике

И.И.Боргман

Открывая заседания нашего отдела, я считаю своим долгом представить краткий обзор наиболее важных исследований в области физики, произведенных в промежуток времени от первого Менделеевского съезда* до настоящего, но в этом моем обзоре за недостатком времени я не коснусь новых, в высшей степени интересных теоретических работ, вносящих полное изменение в некоторые основные положения нашей науки, я ограничусь лишь приведением исключительно результатов некоторых опытов.

Прежде всего я позволяю себе обратить ваше внимание на те недавно открытые факты, которые, будь жив еще Менделеев, были бы для него особенно ценны. Мы знаем, с каким глубоким интересом относился Дмитрий Иванович к свойствам газов, к идее о молекулах тел и атомах химических элементов. Он умер, когда оставалось еще одно газообразное тело, которое не уступало никакому давлению и упорно сохраняло свое агрегатное состояние. Это тело — гелий. Несмотря ни на какие усилия, не удавалось обратить гелий в жидкость. Однако 10 июля (по новому стилю) 1908 г. стараниями Камерлинга-Оннеса в Лейдене и газ гелий был побежден. При помощи непре-

рывно поддерживаемого кипения жидкого водорода, пары которого снова конденсировались непрерывно кипящим воздухом, Камерлинг-Оннес достиг получения температуры, оказавшейся достаточной для перевода гелия в жидкое состояние. Я не могу не отметить, какими средствами располагает лаборатория маленького города Лейдена маленькой страны Голландии. Для одного лишь опыта Камерлингу-Оннесу потребовалось 75 л жидкого воздуха и 20 л жидкого водорода. В каком из русских университетов можно было бы затратить на один опыт столько денег, сколько нужно для получения таких больших количеств этих жидкостей? Благодаря запасу жидкого водорода Камерлинг-Оннес получил температуру, близкую к температуре абсолютного нуля по шкале лорда Кельвина. Ведь жидкий гелий, находясь под атмосферным давлением, кипит, как оказалось, при температуре в 4.5 градуса абсолютной шкалы. Его критическая температура несколько выше 5° этой шкалы. В недавнее время, пользуясь охлажденным гелием и заставляя кипеть последний под сильно пониженным давлением, Камерлинг-Оннес наблюдал еще более низкую температуру, он достиг температуры в 1.5° абсолютной шкалы. Давно ли это было, когда никому и в голову не приходило, что можно получить такой холод. Весьма любопытно, что жидкий гелий, как заметил это Камерлинг-Оннес, имеет, подобно воде,

* Первый Менделеевский съезд состоялся 20—30 декабря 1907 г. Речь И.И.Боргмана была произнесена при открытии отдела физики Второго Менделеевского съезда 21 декабря 1911 г. — *Примеч. ред.*

наибольшую плотность при некоторой температуре. Температура наибольшей плотности гелия около 2° абс. шкалы. При охлаждении жидкого гелия от 2.37 до 1.48 объем его не уменьшается, а увеличивается. Плотность жидкого гелия при температуре 4.3° равняется 0.122 .

Исследования Камерлинга-Оннеса подтвердили, между прочим, высказанное уже раньше положение, вытекающее как необходимое следствие из электронной теории, что электрическое сопротивление металлов при температурах, близких к абсолютному нулю, чрезвычайно мало. Камерлинг-Оннес нашел, что сопротивление платины, по всей вероятности еще не абсолютно чистой, при температурах от 4° до 1.5° абс. шкалы представляет собой всего только 0.012 сопротивления того же металла при 0°C . Сопротивление ртути при температуре около 3° абс. шкалы более чем в 10 млн раз меньше вычисленного экстраполированием сопротивления этого металла в твердом состоянии при температуре обыкновенного нуля. Сопротивление чистого золота в жидком гелии настолько мало, что не могло быть измерено. Нельзя не признать важности работ Камерлинга-Оннеса.

Заметим еще, что в последние четыре года вполне подтвердилось и выяснилось образование этого удивительного элемента гелия из еще более любопытного элемента радия. Исследования Резерфорда доказали с несомненностью, что выделяемые радиевыми препаратами α -частицы суть атомы гелия, заряженные положительным электричеством. В одном из своих опытов, опубликованном в 1909 г., Резерфорд непосредственно наблюдал при помощи спектроскопа возникновение гелия внутри стеклянной трубки, когда эта трубка была подвергнута бомбардировке α -частиц, получившихся из эманации радия.

В настоящее время мы знаем с довольно большой точностью и ту скорость, с какой образуется гелий из радия. Недавно, в октябре, появилась статья Больвида и Резерфорда, в которой подробно описаны весьма тщательные исследования авторов над скоростью зарождения гелия. Эти исследования показали, что один грамм радия в состоянии радиоактивного равновесия с тремя последующими продуктами своего распада (эманация, радий А и радий С) образуют в течение года 156 мм³ гелия при 0° и 760 мм давления.

Нам достаточно хорошо известны теперь превращения радиоактивных веществ. В последнее время весьма обстоятельно прослежены генеалогии трех семейств радия, тория и актиния. Мечта средневековых алхимиков о превращении одного химического элемента в другой, не казавшаяся гениальному Фарадею абсурдной, в действительности, хотя и не в том виде, как ожидали алхимики, осуществилась. Факт происхождения радия из урана, гелия из радия и его производных установлен окончательно.

Быть может, будет уместно еще напомнить, что в 1909 г. Резерфорд определил температуру ожиджения первого продукта превращения радия, газа эманации. Эманация радия обращается в жидкое состояние при обыкновенном атмосферном давлении при температуре между -62 и -65° . По наблюдениям Рамзая, ожидженная эманация отвердевает при -71° .

Одно из наиболее поразительных исследований, произведенных в промежуток времени, отделяющий два наших съезда, это исследование Резерфорда и Гейгера по определению числа α -частичек, вылетающих в единицу времени из препарата радия. Резерфорду и Гейгеру в одном их опыте при помощи электрометра, в другом при помощи экрана, покрытого кристаллическим сернистым цинком, удалось наблюдать эффект, производимый поодиночке каждой α -частичкой, и таким образом получился возможность подсчитать все число α -частичек, которое выбрасывается в одну секунду граммом чистого радия. Это число оказалось равным $3.4 \cdot 10^{10}$, т.е. 34 тыс. млн. Резерфорд и Гейгер нашли и величину положительного заряда каждой такой частички. Заряд α -частички равняется $9.3 \cdot 10^{-10}$ абс. электрост. единицы количества электричества, т.е. он в два раза больше количества электричества, соответствующего одному электрону.

Величина электрона определилась в течение последнего времени несравненно точнее, чем было это раньше. Замечательная работа Милликена, произведенная совместно с Флетчером в 1910 г., особенно сильно подтверждающая правильность идеи об атомическом строении электричества, установила величину электрона в $4.9 \cdot 10^{-10}$ абс. эл. ед. Несколько позже Милликен и Флетчер внесли некоторые поправки и окончательно определили электрон в $4.891 \cdot 10^{-10}$ абс. ед. Впрочем, эта идея о неизменности, о полной определенности величины электрона встречает возражения. Опыты Эренхафта и Пржибрама как бы разрушают принятое почти всеми положение о существовании атома электричества. Их наблюдения при помощи ультрамикроскопа над наэлектризованными частицами металлов, получающимися при распылении этих металлов действием вольтовой дуги, дают для зарядов различных по объему частичек весьма неодинаковые величины, и для очень мелких частичек эти заряды оказываются значительно меньшими, чем выведенная из всех прочих наблюдений величина атома электричества. Весьма желательно внести некоторое изменение в постановку опытов Эренхафта, которое должно ослабить, а может быть, и совсем уничтожить влияние, какое, как вполне правильно заметил А.Ф.Иоффе, могут оказывать на движение наблюдаемой в ультрамикроскопе частички (а вместе с тем и на окончательные результаты) тучи других еще более мелких заряженных частичек, находящихся по соседству с этой частичкой. Представляется возможным пропуская-

нием воздуха с подвешенными в нем заряженными частичками между двумя параллельными металлическими пластинками, с определенной на них разностью потенциалов, отфильтровывать, в большей или меньшей степени, находящиеся в воздухе заряды и тем приблизить условия наблюдений по способу Эренхафта к условиям опытов Милликена.

Во всех только что упомянутых исследованиях, т.е. в исследованиях α -частиц и элементарных зарядов, мы имеем дело с атомами материи и предполагаемыми атомами электричества, т.е. с тем, что непосредственно наблюдать каким-либо способом представлялось еще весьма недавно абсолютно невыполнимым. Мы видим, что в настоящее время физики переступили грань этой невозможности. Они не только уверились в реальности атомов, они стремятся, и отчасти уже успели в этом, подчинить отдельные атомы своему наблюдению. Подобно тому как при помощи ультрамикроскопа обнаруживаются тельца, выходящие за предел видимости в обыкновенном микроскопе, так при помощи наблюдения капелек жидкости в электрическом поле конденсатора, наблюдения электрического тока в газе или явления сцинтилляций сернистого цинка оказывается возможным уловить электрон или подметить атом материи, несущий с собой минимальный заряд электричества.

Теперь явилась возможность непосредственно убедиться и в существовании в жидкости разделенных друг от друга молекул, и в том движении, которое приписывает им современное учение о теплоте.

Замечательное исследование Перрена над броуновским движением весьма мелких зерен гуммигута или мастики в воде не только окончательно определило причину этого движения, а именно — толчки, наносимые зернышкам движущимися молекулами жидкости, но дало возможность непосредственно измерить среднюю энергию поступательного движения молекул при данной температуре, а также определить и постоянную Авогадро, т.е. число молекул в одной грамм-молекуле. Из наблюдений над броуновским движением Перрен вывел для этой постоянной величину, равную $71 \cdot 10^{22}$, что весьма близко сходится с результатами, полученными на основании совершенно других наблюдений, и, между прочим, на основании измерения количества гелия, образующегося в единицу времени из единицы массы радия и подсчета числа α -частиц, выбрасываемых в ту же единицу времени той же единицею массы радия.

Последние два-три года могут быть названы годами полного торжества атомической теории Дальтона. Это учение подтвердилось непосредственными наблюдениями настолько прочно, что существование молекул во всяком теле представляется вполне несомненным. Это уже не рабочая гипотеза, а ясная картина действительного строения физических тел.

Перехожу в другую область физики, в область лучистой энергии. И здесь в короткое время было достигнуто немало успехов. Насколько расширилась спектральная шкала теперь! Ведь еще недавно наши сведения об инфракрасной части спектра ограничивались возможностью наблюдать лучи, длина волны которых выражается в 61.1μ , т.е. приблизительно равняется 0.06 мм. Оставался, таким образом, неисследованным довольно значительный промежуток между электрическими лучами и лучами тепловыми. Мы знаем, как далеко в сторону меньших длин волн отодвинул П.Н.Лебедев границу наблюдаемой области электрических лучей, но тем не менее самые короткие электрические волны, получающиеся пока в лабораториях, имеют длину в 4 мм. Волны длиной от 4 до 0.06 мм были неизвестны, их наблюдать не удавалось. В январе прошлого года было опубликовано исследование Рубенса и Хольнагеля, в котором посчастливилось подметить тепловые лучи, длина волны которых была уже в 96μ . Это лучи, которые остаются после многократного отражения излучений ауэровской горелки от йодистого калия. В январе настоящего года появилась работа Рубенса и Вуда, в которой при помощи особого метода применения кварцевых линз, собирающих лучи в том месте, где находится микрорадиометр, удалось обнаружить в пучке света, исходящего из накаливаемой ауэровской сетки, существование лучей с длиной волны в 110μ , а очень скоро после этого Рубенс при посредстве того же метода, соединенного с предварительным отражением лучей от поверхности исландского шпата, открыл лучи с длиной волны в 116.1μ . Наконец, весной этого года Рубенс вместе с Байером, пользуясь опять-таки преломлением в кварцевых линзах, выделил из пучка света, испускаемого кварцевой ртутной лампой, лучи с длиной волны в 314μ , т.е. почти в $1/3$ мм. Границы наблюдений электрических и световых волн очень сблизились, остался пока еще неисследованным небольшой интервал, всего только в три с половиной октавы.

Насколько значительно удлинилась спектральная шкала в сторону инфракрасной части, настолько мало расширилась она в противоположную сторону. Старания воспроизвести ультрафиолетовые лучи с длинами волн, более короткими, чем длина волны лучей Шумана, т.е. меньше 0.1μ , были малоуспешны. Однако небольшой успех получился и в этой области. Ленард и Рамзауер в прошлом году наблюдали лучи, длина волны которых, по всей вероятности, меньше 0.09μ . Такие лучи возникают при проскакивании электрических искр между алюминиевыми электродами, помещенными в цепи особенно мощного трансформатора с присоединенным к нему конденсатором.

Итак, наблюдаемые до настоящего времени ультрафиолетовые, видимые и инфракрасные лучи располагаются в спектре, обнимающий собой почти

12 октав. Из всего этого количества лучей наш глаз чувствует лишь небольшую часть; все лучи, производящие световое впечатление, не составляют собой даже одной целой октавы. <...>

30 октября 1901 г., в первый раз, в только что построенном Физическом институте был прочитан присланный П.Н.Лебедевым доклад о произведенных им опытах над давлением лучей света на поверхности твердых тел. Я отчетливо помню, как поразило всех бывших на этом заседании открытие Петра Николаевича. Здесь же 27-го декабря 1907 г. на заседании Отдела физики 1-го Менделеевского съезда было прочитано предварительное сообщение Петра Николаевича о другом ряде его опытов, об исследовании им давления света на газы. Теперь это исследование вполне закончено. При помощи остроумнейшего способа Петр Николаевич констатировал давление света на газы и таким образом блестяще подтвердил правильность гипотезы, высказанной Кеплером еще 300 лет тому назад.

Как я уже упомянул в самом начале, я не касаюсь в моем коротком обзоре теоретических изысканий, я не останавливаюсь на развиваемых ныне новых воззрениях на сущность света, на непрерывно высказываемых ожесточенных нападениях на самую идею об эфире, эфире, который до последнего времени играл первенствующую роль при нашем объяснении разнообразных физических явлений. Блестящая речь, произнесенная сегодня на общем собрании Н.А.Умовым, дала нам полное представление современного настроения в теоретической физике. Не могу не отметить, однако, весьма удивительной метаморфозы, какая произошла в нашей науке. Весьма недавно мы как будто навсегда покончили с материальностью электричества, мы думали, что при помощи вездесущего эфира получим возможность вполне постигнуть все электрические явления, мы уже совсем забыли корпускулярную теорию Ньютона, теперь мы опять оживили электрическую материю и снова возвращаемся к теории истечения света. В момент торжества атомистики заключила с ней тесный союз энергетика, но при этом многое, казавшееся ясным, затуманилось. Этот туман, однако, можно надеяться, кратковременный. Он быстро рассеется, и перед нами откроется ярко освещенная картина физических явлений.

Возвращаюсь к открытиям в экспериментальной физике. Исследования Вуда в области абсорбции света и флюоресценции, произведенные в недавнее время, открывают нам совсем новые горизонты. Они помогут, быть может, проникнуть во внутреннее строение атома и непосредственно изучить его конструкцию. Вуд исследовал пары йода, ртути, калия и особенно детально пары натрия, наблюдая в этих телах спектры поглощения и спектры флюоресценции. Особенный интерес представляет спектр флюоресценции, когда свет, возбуждающий эту флюоресценцию, вполне однородный, т.е. когда

флюоресценция паров вызывается пучком света, соответствующего какой-либо спектральной линии. В этом случае спектр является линейчатым; он состоит из довольно большого числа правильно распределенных линий. Особенно резко выступает линия, длина волны которой одинакова с длиной волны возбуждающего света, по обе стороны этой линии располагаются другие с близко одинаковыми промежутками между ними, для паров натрия равными приблизительно 37 ангстремовских единиц. Такой спектр назван Вудом спектром резонанса. Изменяя длину волны возбуждающего света, Вуд получал в спектре флюоресценции различные серии линий с различными распределениями в них интенсивности, но всегда, однако, появлялась линия, соответствующая длине волны возбуждающего света, и расстояния между отдельными линиями в спектре были близко одинаковы. Это открытие заслуживает особенного внимания. Оно представляет собой весьма веское подтверждение электронной теории. В самом деле, как приводит в своей статье Вуд, Лармор в письме к нему сообщает, что не испускающая свет система электронов, приведенная в возмущение поглощением радиаций, по частоте соответствующих частоте колебаний одного из ее электронов, находящихся в непрерывном движении по замкнутым орбитам, превращается в систему, которая будет испускать радиации, и эти радиации дадут в нормальном спектре серию равноотстоящих линий, причем одна линия будет непременно соответствовать частоте поглощенных колебаний.

Итак, атом вещества — сложная система, сплетение нескольких цепей связанных между собой электронов. Проникновение атома лучами света приводит в колебание могущий колебаться в унисон с этим светом электрон, а вместе с тем благодаря существующим связям между всеми электронами одной цепи возбуждает вибрации и в других звеньях последней. Конструкция атома начинает мало-помалу обнаруживаться. Можно надеяться, что в ближайшем будущем строение атома будет для нас вполне ясно.

Неменьший интерес представляют самые недавние наблюдения Вуда, обнаружившие весьма большое влияние на флюоресценцию паров незначительной примеси некоторых газов, совершенно не действующих химически на эти пары.

При исследовании флюоресценции паров йода и ртути оказалось, что ослабление флюоресценции находится в тесной связи с электрическими свойствами введенного газа. Чем более электроотрицателен газ, тем сильнее ослабляет он флюоресценцию. Атомы такого газа как бы притягивают к себе электроны, находящиеся в атоме йода или ртути, и этим своим притяжением препятствуют возбуждению колебаний их. Прибавление гелия к парам йода влияет даже на цвет флюоресценции. При действии на пары йода белого света флюоресценция из желто-зеленой переходит вместе с уве-

личением количества прибавленного гелия все более и более в красноватую.

При возбуждении флюоресценции в парах йода однородным светом не наблюдается простым глазом перемена цвета, но получается существенное изменение в спектре этой флюоресценции. К спектру резонанса прибавляется полный полосатый спектр, такой, какой наблюдается, когда освещение производится белым светом.

При существовании вместе с парами йода гелия столкновение молекул йода с атомами гелия вызывает сотрясение электронов в молекулах, вследствие чего может уничтожиться независимость друг от друга отдельных цепей электронов, а поэтому при возбуждении монохроматическим светом колебаний в одной какой-либо цепи должны возникнуть колебания электронов и во всех прочих цепях, т.е. должен появиться полосатый спектр флюоресценции. Такова весьма вероятная гипотеза Вуда.

Исследования световых явлений — дисперсии, поглощения и флюоресценции — расширяют в значительной степени наши сведения о строении материи, об анатомии атомов.

Я не имею возможности останавливаться на других крайне интересных опытах последнего времени. Я обратил ваше внимание лишь на те, которые, по моему мнению, представляют наибольшее значение для дальнейшего развития нашей науки, но я не могу закончить своего очерка, не упомянув о результатах замечательных исследований сэра Дж. Томсона положительных лучей.

Положительное электричество — это вполне загадка для нас. Хотя мы до сих пор ничего не знаем о сущности отрицательного электричества, мы все-таки полагаем теперь, что отделили это электричество от материи, мы считаем катодные лучи и лучи β за потоки атомов отрицательного электричества. В самом деле, опыты Кауфмана, Бухерера, Хупка показали, что масса каждой составной частички этих потоков является функцией скорости движения этой частички, что масса, следовательно, не может быть такая, какая свойственна материи, но представляет собой лишь массу электромагнитную. Хотя между окончательными выводами из этих трех исследований и встречаются некоторые несогласия, в общем, однако, они приводят к одному и тому же результату — незначительности (в обыкновенном смысле этого слова) состава катодных и β -лучей, к нахождению в этих лучах отрицательного электричества в изолированном от материи состоянии.

Ничего подобного по отношению к положительному электричеству мы не знаем. Всюду, где мы встречаемся с таким электричеством, мы находим и материю. Положительное электричество тесно связано с веществом. Лучи α , несущие вместе с собой положительные заряды, несомненно вещественны; как было упомянуто раньше, лучи α — поток положительно заряженных атомов ге-

лия. Каналовые лучи, открытые в 1886 г. Гольдштейном и также, как думали раньше, несущие положительное электричество, тоже материальны. Анализ этих-то лучей и были посвящены последние работы сэра Томсона.

Остроумными и изящными опытами Томсон доказывает, что каналовые лучи представляют собой поток частиц, но эти частицы не все заряжены положительно. Некоторые из этих частиц вполне нейтральны, некоторые же даже заряжены отрицательно. Сэр Томсон определяет место возникновения каналовых лучей и те изменения, какие претерпевают при своем движении частички, составляющие собой эти лучи. Прямыми опытами он устанавливает образование каналовых лучей на наиболее отдаленной от катода границе темного катодного пространства. Здесь, под влиянием непрерывно наносящихся ударов частицами катодного потока, молекулы газа накапливают в себе все больше и больше энергии и наконец как бы взрываются и выбрасывают из себя частички, заряженные положительно, или нейтральные дублеты, состоящие из положительно наэлектризованной частички и связанного с нею отрицательного электрона. Как положительно заряженная частичка, так и нейтральный дублет при движении внутри трубки подвергаются изменениям. Первая, присоединив встретившийся на ее пути отрицательный электрон, обращается в нейтральный дублет, второй, потеряв при столкновении с молекулой газа электрон, заряжается положительно или же, поглотив встречный электрон, является заряженным отрицательно.

Опыты Томсона подтверждают еще раз существование определенной единицы положительного электричества, атома этого электричества, но они не дают еще возможности утверждать нахождение таких атомов без соединения с материей.

Наблюдения над магнитным отклонением каналовых лучей дало Томсону средство судить о природе газа, заключающегося в трубке. Такой способ анализа газа превосходит даже спектральный, так как он применяется при упругостях газа настолько малых, что уже не получается свечения, доступного изучению при помощи спектроскопа.

Два года тому назад мы праздновали пятидесятилетие открытия Кирхгофа и Бунзена, давшего затем нам возможность узнавать не только состав тел на земной поверхности, но и проникать в природу и состояние небесных светил. Быть может, развитие нового метода Томсона позволит нам разлагать атомы и изучать их составные части. Ведь при помощи электричества мы не только приводим в движение колоссальные массы, сносимся друг с другом на громадных расстояниях, но улавливаем и то, что не подвергалось иным каким-либо способом ни измерению, ни даже наблюдению.

Я кончаю свой краткий обзор. Я оставил в стороне все то, что в последнее время было высказано

относительно принципа релятивности, природы излучения и сущности света. Все это касается самого фундамента теоретической физики и возбуждает необычайный интерес. Но мне думается, что по этим вопросам еще не время принимать окончательное решение. Недостаточны весьма остроумные спекуляции, весьма изящные сопоставления, нужны факты, нужны данные непосредственных опытов, чтобы раз навсегда отказаться от того, чем жила наша наука в течение всего времени ее необыкновенного развития. Идея об эфире, идея об участии среды в передаче действий на расстояние руководила изысканиями всех крупнейших исследователей в области физики. Эта идея принесла пользу; мы

знаем, к каким блестящим результатам привела она. Вероятно, и в будущем она послужит нам. Задача настоящего времени — выяснить природу электрона, сущность фарадеевых трубок и хотя бы немного подвинуться в разрешении вопроса, что такое положительное электричество. Внимательное изучение того, что происходит при ударах α -частиц о встретившиеся им преграды, даст возможность, быть может, ближе ознакомиться с отношением положительного электричества к материи.

Пожелаем же, чтобы наша наука продолжала так же, как и до сих пор, быстро развиваться и чтобы в дальнейших завоеваниях ее все больше и больше участвовали русские силы.

Future in the past

М.А.Смондырев,

доктор физико-математических наук

Объединенный институт ядерных исследований
Дубна

Начну с биографической справки. Иван Иванович Боргман окончил Петербургский университет, после чего продолжил образование в Гейдельберге. В это самое время вышел из печати фундаментальный двухтомник Дж.Максвелла «Трактат об электричестве и магнетизме», содержащий классическую теорию электромагнитного поля, квинтэссенцией которой были знаменитые уравнения Максвелла. Говорят, Боргман был одним из первых ученых в мире, кто понял суть и значение теории Максвелла, и позже активно ее пропагандировал.

Вернувшись из Германии, Боргман всю оставшуюся жизнь работал в своей альма-матер, читая, впрочем, лекции и в других учебных заведениях Петербурга. Иван Иванович преподавал физику членам императорской семьи: юному наследнику престола Николаю Александровичу,

затем его братьям и сестрам. Научные работы вел в основном в области электричества и магнетизма, но история сохранила его имя также как одного из видных организаторов науки.

Четверть века Боргман возглавлял физический отдел «Журнала Русского физико-химического общества». Впоследствии, уже в 1930-х годах, правопреемником отдела стал знаменитый советский «Журнал экспериментальной и теоретической физики». При активном участии Боргмана в Петербургском университете был создан Физический институт (ныне НИИФ им.В.А.Фока СПбГУ), директором которого он был более 10 лет. В 1905 г. Боргман стал первым избранным ректором Петербургского университета, через пять лет (1910) в знак протеста против нарушения полицией прав студентов оставил эту должность. Был он также членом Госсовета от университетов, членом Петербургской городской думы.



Иван Иванович Боргман
(1849—1914).

Почему же Боргман, столь разносторонний и эрудированный ученый, в своем докладе практически обошел молчанием главные теоретические достижения физики предшествующего десятилетия — кванто-

вую теорию излучения и теорию относительности? Очевидно, эти два направления, заложившие основы физики XX в., вызвали потрясения в умах физиков начала века.

Для разрешения трудностей, с которыми столкнулась классическая физика при объяснении свойств теплового излучения, М.Планк ввел понятие «квант действия» (современное название — «постоянная Планка»), предположив, что лучистая энергия может испускаться и поглощаться только дискретными порциями. Доклад на эту тему был сделан на заседании Немецкого физического общества (*Deutsche Physikalische Gesellschaft*) 14 декабря 1900 г., а в 1918 г. Планку была вручена Нобелевская премия «в знак признания его заслуг в развитии физики благодаря открытию квантов энергии».

В 1905 г. А.Эйнштейн выдвинул идею, что энергия не только испускается порциями, но и вообще существует в таком виде: «Мы должны предположить, что однородный свет состоит из зерен энергии световых квантов (*Lichtquanten*), т.е. небольших порций энергии, несущихся в пустом пространстве со скоростью света». Представление о квантах света (позже их удачно назвали фотонами) позволило Эйнштейну объяснить законы фотоэффекта. Именно это достижение, а не знаменитую теорию относительности, рожденную в том же 1905 г., оценил Нобелевский комитет, присудив ему в 1921 г. премию «за заслуги перед теоретической физикой и особенно за объяснение закона фотоэлектрического эффекта».

По тексту доклада Боргмана видно, что он был удручен кажущимся возвращением к корпускулярной теории Ньютона, давно отвергнутой в пользу волновой теории света, подтверждаемой всеми экспериментами и описываемой столь дорогими ему уравнениями электромагнитного поля Максвелла. Руши-

лось все, к чему привык Боргман, и он попросту отказался говорить об этом подробно, как и о теории относительности, считая не без оснований, что «весьма остроумные спекуляции» и «изящные сопоставления» должны быть подтверждены опытами, которые бы вынудили «раз и навсегда отказаться от того, чем жила наша наука в течение всего времени ее необыкновенного развития».

До сплава квантовых идей с электродинамикой Максвелла оставалось еще более 30 лет. Но квантовая механика стояла уже на пороге. Парадокс заключается в том, что целый ряд явлений, о которых Боргман подробно рассказывает в своем докладе, связан как раз с новой физикой, о чем еще никто не подозревал. Именно на таких явлениях мы и остановимся, оставив за скобками другие замечательные достижения того времени, лежащие в пределах классической физики, — исследование Ж.Б.Перреном броуновского движения или открытие П.П.Лебедевым давления света.

Физика низких температур

В конце XIX в. в разных странах развивались технологии сжижения газов. Первым в 1877 г. был охлажден до жидкого состояния кислород (температура кипения -183°C , или 90 K), за ним в 1883 г. последовал азот (-196°C , или 77 K). К этому времени к исследованиям низких температур подключился Х.Камерлинг-Оннес, только что назначенный профессором физики Лейденского университета (Голландия), где он основал ставшую лучшей в мире криогенную лабораторию и школу ремесленников, готовившую умелых техников и стекловудов, в которых профессор нуждался для изготовления точных приборов и инструментов. Его предшественники получали жидкие газы каплями, в то время как Камерлинг-Оннесу для заду-

манных исследований поведения веществ при низких температурах были нужны литры. К началу 1890-х годов он уже создал установку такой производительности. К концу столетия очередь дошла до сжижения водорода, однако эту гонку Камерлинг-Оннес проиграл шотландцу Дж.Дьюару, который получил небольшое количество жидкого водорода (-253°C , или 20 K) в 1898 г.

Камерлинг-Оннесу были нужны гораздо большие объемы, и он получил жидкий водород лишь восемь лет спустя. К тому же его работа была надолго прервана по причинам, не имеющим отношения к науке. Дело в том, что за 90 лет до того, во время наполеоновских войн, в центре Лейдена взорвался корабль с боеприпасами и разрушил целый квартал города. Именно на тех руинах была построена криогенная лаборатория, и когда горожане узнали, что в ней накапливаются большие запасы сжатого водорода, образующего при соединении с кислородом гремучую смесь, у них сработала историческая память и они впали в панику. Решением муниципалитета в 1896 г. исследования были запрещены, и продолжить их удалось лишь два года спустя.

К 1906 г. целью Камерлинг-Оннеса стало сжижение гелия — элемента, сначала обнаруженного на Солнце и лишь за 10 лет до этого — на Земле, в составе некоторых пород. С помощью брата, работавшего директором Управления коммерческой разведки, Камерлинг-Оннес закупил в США большое количество монацитового песка, содержащего гелий. (Много лет спустя выяснилось, что массовыми закупками пород, содержащих гелий, занимались в то время и предусмотрительные немцы, использовавшие негорючий гелий вместо водорода для наполнения своих бомбардировщиков-цеппелинов во время Первой мировой войны.) Из американского песка Камерлинг-Оннес сумел извлечь около 300 л

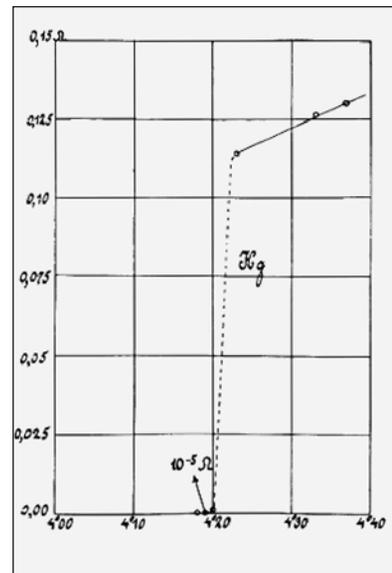
газообразного гелия, и 10 июля 1908 г., когда все приготовления наконец были сделаны, первым в мире получил жидкий гелий (температура кипения -4.2 К). Снижая давление газа, ему удалось понизить температуру жидкости до 1 К.

Именно это достижение отмечает Боргман в своем докладе, и Нобелевская премия по физике была присуждена в 1913 г. Камерлинг-Оннесу «за исследования свойств вещества при низких температурах, которые привели к производству жидкого гелия». Обращает внимание, с какой нескрываемой горечью за состояние научных исследований в России говорит об этих работах Боргман: «Я не могу не отметить, какими средствами располагает лаборатория маленького города Лейдена маленькой страны Голландии. Для одного лишь опыта Камерлинг-Оннесу потребовалось 75 л жидкого воздуха и 20 л жидкого водорода. В каком из русских университетов можно было бы затратить на один опыт столько денег, сколько нужно для получения таких больших количеств этих жидкостей?». Так говорил профессор столичного университета богатейшей в мире империи, преподававший физику самому царю и его братьям и сестрам в красивейшем городе мира, украшенном дворцами знати, стоящими баснословных денег. Но, как мы знаем, отношение к науке в нашей стране изменилось лишь после Октябрьской революции. Поразительно, что спустя столетие в новой России мы снова повторяем ошибки старой империи.

Конечно, сжижение гелия и достижение температур порядка 1 К было огромным научным достижением. Но если спросить современного физика, чем славен Камерлинг-Оннес, то ответ в 100% случаев будет у всех одинаков: открытием сверхпроводимости. А вот профессор Боргман касается этого главного достижения лишь слегка, упоминая, что исследования в Лейдене под-



Хейке Камерлинг-Оннес и график измеренной им зависимости сопротивления образца от температуры, демонстрирующий переход ртути в сверхпроводящее состояние.



твердили выводы электронной теории, что сопротивление металлов вблизи абсолютного нуля чрезвычайно мало. Что правда, то правда: сопротивление металлов падало при понижении температуры из-за уменьшения тепловых колебаний ионов кристаллической решетки, «мешающих» движению электронов проводимости. Однако существовали разные мнения относительно того, что будет вблизи нуля температур. Падение сопротивления до нуля должно было наблюдаться лишь для чистых металлов, а примеси и дефекты кристаллической решетки должны были привести к существованию небольшого остаточного сопротивления. Но была и другая точка зрения, согласно которой падение сопротивления должно смениться при какой-то температуре ростом до бесконечности, ибо электроны проводимости также будут «заморожены» и перестанут проводить электрический ток. Разрешением этой альтернативы и занимался Камерлинг-Оннес (в бесконечный рост он сам не верил и хотел исключить такую возможность, измерив остаточное сопротивление разных металлов).

Работая с платиной, он нашел небольшое остаточное сопротивление (об этом говорит Боргман), в то время как исследования с ртутью привели к неожиданному результату, полученному 8 апреля 1911 г.: ее сопротивление оказалось неизмеримо малой величиной. И дело не в том, что в лаборатории с помощью процесса дистилляции можно было получать очень чистую ртуть. Сопротивление падало до нуля не при нуле температур, а скачком, при переходе через критическую температуру 4.15 К! Три недели спустя Камерлинг-Оннес доложил свои результаты на апрельском собрании Королевской академии наук Нидерландов, сообщив, что при 4.3 К сопротивление ртути много меньше, чем при 14 К, но все еще измеримо, а при еще меньших температурах становится равным нулю в пределах достигнутой точности эксперимента.

Улучшив технику измерений, Камерлинг-Оннес провел 23 мая 1911 г. эксперимент в обратном направлении — температура ртути в нем повышалась. В своей записной книжке он пишет: «При 4 К рост сопротивления не

замечен. При 4.05 К также ничего. При 4.12 сопротивление начало появляться» [1]. В дальнейшем он установил, что переход в сверхпроводящее состояние очень узок: повышение температуры всего на 0.1 К выше критической увеличивает сопротивление ртути в 400 раз.

Такое поведение в корне противоречило предсказаниям классической электронной теории. Для объяснения феномена надо было привлечь квантовую механику, но до ее появления оставалось еще немало лет, а до создания теории сверхпроводимости — немало десятилетий. Но сам факт открытия нового явления был налицо. В 1912 г. лейденская команда обнаружила переход в сверхпроводящее состояние у свинца и олова. Ими же были найдены и первые сверхпроводящие сплавы — ртути с золотом и ртути с оловом. А вот платина и золото само по себе, с которыми Камерлинг-Оннес экспериментировал вначале, вообще не сверхпроводники.

Любопытно, что Камерлинг-Оннес наблюдал еще одно квантовое явление — переход жидкого гелия в сверхтекучее состояние. В тот же День Первый, 8 апреля 1911 г., Камерлинг-Оннес зафиксировал в записной книжке наблюдение: при температуре около 2 К кипение гелия внезапно прекратилось и сменилось сильным испарением с поверхности [1]. Дальнейшего исследования этого феномена Камерлинг-Оннес, видимо, не проводил, и оно было вновь открыто только в начале 1930-х годов, а прямые наблюдения сверхтекучести гелия выполнил П.Л.Капица лишь в 1938 г.

Ядерная физика

На заседании Манчестерского философского общества 7 марта 1911 г. Резерфорд сделал доклад «Рассеяние α - и β -лучей и структура атома». В тот день присутствовавшие узнали, что

атом в миниатюре повторяет устройство Солнечной системы: в центре атома расположено «светило» — положительно заряженное ядро, вокруг которого вращаются «планеты» — отрицательно заряженные электроны.

Боргман цитирует статью Резерфорда с сотрудниками, вышедшую в 1911 г. в журнале «Philosophical Magazine», об измерении скорости образования гелия из радия при α -распаде, но ни словом не упоминает об их работе, опубликованной в мае того же года и в том же журнале. Выходит, английский журнал в университет приехал, Боргман за этими исследованиями следил, но почему-то не оценил главного открытия Резерфорда.

Годом раньше первооткрыватель электрона Дж.Дж.Томсон предложил модель атома — так называемый «пудинг с изюмом». Атом представлялся в виде сферы, по объему которой равномерно размазан положительный электрический заряд, а внутрь вкраплены электроны, так что полный заряд атома равнялся нулю. «Обстреливая» атомы мишени пучками α -частиц и электронов и подсчитывая относительное число частиц, отклоняющихся на тот или иной угол, исследователи как бы «просвечивали» атом, пытаясь понять его устройство. В модели «пудинга с изюмом» частицы должны были лишь слегка отклоняться от начального направления движения. Поэтому источники частиц и регистрирующие устройства располагались по разные стороны от мишени. Резерфорд тоже проводил такие эксперименты, используя источник α -частиц и мишень из золотой фольги. Но одному из его сотрудников было поручено модифицировать установку и расположить детектор частиц (флуоресцирующий экран, описанный в докладе Боргмана) по ту же сторону от мишени, что и источник. Иными словами, попробовать подсчитать число α -час-

тиц, отклоненных атомами золота на большие углы. Сейчас бессмысленно гадать, было ли это гениальной догадкой или просто научной добросовестностью — раз уже взялся за работу (а сидеть в темноте, уставившись на экран, и считать вручную возникающие там вспышки от попадания α -частиц — дело тяжелое), то надо промерить весь диапазон углов отклонения. Но когда сотрудник доложил, что примерно одна из 10 тыс. α -частиц отклоняется на большой угол и есть даже такие, которые отражаются назад, Резерфорд был крайне удивлен. Как он позже сформулировал, «это было все равно, как если бы снаряд из 15-дюймового морского орудия попал в папиросную бумагу и отскочил назад» [2].

В научной статье вывод был сформулирован менее поэтично: «Рассматривая все свидетельства в целом, простейшим представляется предположение, что атом содержит центральный заряд, распределенный в очень малом объеме». Как ни странно, но сообщение Резерфорда не вызвало большого шума не только в России, но и в Англии. Открытие атомного ядра даже не было упомянуто в обзорном докладе сэра Уильяма Рамзея на ежегодном собрании Британской научной ассоциации [2].

Зато оно вдохновило молодого датского физика Н.Бора, посетившего лабораторию Резерфорда в марте 1912 г. В первом же абзаце своей статьи «О строении атомов и молекул», опубликованной в июле 1913 г., Бор подробно объясняет планетарную модель атома Резерфорда, вытекающую из экспериментов по рассеянию α -частиц. И далее применяет к ней идеи квантовой теории излучения, развивавшиеся в работах Планка и Эйнштейна. Известно, что Бор посылал Резерфорду предварительный вариант статьи для обсуждения. В результате возникла изучаемая сейчас в средней школе полуклассическая-полуквантовая теория ато-

ма Бора, объяснившая основные закономерности расположения спектральных линий излучения водородоподобных атомов. А несколькими годами позже трудами ряда ученых была построена настоящая квантовая механика, но это уже совсем другая история.

В 1908 г. Резерфорд был награжден Нобелевской премией по химии «за исследования в области распада элементов в химии радиоактивных веществ». Нобелевской премии по физике за открытие атомного ядра его не удостоили. По иронии судьбы, он был выдвинут в 1922 г., но премию получил тогда Бор «за заслуги в исследовании строения атомов и испускаемого ими излучения».

Заряд и масса электрона

Еще одно направление исследований, затронутое в докладе Боргмана, — эксперименты Р.Милликена по измерению заряда электрона. Стоит отметить, что слово «электрон» в 1891 г. Дж.Стони предложил не в качестве наименования еще не открытой тогда частицы, а как название элементарного электрического заряда. Именно этот смысл все еще вкладывал Боргман в слово «электрон».

Свои первые результаты по измерению элементарного электрического заряда Милликен опубликовал в 1910 г. К этому времени уже было известно отношение заряда электрона к его массе, но точные значения заряда и массы еще не были установлены. Милликен проводил опыты с мельчайшими заряженными капельками масла, движущимися в постоянном электрическом поле. Проведя наблюдения над множеством таких капелек, Милликен пришел к выводу, что электрический заряд каждой из них был целым кратным некоего минимального заряда, который он определил как $e = 1.592 \cdot 10^{-19}$ Кл. Современное значение $e = 1.60217653(14) \cdot 10^{-19}$ Кл, так что

Милликен ошибся всего на 0.6%. В 1923 г. Роберт Милликен получил Нобелевскую премию по физике «за эксперименты по определению элементарного электрического заряда и фотоэлектрическому эффекту».

По похожей схеме, но работая с металлическими пылинками, заряд электрона измерял в Петербурге А.Ф.Иоффе, получивший сходные результаты, но опубликовавший их на два года позже Милликена. Его имя упоминается Боргманом только в связи с критикой экспериментов Ф.Эренгафта. Этот австрийский физик проводил опыты с мельчайшими металлическими пылинками, получаемыми при дуговом разряде. Но его результаты расходились с утверждениями Милликена. Эренгафт утверждал, что ему удалось зафиксировать «субэлектроны» — частицы с зарядом, в несколько раз меньшим заряда электрона. В дальнейшем при обсуждении результатов Эренгафта в научном мире были указаны возможные источники систематических ошибок в его экспериментах, и по мере подтверждения результатов Милликена в разных лабораториях о данных Эренгафта перестали говорить серьезно. Однако о них вспомнили, когда в обиход физиков вошла теория кварков — гипотетических частиц с дробным зарядом $2e/3$ и $e/3$. П.Дирак приводит в своей книге гистограмму из работы Эренгафта, где по горизонтали отложены наблюдаемые значения заряда, а по вертикали — число частиц [3]. На ней отчетливо видны два пика — один на значении заряда электрона e , другой — как раз на значении $2e/3$, причем эти измерения были выполнены задолго до появления кварковой модели элементарных частиц.

Значит ли это, что Эренгафт обнаружил свободные кварки? Число якобы наблюдавшихся им «субэлектронов» было слишком велико, чтобы в такое можно было поверить. В 1960—1980-х годах поиском свобод-



Почтовая марка, выпущенная в честь столетия первооткрывателя атомного ядра. Рисунок из его статьи иллюстрирует рассеяние α -частиц на большие углы.

ных кварков занималось множество лабораторий, и в некоторых из них даже получали сходные результаты. Так, группа Станфордского университета, измерявшая заряды мельчайших сверхпроводящих шариков из ниобия по методике Милликена, сообщила о наблюдении заряда в одну треть электронного. Но все подобные результаты не получали подтверждения в других экспериментах. Не дали результатов и поиски свободных кварков в космических лучах, в осадочных породах, в морской воде, в метеоритах — где их только ни искали... В настоящее время господствует мнение, что кварки прочно заперты внутри обычных частиц и в свободном состоянии существовать не могут.

Второй «электронный» сюжет в докладе Боргмана связан с экспериментами по определению зависимости массы электрона от его скорости. Сейчас принята другая терминология:



Аппарат Милликена для опытов с заряженными масляными каплями.

масса частицы есть инвариант, и мы говорим об иной, нежели в классической физике, связи импульса частицы с ее скоростью. Рассказывая о проведенных несколькими группами опытах, Боргман сообщает об обнаружении неклассического поведения, делая вывод о «невещественности» электронов и об электромагнитном происхождении массы. Упомянув о «некотором несогласии» между выводами исследователей, он совершенно не развивает дальше этот сюжет. На самом деле речь идет об очень важных исследованиях по проверке теории относительности и выбору между альтернативными теориями, даю-

щими разную зависимость импульса от скорости. И если В.Кауфманн получил результаты, противоречащие выводам Лоренца—Эйнштейна, то А.Бухерер, наоборот, подтвердил правильность релятивистских формул. В свое время это сыграло роль в убеждении скептиков в правильности теории относительности, но сейчас высказываются сомнения, что точность экспериментов тех лет действительно позволяла различить альтернативные теории. Вопрос ныне исключительно академический, поскольку релятивистские формулы проверялись с тех пор неоднократно и сейчас с успехом используются при

проектировании всех крупных ускорителей и коллайдеров.

* * *

Вместо заключения хочу подчеркнуть, что пожелание профессора Боргмана, чтобы «наша наука продолжала... быстро развиваться и чтобы в дальнейших завоеваниях ее все больше и больше участвовали русские физики», сбылось на все 300%. Мы теперь знаем, что физику тогда уже в самом ближайшем времени ждали грандиозные открытия и успехи, и что темпы ее развития ускорились необычайно, и что советская школа физики заняла достойное место в мировой науке. ■

Литература

1. *Delft D.van, Kaas P.* Discovery of Superconductivity // *Physics Today*. 2010. №63. P.38—43.
2. *Campbell J.* Rutherford — the road to the nuclear atom // *CERN Courier*. 2011. V.51. №4. P.20—23.
3. *Дирак П.А.М.* Воспоминания о необычной эпохе. М., 1990. С.79—80.

ПРИРОДА

Над номером работали

Ответственный секретарь
Е.А.КУДРЯШОВА

Научные редакторы
О.О.АСТАХОВА
Л.П.БЕЛЯНОВА
Е.Е.БУШУЕВА
Т.С.КЛЮВИТКИНА
К.Л.СОРОКИНА
Н.В.УЛЬЯНОВА
Н.В.УСПЕНСКАЯ
О.И.ШУТОВА
С.В.ЧУДОВ

Литературный редактор
Е.Е.ЖУКОВА

Художественный редактор
Т.К.ТАКТАШОВА

Заведующая редакцией
И.Ф.АЛЕКСАНДРОВА

Младший редактор
Г.С.ДОРОХОВА

Перевод:
С.В.ЧУДОВ

Набор:
Е.Е.ЖУКОВА

Корректоры:
М.В.КУТКИНА
Л.М.ФЕДОРОВА

Графика, верстка:
А.В.АЛЕКСАНДРОВА

Свидетельство о регистрации
№1202 от 13.12.90

Учредитель:
Российская академия наук,
президиум
Адрес издателя: 117997,
Москва, Профсоюзная, 90

Адрес редакции: 119049,
Москва, Мароновский пер., 26
Тел.: (499) 238-24-56, 238-25-77
Факс: (499) 238-24-56
E-mail: priroda@naukaran.ru

Подписано в печать 19.12.2011
Формат 60×88 1/8
Офсетная печать, усл. печ. л. 10,32,
усл. кр.-отт. 67,8 тыс., уч.-изд. л. 12,2
Заказ 2030
Набрано и сверстано в редакции

Отпечатано в ППП типографии «Наука»
Академиздатцентра «Наука» РАН,
121099, Москва, Шубинский пер., 6